

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia de Energia

**Estudo e Validação de uma Bancada  
Experimental para a Análise de Escoamento  
Horizontal Bifásico Ar-Água**

Autor: Paloma Fachinelli de Oliveira  
Orientador: Prof. Dr. Felipe Chagas Storti

Brasília, DF  
2022





Paloma Fachinelli de Oliveira

# **Estudo e Validação de uma Bancada Experimental para a Análise de Escoamento Horizontal Bifásico Ar-Água**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Felipe Chagas Storti

Brasília, DF

2022

---

Paloma Fachinelli de Oliveira

Estudo e Validação de uma Bancada Experimental para a Análise de Escoamento Horizontal Bifásico Ar-Água/ Paloma Fachinelli de Oliveira. – Brasília, DF, 2022-

99 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Chagas Storti

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Escoamento Multifásico. 2. Perda de Carga. I. Prof. Dr. Felipe Chagas Storti. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo e Validação de uma Bancada Experimental para a Análise de Escoamento Horizontal Bifásico Ar-Água

CDU

---

Paloma Fachinelli de Oliveira

# **Estudo e Validação de uma Bancada Experimental para a Análise de Escoamento Horizontal Bifásico Ar-Água**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 23 de setembro de 2022:

---

**Prof. Dr. Felipe Chagas Storti**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias  
Barcelos Júnior**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2022



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais por terem me apoiado nessa trajetória, principalmente nos momentos em que desistir parecia ser mais atrativo.

Em segundo, queria agradecer, a mim mesma, por ter perseverado, acreditado e por ter feito da graduação um espaço de aprendizado e crescimento.

Um muito obrigado a Universidade de Brasília, pelos excelentes profissionais, oportunidades de ensino e experiências.

As pessoas que caminharam ao meu lado durante esse processo e que de alguma forma, fizeram com que a caminhada fosse mais leve, meus sinceros agradecimentos.





# Resumo

O fenômeno de escoamento multifásico pode ser observado em diversas aplicações práticas, em especial na Indústria Petrolífera, durante a fase de produção. Tal fenômeno, acontece quando duas ou mais fases escoam ao mesmo tempo em uma tubulação. Nesse caso, tem-se um comportamento mais complexo, que exige modelos matemáticos e físicos mais elaborados. O presente trabalho, possui como objetivo, realizar uma análise qualitativa do perfil de escoamento bifásico água-ar e do gradiente de pressão em uma bancada experimental e comparar os resultados gerados com os modelos propostos na literatura. Para este estudo, inicialmente, foi feita uma revisão bibliográfica e em seguida, a caracterização da bancada experimental utilizada no laboratório da Universidade de Brasília. Foi descrito o funcionamento de Medidores de Vazão tipo Turbina e por meio desse, foi realizada a coleta de dados. Foram encontrados padrões de escoamentos diferentes e uma certa predominância em certos tipos de padrão, devido a diferenças de vazão entre o gás e o líquido. Além disso, validou-se a bancada por meio de modelos propostos na literatura e foram geradas análises referentes a perda de carga e parâmetros do escoamento bifásico, que apresentaram bons resultados.

**Palavras-chave:** Escoamento Multifásico. Medidor de Vazão Tipo Turbina. Bancada Experimental. Perda de Carga



# Abstract

The multiphase flow can be seen in multiple practical applications, specially in the Petroleum Industry during the production phase. This phenomenon occurs when two or more phases exist at the same time in a pipe, in this case the behaviour is more complex and demands more elaborated mathematical and physical models. This work's main goal is to provide an analysis of the biphasic flow water-air pattern and the pressure drop in an experimental bench and compare the generated pattern with a model proposed on the literature. Initially, a literature revision of Mandhane's article was done for this work succeeded by the characterization of the experimental bench in University of Brasilia's laboratory. In addition, the operation of Turbine Flowmeter were defined and using them was collect flow rate data. As result, different types of flows were find, due to a prevalence in certain pattern types that comes from different flow rates between the gas and the liquid. It was possible legitimate the bench by utilizing a model proposed on the literature. Futhermore, was made an analyzes of pressure drop and biphasic parameters that presented good values.

**Key-words:** Multiphase Flow. Experimental Facility. Turbine Flowmeter. Pressure Drop



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação Gráfica de um Sistema Submarino (PETROBRAS, 2018)	21
Figura 2 – Panorama Evolutivo de Poços <i>Offshore</i> na Bacia de Campos. Fonte: (PETROBRAS, 2018)	28
Figura 3 – Plataforma Semissubmersível e Navio-Sonda. Fonte: (THOMAS, 2004)	29
Figura 4 – Poço Satélite com três linhas de interligação. Fonte: (ANDREOLLI, 2016)	30
Figura 5 – <i>Manifold</i> Marinho. Fonte: (PETROBRAS, 2018)	31
Figura 6 – Pluge de hidrato no receptor de PIG. (Banco de Imagem da Petrobras) Fonte: (ANDREOLLI, 2016)	32
Figura 7 – Padrão Estratificado. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 <i>apud</i> ANDREOLLI, (2016))	36
Figura 8 – Padrão Golfada. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 <i>apud</i> ANDREOLLI, (2016))	36
Figura 9 – Padrão Anular. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 <i>apud</i> ANDREOLLI, (2016))	37
Figura 10 – Padrão Bolhas Dispersas. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 <i>apud</i> ANDREOLLI, (2016))	37
Figura 11 – Padrão de Escoamento Vertical. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 <i>apud</i> ANDREOLLI, (2016))	38
Figura 12 – Comportamento de um fluido entre placas.(ÇENGEL; CIMBALA, 2007)	39
Figura 13 – Representação de uma área de escoamento.	42
Figura 14 – Mapa proposto proposto por Mandhane (MANDHANE; GREGORY; AZIZ, 1974)	46
Figura 15 – Esquemático do Modelo de Fases Separadas (SHOHAM, 2006)	49
Figura 16 – Modelo de Volume de Controle Horizontal	50
Figura 17 – Volume de Controle	53
Figura 18 – Esquemático da Bancada de Escoamento Bifásico. (OLIVEIRA, 2020)	59
Figura 19 – Dados Técnicos do Compressor. (CHIAPERINI, 2020)	60
Figura 20 – Dados Técnicos do Filtro de Ar. (ARPREX, 2019)	61
Figura 21 – Componentes do Sistema de Gás	61
Figura 22 – Moto Bomba e Caixa Elétrica	62
Figura 23 – Entrada de Água e Ar na linha de Escoamento	62
Figura 24 – Desenho do Suporte da Tubulação. (OLIVEIRA, 2020)	63
Figura 25 – Cantoneiras na Linha de Escoamento	63
Figura 26 – Suporte de Ferro para o Perfil de Alumínio	64
Figura 27 – Desenho Técnico da Conexão de Nylon	64

Figura 28 – Bicos Injetores instalados na Conexão de Nylon . . . . .	65
Figura 29 – Conector entre o Tanque e tubulação . . . . .	65
Figura 30 – Medidor Tipo Turbina em Funcionamento . . . . .	66
Figura 31 – Visão Geral da Bancada Experimental . . . . .	66
Figura 32 – Representação de um Medidor de Vazão do Tipo Turbina (FOX et al., 2018) . . . . .	67
Figura 33 – Medidor Rucken e Fonte de Alimentação . . . . .	68
Figura 34 – Dados Técnicos do Medidor de Vazão Tipo Turbina. (RUCKEN, 2019)	68
Figura 35 – Representação do Manômetro em U na Linha de Escoamento . . . . .	69
Figura 36 – Manômetro em U utilizado . . . . .	70
Figura 37 – Reprodução do Mapa . . . . .	71
Figura 38 – Dados de Vazão Coletados no Mapa . . . . .	75
Figura 39 – Perfil de Bolhas Alongadas . . . . .	76
Figura 40 – Perfil de Bolhas Dispersas . . . . .	77
Figura 41 – Perfil Intermitente . . . . .	77
Figura 42 – Comparação Entre o Comportamento dos Dados de Pressão . . . . .	79
Figura 43 – Comportamento do <i>Holdup</i> . . . . .	81
Figura 44 – Comportamento da Massa Específica da Mistura . . . . .	81

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Intervalo dos Dados Utilizados . . . . .	44
Tabela 2 – Coordenadas Para Os Limites De Transição . . . . .	47
Tabela 3 – Termos do Teorema de Transporte de Reynolds . . . . .	50
Tabela 4 – Dados Característicos de Desempenho da Moto Bomba . . . . .	62
Tabela 5 – Dados Técnicos do Medidor de Vazão Tipo Turbina. . . . .	68
Tabela 6 – Propriedades dos Fluidos . . . . .	79
Tabela 7 – Dados de Pressão Diferencial Teórico e Experimental . . . . .	79
Tabela 8 – Resultados Modelo Homogêneo . . . . .	80
Tabela 9 – Dados de Vazão Coletados . . . . .	89
Tabela 10 – Resultado do Intervalo de Confiança de Dados Coletados . . . . .	93
Tabela 11 – Precisão dos Instrumentos de Medição Segundo os Fabricantes . . . . .	96
Tabela 12 – Incertezas Calculadas durante o experimento . . . . .	96





# Lista de abreviaturas e siglas

PLEM	<i>PipeLine And Manifold</i>
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
BOP	<i>Blowout Preventer</i>
PIG	<i>Pipeline Inspection Gauge</i>
RGO	<i>Razão Gás Óleo</i>



# Lista de símbolos

$\sigma_S$	Tensão Superficial
$\rho_m$	Massa Específica da Mistura
$\rho_L$	Massa Específica do Líquido
$\rho_G$	Massa Específica do Gás
$\mu$	Viscosidade da mistura
$\mu_L$	Viscosidade do Líquido
$\mu_G$	Viscosidade do Gás
$\lambda_m$	Fracão Volumétrica da Mistura
$\lambda_G$	Fracão Volumétrica da Fase Gasosa
$\lambda_L$	Fracão Volumétrica da Fase Líquida
$W$	Vazão Mássica da Mistura
$W_G$	Vazão Mássica do Gás
$W_L$	Vazão Mássica do Líquido
$Q_{Mi}$	Vazão Volumétrica da Mistura
$Q_L$	Vazão Volumétrica do Líquido
$Q_G$	Vazão Volumétrica do Gás
$U$	Velocidade Superficial
$U_{SG}$	Velocidade Superficial do Gás
$U_{SL}$	Velocidade Superficial do Líquido
$V_k$	Velocidade Real
$V_L$	Velocidade Real do Líquido
$V_G$	Velocidade Real do Gás
$G$	Fluxo Mássico

$H_i$	<i>Holdup</i>
$\alpha$	Fracão de Vazio
$D$	Diâmetro da Tubulação
$X$	Título
$\theta$	Ângulo de Inclinação da Tubulação
$Re$	Número de Reynolds
$Fr$	Número de Froude
$\lambda$	Primeiro Fator de Correção de Baker
$\psi$	Segundo Fator de Correção de Baker
$V_M$	Velocidade da Mistura
$\alpha_i$	Fator de Comparação de Mandhane
$\beta$	Fator de Comparação de Sucesso de Mandhane
$X'$	Fator de Correção de Propriedades Físicas de Mandhane
$Y'$	Fator de Correção de Propriedades Físicas de Mandhane
$\xi$	Apropriado Fator de Correção de Mandhane
$f_d$	Coefficiente de Darcy
$f_F$	Coefficiente de Fainning
$f$	Fator de Atrito ou de Fricção
$c_m$	Velocidade do Som na Mistura
$Ma$	Número de Mach

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Problema</b>	<b>23</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Gerais</b>	<b>24</b>
1.2.1	Objetivos Específicos	24
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
<b>2.1</b>	<b>Petróleo</b>	<b>27</b>
<b>2.2</b>	<b>Produção e Equipamentos em um Sistema Marítimo</b>	<b>28</b>
<b>2.3</b>	<b>Garantia de Escoamento</b>	<b>31</b>
<b>2.4</b>	<b>Escoamento Multifásico na Indústria Petrolífera</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Fundamentos de Escoamentos Bifásicos</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Tipos de Escoamentos Bifásicos</b>	<b>35</b>
3.2.1	Padrões de Escoamento em Tubos Horizontais	36
3.2.2	Padrões de Escoamento Vertical	37
<b>3.3</b>	<b>Notações de um Escoamento Bifásico</b>	<b>38</b>
<b>3.4</b>	<b>Mapas de Escoamento</b>	<b>43</b>
3.4.1	Modelo Proposto por Mandhane <i>et al.</i> (1974)	44
<b>3.5</b>	<b>Perda de Energia ao Longo do Escoamento</b>	<b>48</b>
3.5.1	Modelo Homogêneo	49
3.5.1.1	Balço de Massa	51
3.5.1.2	Cálculo da Massa Específica da Mistura	51
3.5.1.3	Balço da Quantidade de Movimento	52
3.5.1.4	Componente Friccional	54
3.5.1.5	Componente Gravitacional	55
3.5.1.6	Componente Aceleracional	55
3.5.1.7	Modelagem Final	56
<b>4</b>	<b>A BANCADA EXPERIMENTAL</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Equipamentos</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Montagem da Bancada</b>	<b>63</b>
<b>4.3</b>	<b>Medidor de Vazão Tipo Turbina</b>	<b>67</b>
<b>4.4</b>	<b>Manômetro de Tubo em U</b>	<b>68</b>

5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL . . . . .	71
5.1	Metodologia de Ensaio . . . . .	72
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	75
6.1	Padrões de Escoamento . . . . .	76
6.2	Gradiente de Pressão - Modelo Homogêneo . . . . .	78
7	CONCLUSÃO . . . . .	83
7.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros . . . . .	84
	REFERÊNCIAS . . . . .	85
	APÊNDICE A – DADOS COLETADOS . . . . .	89
	APÊNDICE B – CÓDIGO DO MAPA DE MANDHANE . . . . .	91
	APÊNDICE C – ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS . . . . .	93
C.1	Análise de Incerteza para a Velocidade Superficial . . . . .	95
C.2	Análise de Incerteza Para o dP Experimental . . . . .	95
C.3	Precisão dos Instrumentos de Medição . . . . .	96
C.4	Incetezas Experimentais . . . . .	96
	APÊNDICE D – CÓDIGO MODELO HOMOGENEO . . . . .	97

# 1 Introdução

O escoamento bifásico horizontal gás-líquido é frequentemente encontrado em aplicações práticas, como reatores nucleares, oleodutos e gasodutos, na geração de vapor e equipamentos de refrigeração (SAMPAIO; FACCINI; SU, 2008).

Em especial, na indústria do petróleo, o escoamento multifásico ocorre durante a fase de produção, nas linhas de escoamento, que são responsáveis por transitar os fluidos extraídos dos poros do reservatório até a cabeça do poço. Nesse caminho, observa-se que em alguma dada seção, inicia-se a liberação de gás, o que transforma o fluxo de monofásico para bifásico (ANDREOLLI, 2016).

O sistema de produção de um poço é bastante complexo, e necessita de uma série de componentes, que no geral, representam o maior custo dentre os equipamentos de subsuperfície. Dentre eles, os mais relevantes para o escoamento são as *Flowlines*, *Pipeline And Manifold* (PLEM) e a *Árvore de Natal*. Na Figura 1, tem se um esquemático que representa a disposição típica de um sistema de produção *offshore*, constituído por uma plataforma, que pode ser fixa ou não, gasodutos que possibilitem o escoamento do óleo produzido e as linhas de ancoragem. Além disso, o uso de boias ou flutuadores pode ser feito para aliviar o excesso de tração no topo da tubulação e impor uma determinada configuração requerida na linha de produção.

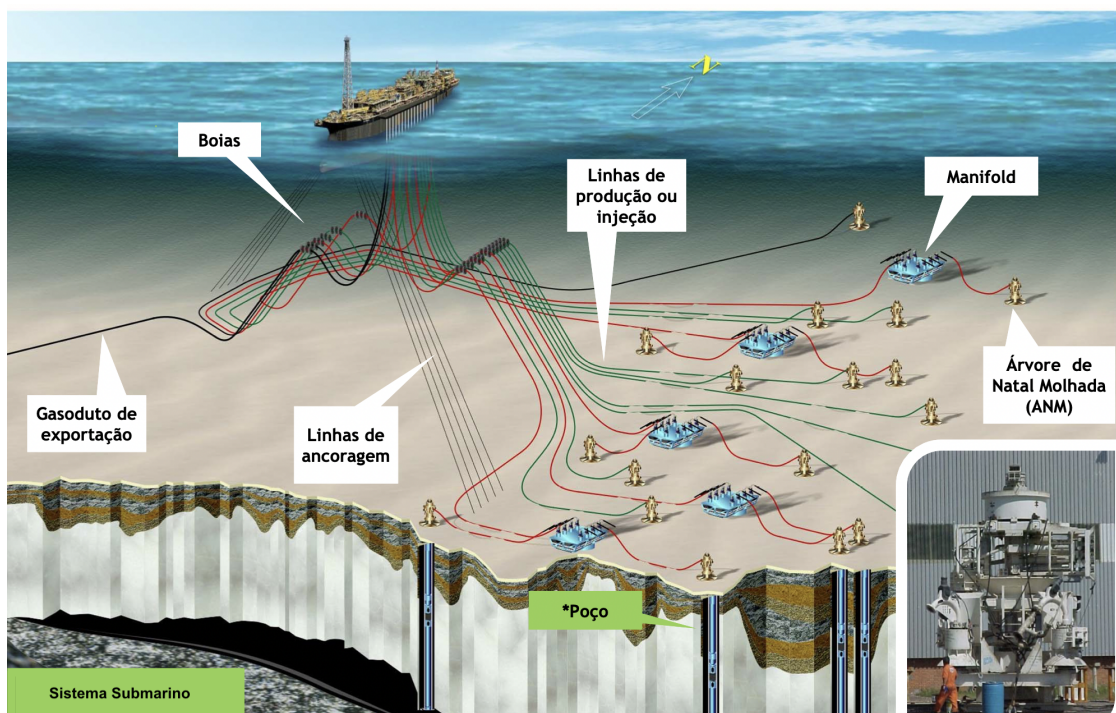


Figura 1 – Representação Gráfica de um Sistema Submarino (PETROBRAS, 2018)

A Árvore de Natal, que pode ser Convencional ou Molhada, tem como finalidade, permitir de forma controlada, o fluxo de óleo no poço, e geralmente são equipadas com válvulas tipo gavetas, linhas de fluxo e um sistema de controle (THOMAS, 2004). Já o *Manifold* (PLEM), é composto de trechos de tubulações, conjuntos de válvulas e subsistemas eletrônicos, e possui como função, coletar os fluidos produzidos em diferentes poços, direcionando o fluxo para uma ou poucas linhas de produção. Outra função do PLEM, é servir de equipamento no Sistema de Elevação Artificial, injetando água ou gás (ANDREOLLI, 2016). Já a linha de produção, esta é destinada a escoar o fluxo multifásico da Árvore de Natal, até a plataforma.

Como dito acima, os equipamentos de produção representam um grande custo de projeto. Ao mesmo tempo, é durante a fase produtiva do poço que o fluxo torna-se dependente de uma série de parâmetros sensíveis: as fases viajarão em velocidades distintas, consequência das suas diferentes propriedades, os modelos tornam-se complexos por conta do uso de equações empíricas para integração das fases, além de existir a possibilidade de transferência de massa.

Sendo assim, cabe aos Engenheiros de Produção, modelar a elevação e o fluxo de fluidos, fora do meio poroso, de forma a assegurar a garantia do escoamento e maximizar as taxas de produção. Para tal, pode ser feito o uso de modelos físicos, equações empíricas e ensaios em laboratório que podem ser de grande utilidade para avaliar o comportamento das fases em termos de escoamento relativo (ANDREOLLI, 2016).

Ao longo da literatura sobre o tema, diversos autores geraram modelos e equações que visam o estudo do comportamento de um escoamento multifásico em tubulações horizontais e verticais. Em 1952, Baker apresentou um mapa para predição do padrão de escoamento para um fluxo vertical, com a maioria dos seus dados pertencentes a um sistema ar-água. Em seus eixos, o autor faz uma correlação entre os valores de vazão mássica do gás e do líquido e cria parâmetros de correção de propriedades dos fluidos.

Em 1959, Hoogerdoorn iniciou sua análise selecionando escoamentos de ar-água e ar-óleo em tubos horizontais e usou variáveis como velocidade da mistura e fração volumétrica do gás. Como resultado, foi possível prever padrões de fluxo com precisão razoável. Entretanto, o sistema de coordenadas usado pelo autor resultou em uma aglomeração de importantes perfis em uma área pequena do mapa.

Uma revisão e comparação de vários métodos para correlações de queda de pressão é feita por Govier e Omer (1962). Em seu trabalho, os autores usam um sistema horizontal ar-água e variáveis como Fator de Fricção. As suas escolhas para coordenadas de mapa foram a velocidade mássica do gás e líquido.

Na sequência, Scott (1964) investiga em seu trabalho, um certo número de padrões de escoamento, usando um sistema com apenas um componente, mas duas fases: água



líquida e água vaporizada. O autor modifica o diagrama de Baker (1952) e adiciona dados de Hoogerdoorn (1959) e Govier e Omer (1962). No fim, o mapa gerado não possui um limite de transição claro, apresentando apenas áreas com regiões de transição.

Em seguida, Govier e Aziz (1972) descreve um simples mecanismo baseado no cálculo do gradiente de pressão em tubulações com gás-óleo e compara seu esquema com dados independentes. O trabalho faz uma revisão de Govier e Omer (1962), e adiciona dados de Baker (1952), Govier e Omer (1962), Hoogerdoorn (1959) e outros. Como resultado o mapa de escoamento possui como coordenada, a velocidade superficial do líquido e do gás.

No ano seguinte, Beggs e Brill (1973) publicam um artigo a respeito do escoamento bifásico em tubulações inclinadas, com o intuito de determinar a medida de elevação do ângulo de inclinação da tubulação no cálculo do *Holdup* e da perda de carga. Para tal, correlações para o *Holdup* e o Fator de Fricção são feitas, de modo a predizer o gradiente de pressão em todos os ângulos até 90° e em diversas condições.

Em 1983, a correlação de Mukherjee e Brill foi publicada e possui como base um estudo da queda de pressão em um escoamento bifásico em uma tubulação inclinada. Para tal, o comportamento do *Holdup* e do escoamento foi estudado por meio de dois conjuntos de equações empíricas. Os resultados apresentam conformidade com os dados experimentais e as correlações utilizadas no trabalho foram testadas com dados disponíveis da Baía de Prudhoe, no Alasca, e do Mar do Norte.

Em 1974, Mandhane realizou um estudo de escoamento multifásico horizontal, com o auxílio de um extenso banco de dados, provenientes dos trabalhos de Baker (1952), Hoogerdoorn (1959) e Govier e Aziz (1972). Gerando no final um mapa com coordenadas de velocidade superficial do líquido e do gás, em escala log-log. O mapa auxilia na predição do padrão de escoamento para uma dada geometria, possuindo grande relevância atual e será utilizado neste trabalho.

## 1.1 Problema

Sabendo da importância no que tange aos parâmetros do escoamento multifásico, com o auxílio de modelos matemáticos e de posse de um laboratório experimental, busca-se validar uma bancada experimental de escoamento bifásico.

Logo, diante do exposto, a pergunta da pesquisa definida neste trabalho é:

*Qual o comportamento observado de um perfil de escoamento bifásico (água/ar), em uma bancada experimental, ao se comparar o modelo experimental e teórico proposto por Mandhane?*

## 1.2 Objetivos Gerais

O presente trabalho visa validar uma bancada experimental bifásica por meio da análise qualitativa do perfil de escoamento. Para tal, serão coletados valores de velocidade superficial do gás e líquido, de forma experimental, e posteriormente produzido um perfil de escoamento interno no tubo horizontal. Em seguida uma comparação ao mapa de padrão de escoamento bifásico horizontal proposto no modelo de Mandahne (1974) será realizado. Além dessa análise, será feito o uso do Modelo Homogêneo para determinação de perda de carga ao longo da linha de escoamento, com o intuito de comparar dados teóricos com os dados experimentais. Por fim, serão sugeridas melhorias e ajustes na bancada experimental do laboratório.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Realizar a coleta dos dados de vazão por meio de Medidores de Vazão Tipo Turbina;
- Reproduzir o modelo proposto por Mandhane para análise do perfil de escoamento;
- Coletar dados de diferencial de pressão por meio de um Manômetro;
- Analisar os dados coletados;
- Realizar um estudo comparativo entre os dados de diferencial de pressão teóricos e experimentais de diferencial de pressão;

## 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho apresenta a seguinte organização: inicialmente, um capítulo de Introdução com uma breve apresentação do tema, motivação, objetivos e pergunta de pesquisa do trabalho.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica a respeito da produção petrolífera *offshore*, sistemas de produção marítimos e garantia de escoamento.

Em seguida, o Referencial Teórico, com exposição de conceitos e definições de parâmetros e variáveis, notações de escoamento bifásico, mapas de perfil de escoamento e modelos de perda de carga, com o intuito de tornar claro o entendimento deste trabalho.

O quarto capítulo dispõe sobre a Bancada Experimental, apresentando os equipamentos, ferramentas e materiais utilizados, seguido de um tópico referente a Montagem da Bancada Experimental.

No quinto capítulo, o procedimento experimental utilizado durante o trabalho é retratado, por meio da Metodologia de Ensaio.

Na sequência, o sexto capítulo apresenta os Resultados e Discussão alcançados durante a produção deste estudo. E por último, a Conclusão, que diz respeito ao resumo dos resultados durante o trabalho e um tópico, com possíveis sugestões para trabalhos futuros.



## 2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo possui como objetivo contextualizar e explorar a temática do escoamento multifásico na indústria petrolífera. Para tal, será inicialmente, feita uma introdução a respeito do petróleo e como ocorre a sua produção desde o reservatório até uma plataforma *offshore*, sendo, portanto, sistemas marítimos de petróleo o enfoque deste trabalho. Em seguida, tem-se uma exposição a respeito do tema Garantia de Escoamento, citando possíveis problemas operacionais. Por fim, o capítulo encerra-se com um tópico a respeito das características de um escoamento petrolífero.

### 2.1 Petróleo

Compreendemos por petróleo, uma mistura de compostos químicos orgânicos (hidrocarbonetos) que na forma líquida é uma substância oleosa, de odor característico, inflamável, com densidade menor que a da água e cor variando entre negro e castanho claro, a depender dos seus constituintes e formação geológica (THOMAS, 2004).

O uso do petróleo remonta a tempos antigos. Os egípcios o usavam para a pavimentação de estradas e no embalsamento de mortos, os índios colombianos decoravam e impermeabilizavam cerâmicas. Entretanto, nessa época o óleo era retirado de exsudações naturais encontradas na crosta terrestre. Tal panorama mudou em 1859, nos Estados Unidos, quando o primeiro poço foi perfurado com 21m de profundidade e vazão produtiva de  $2m^3/h$ . O fato marcou o início de uma nova Era do Petróleo.

Assim, ao longo do tempo, o petróleo foi se impondo como fonte de energia majoritária. Isso se deve principalmente, ao aumento do consumo de combustíveis a partir do ano de 1950, época na qual, surge um novo quadro geopolítico e econômico mundial, definido pela Guerra Fria. Porém, de forma concomitante, é na década de 50 que a atividade exploratória do petróleo começa a se intensificar, por meio de incursões no mar e o surgimento de novas técnicas exploratórias.

Apesar das reservas mundiais de petróleo estarem localizadas tanto em terra como no mar, a parte majoritária das acumulações encontra-se na plataforma oceânica (ANDREOLLI, 2016). Isso porque, com o passar do tempo, ocorreu a depleção das reservas localizadas em terra (*onshore*), o que resultou no crescimento das atividades exploratórias e produtivas de reservatórios em águas profundas.

Um caso importante no Brasil dessa movimentação são as descobertas no Pré-Sal pela Petrobras. Na figura 2, um exemplo da evolução de poços *offshore* na Bacia de Campos, no início da década de 70 até o ano de 2014.

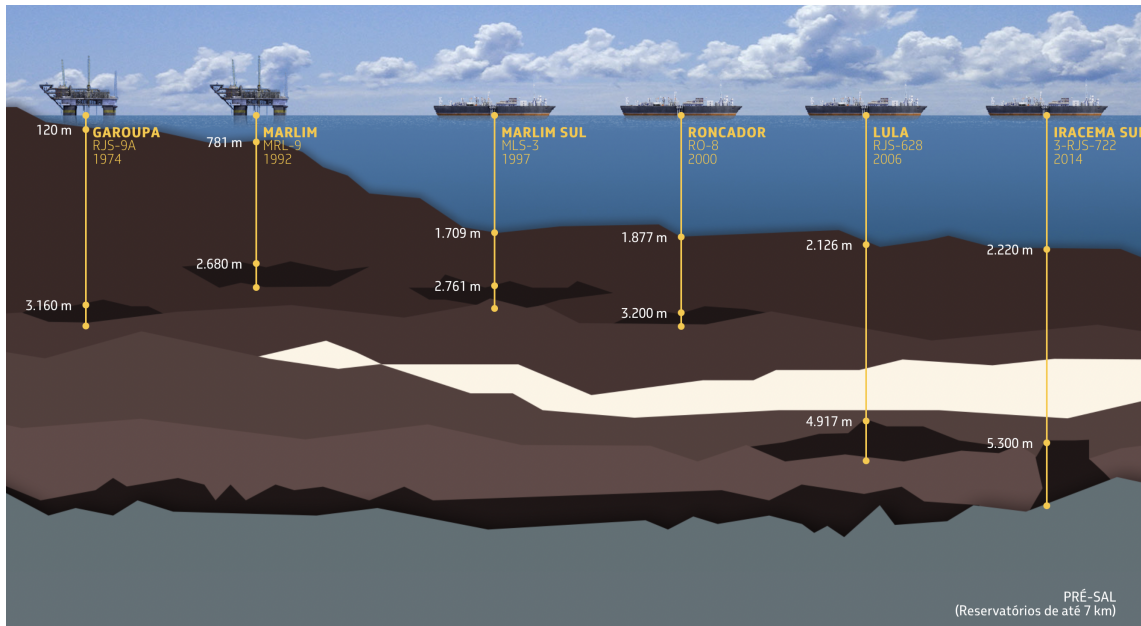


Figura 2 – Panorama Evolutivo de Poços *Offshore* na Bacia de Campos. Fonte: (PETROBRAS, 2018)

Entretanto, quando se fala de exploração de reservas em locais de alta profundidade *offshore*, cresce a quantidade de desafios encontrados: alta demanda por tecnologia e *know-how*, além disso o óleo deve ser extraído de forma rápida, minimizando imprevistos e com o menor custo de produção possível.

A tecnologia submarina usada na produção *offshore* de petróleo e gás é um campo com alta especialização e com demandas específicas no que tange a Engenharia. O sistema de produção submarino exige aspectos específicos em função da inacessibilidade da instalação da plataforma, operação e manutenção. Tais aspectos refletem na engenharia do processo e nos equipamentos utilizados (BAI; BAI, 2016).

## 2.2 Produção e Equipamentos em um Sistema Marítimo

O objetivo ao se produzir de um poço marinho é maximizar a produção com o menor custo, sempre garantindo a segurança e optando pela solução mais confiável, segura e com melhor custo benefício (BAI; BAI, 2016). Portanto, cada poço apresentará uma configuração submarina diferente, de modo a adequar os requisitos do projeto as necessidades do poço.

Nessa lógica, vão existir diferentes tipos de arranjos submarinos. Para sua escolha, é preciso levar em conta alguns parâmetros, como: tamanho da lâmina d'água, completação seca ou molhada, as unidades químicas e hidráulicas, o processamento submarino, métodos de elevação artificial empregados e a configuração das instalações.

A começar pelas plataformas submarinas em águas profundas, estas podem ser flutuantes do tipo semissubmersíveis ou do tipo navio-sonda. Ambas encontram-se, respectivamente, na Figura 3. Plataformas flutuantes sofrem movimentações devido a ação dos ventos e ondas e portanto, necessitam de um mecanismo de posicionamento, de modo a garantir que estas fiquem dentro de um perímetro de segurança para a tubulação e possíveis manobras. Assim, dois tipos de sistemas são responsáveis pelo posicionamento da plataforma: sistema de ancoragem ou de posicionamento dinâmico (THOMAS, 2004).



Figura 3 – Plataforma Semissubmersível e Navio-Sonda. Fonte: (THOMAS, 2004)

No sistema de posicionamento dinâmico não existe uma ligação física entre a plataforma e o fundo do mar, assim, o posicionamento é feito por meio de sensores e propulsores. Já o sistema de ancoragem é constituído por 8 a 12 cabos que atuam como molas, com a função de atenuar esforços e manter a posição da plataforma (THOMAS, 2004).

Outro aspecto que tange as plataformas *offshore* de grandes profundidades, é o Sistema de Cabeça de Poço Submarino. No caso das sondas flutuantes, a perfuração e produção é feita com o BOP (*Blowout Preventer*) posicionado no fundo do leito marinho, que nesse caso, ajudará a absorver as cargas provenientes da ancoragem de revestimentos e de produção.

Entre os equipamentos submarinos, um de maior importância é a Árvore de Natal Molhada (ANM). Em sistemas submarinos, ela encontra-se posicionada no leito marinho, fixada sobre a Cabeça do Poço e faz conexão com a coluna de produção. É composta basicamente, por válvulas, sistemas elétricos e trechos de linha de fluxo. Para a Garantia de Escoamento a ANM fornece parâmetros importantes, como pressão do poço, temperatura e volume de areia produzida. Além disso, a ANM controla a vazão de fluidos produzidos e auxilia no processo de injeção de gás natural e água no reservatório.

No geral, em um poço satélite que a faz a interligação com a ANM diretamente para a plataforma, o padrão de tubulação é feita por meio de três linhas, uma de produção, uma de serviço e outra de controle. Na Figura 4, tem-se um esquemático simples das três

linhas interligando a ANM com a plataforma.

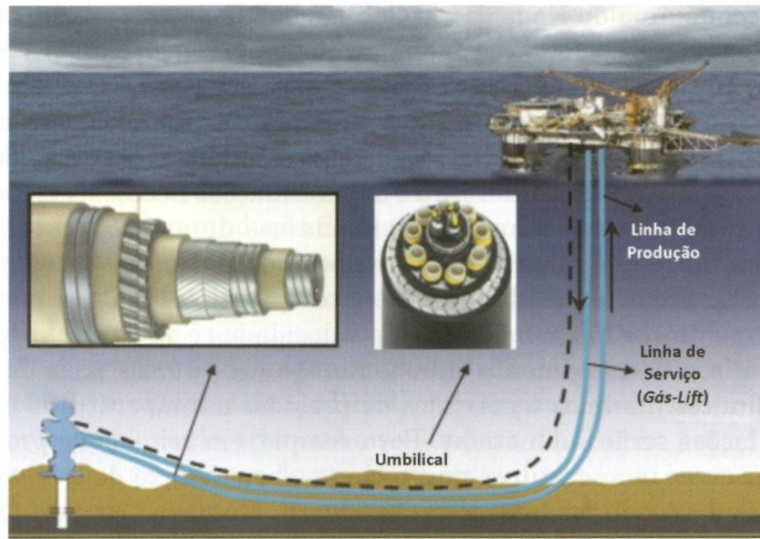


Figura 4 – Poço Satélite com três linhas de interligação. Fonte: (ANDREOLLI, 2016)

A linha de produção que encontra-se a direita em azul na Figura 4, tem como função escoar o fluxo multifásico da ANM até a plataforma. No geral, costuma-se utilizar linhas flexíveis com isolamento térmico. Em alguns casos, quando o óleo produzido apresenta alta viscosidade ou as temperaturas de escoamento são muito baixas, é viável fazer o uso de tubulações com aquecimento elétrico ou com circulação de fluido aquecido (ANDREOLLI, 2016).

Já as Linhas de Serviço tem configuração mais simples e possibilitam a comunicação entre a plataforma e a linha de produção, em forma de *loop*, e a injeção de *gas lift* no espaço anular. A primeira possibilidade refere-se a limpeza da linha de produção com o intuito de garantir o escoamento e para tal, pode ser feito a substituição do fluido do poço por gás tratado. Outra possibilidade é utilizar o *loop* para passagem de *Pipeline Inspection Gauge* (PIG).

Por último, tem-se o *Manifold*, que simplifica o sistema submarino, minimizando a quantidade de *risers* e dutos submarinos. É composto por um conjunto de válvulas e tubos, que são projetados para coletar, direcionar e controlar o fluxo de fluidos produzidos. Os *Manifolds* ficam posicionados no leito marinho e podem variar de simples estruturas a PLEM's que realizam uma espécie de processamento submarino, sendo que o tamanho do equipamento é uma função da quantidade de poços integrados ao sistema e da vazão de fluidos (BAI; BAI, 2016).

O *Manifold*, representado na Figura 5, apresenta como vantagem a economia de linhas e um menor peso a ser sustentado pela plataforma, fato de grande relevância em sistemas flutuantes de produção. Entretanto, como desvantagem tem-se o dilema de todos os poços estarem submetidos a mesma pressão do *manifold* e com vazões menores que



aquelas apresentadas em sistemas de poços satélites. Além disso, caso um dos poços tenha pressão menor que os outros, este poço terá produção comprometida em função da contrapressão realizada pelos demais (ANDREOLLI, 2016).



Figura 5 – *Manifold* Marinho. Fonte: (PETROBRAS, 2018)

## 2.3 Garantia de Escoamento

Entender a Engenharia Submarina e os equipamentos utilizados é de grande importância para o engenheiro de elevação e escoamento. Isso porque, o fluido produzido escoará por equipamentos e tubulações escolhidos pelos engenheiros submarinos, que fornecem dados importantes para os Estudos de Escoamento. Na mesma lógica, a Engenharia Submarina necessitará de informações importantes de Escoamento para a especificação de equipamentos (ANDREOLLI, 2016).

O termo Garantia de Escoamento foi usado pela primeira vez pela Petrobras, no início dos anos 90. Este refere-se ao processo de análise de engenharia usado para assegurar que os fluidos produzidos sejam transportados de forma econômica, segura e interrupta. No estudo, é de suma importância o conhecimento sobre as propriedades dos fluidos e análises termo-hidráulicas afim de controlar processos térmicos, como o efeito Joule-Thomson, que consiste em uma depressurização severa das linhas de produção, acarretando em temperaturas abaixo de 0 °C, além de desenvolver estratégias que impeçam a formação de hidratos, parafinas e incrustações no sistema. Na Figura 6, um exemplo de uma tubulação com a formação de hidrato sendo retirado após uma intervenção para limpeza.



Figura 6 – Pluge de hidrato no receptor de FIG. (Banco de Imagem da Petrobras) Fonte: (ANDREOLLI, 2016)

Assim, a Garantia de Escoamento é um processo de análise de engenharia para o desenvolvimento de um projeto de um poço, com o intuito de minimizar a deposição de sólidos e intercorrências termo-hidráulicas. Atualmente, existe certas questões padronizadas do processo de garantia de escoamento. São elas: caracterização dos fluidos e do fluxo, desempenho hidráulico e térmico em regime permanente e em regime transiente e por fim, um projeto do sistema que conste soluções de garantia de escoamento (BAI; BAI, 2016).

Atualmente, a Garantia de Escoamento, é um tema desafiador principalmente para sistemas submarinos, que possuem um comprimento de longa distância em águas profundas. Isso porque as condições do processo envolvem uma combinação de temperaturas baixas, alta pressão hidrostática e razões de economia. Além disso, a solução para cada problema de Garantia de Escoamento é uma função do tipo de fluxo e do sistema.

Portanto, o Escoamento Multifásico na indústria petrolífera representa uma variável importante na Garantia de Escoamento, pois seu elevado nível de complexidade, exigirá um elevado nível de análise de projeto.

## 2.4 Escoamento Multifásico na Indústria Petrolífera

A modelagem do escoamento de petróleo é no geral dada como multifásica. Isso porque o fluido proveniente do reservatório é composto por hidrocarbonetos, podendo ter água, emulsão, sedimentos e gás, formado ao longo da linha de produção (ANDREOLLI, 2016). Entretanto, na modelagem do escoamento multifásico não é dada importância aos sedimentos, que geralmente são considerados na Engenharia Submarina. Também, não é comum adotar a água como uma fase separada do óleo, o que implica, nesse caso, na água possuindo o mesmo valor de velocidade do óleo.

Em função desta modelagem, neste trabalho, será tratado basicamente o escoamento

mento bifásico, que possui comportamento bastante complexo e com a interação de muitas variáveis. As fases líquidas e gasosas normalmente não escoam com a mesma velocidade na tubulação por causa da diferença de massa específica e viscosidade. Por exemplo, em um escoamento ascendente o gás viajará com velocidade maior que a do líquido, uma vez que sua massa específica e viscosidade são menores. Assim como, em um escoamento descendente, o líquido tende a escoar em uma velocidade maior que o gás devido a sua maior massa específica e ação gravitacional.

Existem diversas correlações que permitem modelar o escoamento multifásico, algumas delas são costumeiramente usadas na indústria, como a de Beggs and Brill (1973), a de Mukherjee and Brill (1983) e Govier and Aziz (1972). Na prática, tais correlações são utilizadas em conjunto, limitando-se a um número pequeno de correlações: uma para tubo vertical e outra para tubos horizontais, uma vez que utilizar muitas correlações em um único sistema pode criar um modelo tipo "caixa-preta", com pouca base física ((ANDREOLLI, 2016)). Além disso, existem simuladores de fluxo utilizados durante a fase de projeto e produção, que permitem o ajuste de fatores como o gradiente de pressão e temperatura. Tais simuladores necessitam como entrada a caracterização dos fluidos e suas propriedades.

Assim, um parâmetro importante para a caracterização dos Escoamento Multifásico é a viscosidade e massa específica. Na indústria petrolífera é comum classificar um óleo pelo seu grau API de densidade, uma alternativa para representação da densidade numa faixa ampliada de valores (QUELHAS et al., 2014). Outra variável utilizada é a Razão Gás Óleo (RGO) que representa a relação entre a vazão do gás e a vazão do óleo, medidas na superfície. De forma geral, o RGO funciona como uma forma de indicar se o fluxo possui gás na mistura líquida e o quão elevada é esta fração, além de ser um possível parâmetro de depleção do reservatório (THOMAS, 2004).

Tendo em vista a quantidade de variáveis que podem ser exploradas no escoamento multifásico, é possível perceber a complexidade desse tipo escoamento e a necessidade de estudos em laboratório e do uso de equações empíricas para cálculo do fator de fricção e da velocidade relativas das fases. Neste trabalho, será feito o uso do Modelo Homogêneo para determinação de perda de carga, com o intuito de comparar dados teóricos com os dados experimentais, coletados por meio de ensaios em laboratório.



## 3 Fundamentação Teórica

### 3.1 Fundamentos de escoamentos Bifásicos

Quando duas ou mais fases escoam ao mesmo tempo em uma tubulação, o comportamento do escoamento torna-se mais complexo do que um escoamento monofásico. De acordo com Rosa (2012), fase é uma região delimitada no espaço, por uma barreira infinitesimal, na qual as propriedades dentro do seu volume serão homogêneas, com propriedades de transporte e estado definíveis. Brill e Mukherjee (1987) afirma que as fases no escoamento multifásico apresentarão massa específica e viscosidade diferentes, e possuem a tendência de se separar, surgindo tensões na superfície no líquido.

Portanto, o escoamento multifásico ocorre basicamente, quando mais de uma fase está escoando ao mesmo tempo. Sendo que, em um sistema multifásico, a quantidade de fases pode ser diferente da quantidade de componentes. O escoamento da água em ebulição apresentará duas fases, líquido-gás, mas apenas um componente (ROSA, 2012).

No geral, quando existe duas fases escoando em uma mesma tubulação, o gás escoará mais rápido que o líquido (BAKER, 1952). Observamos as variações da velocidade das fases através dos diferentes padrões de escoamento e diferentes distribuições das interfaces, sendo que a velocidade possui papel relevante no fenômeno observado.

### 3.2 Tipos de escoamentos Bifásicos

Padrões ou tipos de escoamento são uma forma prática de indicar qualitativamente as características observadas em diferentes distribuições interfaciais, associando um conjunto de característica a um nome. Portanto, os padrões de escoamentos podem ser considerados descritores linguísticos de uma interface observada (ROSA, 2012).

Já de acordo com Andreolli (2016), o termo padrão de escoamento faz referência a distribuição das fases em um escoamento multifásico, e depende de vários fatores, como:

- Razão do gás líquido e velocidade das fases;
- A inclinação da tubulação, diâmetro e rugosidade;
- Viscosidade dos fluidos, massa específica e tensão superficial entre as fases;
- Pressão e Temperatura do escoamento;

Os padrões de escoamento são divididos em horizontais e verticais, com suas subcategorias.

### 3.2.1 Padrões de Escoamento em Tubos Horizontais

Os padrões de escoamento em tubos horizontais são divididos em: padrão estratificado (liso e ondulado), padrão de escoamento intermitente (golfadas e bolhas alongadas), padrão anular (anular e anular ondulado) e por fim, padrão de escoamento de bolhas dispersas (ANDREOLLI, 2016).

Como podemos ver na Figura 7, o padrão estratificado terá o líquido e o gás separados pela ação gravitacional. Como o líquido possui massa específica maior, este viajará na parte inferior do tubo, ao passo que o gás ficará na parte superior. Esse padrão ocorre quando há baixas vazões de gás e líquido e pode ser subdividido em estratificado liso e estratificado ondulado, no qual a velocidade do gás é maior que a do líquido, o que provoca ondulações na superfície.

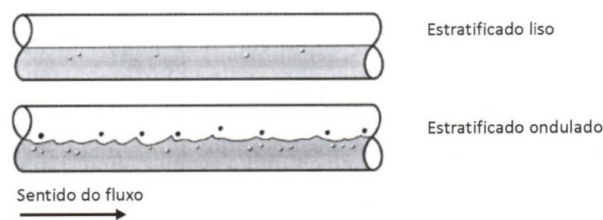


Figura 7 – Padrão Estratificado. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 *apud* ANDREOLLI, (2016))

O padrão intermitente possui como característica principal a alternância entre vazões de gás e líquido. Apresentando, ora pistões de líquido que ocupam grande parte da tubulação, ora bolhas de gás que possuem camadas de líquido estratificado. O padrão intermitente pode ser de bolhas alongadas, com baixas vazões de gás e o pistão do líquido não apresentará bolhas. Já no padrão golfada, as vazões de gás são altas o que deixa a fase líquida aerada por pequenas bolhas de ar, que se encontram dispersas na parte superior da tubulação.

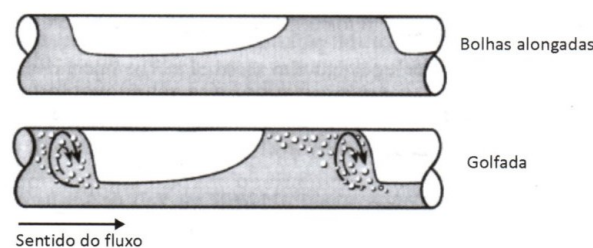


Figura 8 – Padrão Golfada. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 *apud* ANDREOLLI, (2016))

Outro padrão possível, é o padrão anular no qual o gás viaja no centro da tubulação a altíssimas vazões. O líquido por sua vez forma um filme entorno da parede da tubulação. Caso a interface seja ondulada, haverá altas tensões de cisalhamento e padrão será do tipo anular ondulado.

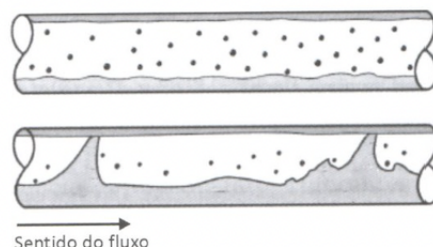


Figura 9 – Padrão Anular. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 *apud* ANDREOLLI, (2016))

Por fim, caso ocorra altas vazões do líquido, tem-se o padrão de bolhas dispersas. A fase continua será o líquido e o gás se encontrará disperso em forma de pequenas bolhas e não haverá escorregamento. Portanto, consideramos esse escoamento como homogêneo.

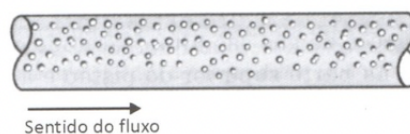


Figura 10 – Padrão Bolhas Dispersas. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 *apud* ANDREOLLI, (2016))

### 3.2.2 Padrões de Escoamento Vertical

A título de comparação, os padrões de escoamento para tubos verticais serão apresentados. Estes são divididos em padrão de bolhas, golfada, caótico, anular e bolhas dispersas. A Figura 11 representa os padrões de escoamento.

O primeiro padrão, a esquerda, é chamado de padrão bolhas, no qual a fase gasosa encontra-se dispersa no meio contínuo, o líquido, e possui movimentação ascendente, em forma de zigue-zague, com distribuição homogênea. No geral, esse padrão ocorre em baixas vazões de líquido, com baixo nível de turbulência e escorregamento entre as fases.

O padrão de golfada produz grandes bolhas de ar que viajam a velocidade superior a do líquido, chamadas de bolhas de Taylor, que ocupam grande parte da tubulação, com apenas um filme de líquido no escoamento. Podem surgir áreas com bolhas aeradas entre as bolhas de Taylor.

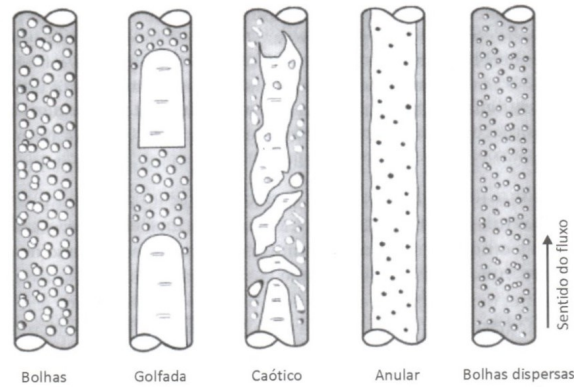


Figura 11 – Padrão de Escoamento Vertical. Fonte: (Adaptado SHOHAM, 2005 *apud* ANDREOLLI, (2016))

Quando a fase líquida encontra-se caracterizada por um padrão oscilatório com altas vazões de gás, tem-se o padrão caótico, com perfil muito semelhante ao de golfadas, porém mais turbulento.

O padrão anular possui o mesmo comportamento que o padrão anular horizontal, com altas vazões de gás. Entretanto, o filme da fase líquida possui espessura igual ao redor da tubulação.

O padrão de bolhas dispersas vertical, é semelhante ao padrão de bolhas dispersas horizontal, com altas vazões de líquido, sendo este a fase contínua com pequenas bolhas da fase gasosa. A desconsideração do escorregamento entre as fases pode ser feita nesse caso.

### 3.3 Notações de um Escoamento Bifásico

Para análise do escoamento bifásico é necessário o conhecimento de alguns parâmetros matemáticos.

#### Massa específica do gás ( $\rho_G$ )

A massa específica do gás é uma propriedade intensiva, dada pela divisão entre a massa do gás ( $m_G$ ) e o seu volume ( $V_G$ ). A seguir, a fórmula para o seu cálculo, em  $\text{kg}/\text{m}^3$ :

$$\rho_G = \frac{m_G}{V_G} \quad (3.1)$$

#### Massa específica do líquido ( $\rho_L$ )

Assim, como a massa específica do gás, a massa específica do líquido é uma propriedade intensiva, dada pela divisão entre massa do líquido ( $m_L$ ) e seu volume ( $V_L$ ), na unidade  $\text{kg}/\text{m}^3$  no SI:



$$\rho_L = \frac{m_L}{V_L} \quad (3.2)$$

### Tensão Superficial ( $\sigma_s$ )

A tensão superficial é dada por uma força atrativa ( $F_s$ ) por unidade de comprimento (d). Tal força, ocorre devido a atração entre as moléculas de um fluido e possui orientação paralela a superfície (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). De forma geral, a tensão é dada pela equação abaixo e possui unidade em N/m no SI.

$$\sigma_s = \frac{F_s}{d} \quad (3.3)$$

### Viscosidade ( $\mu$ )

Propriedade do fluido que se refere a resistência interna do líquido ao movimento, ou fluidez (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Para se obter uma relação para viscosidade, considera-se um fluido entre duas placas, em repouso, separadas por uma distância  $l$ , como representado na Figura 12. Caso uma força  $F$  constante e paralela, comece a agir na placa superior, observa-se após alguns instantes que a placa se moverá com uma velocidade constante  $V$ .

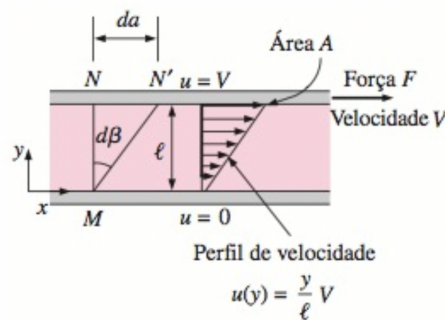


Figura 12 – Comportamento de um fluido entre placas.(ÇENGEL; CIMBALA, 2007)

Já a camada de fluido próxima a placa inferior, apresentará velocidade igual a da placa inferior, que é zero, respeitando a condição de não escorregamento. Além disso, a tensão de cisalhamento no filme inferior será zero.

O fluido na parte imediatamente superior da placa se moverá a uma velocidade  $V$  acompanhando o movimento e por consequência, surgirá uma tensão de cisalhamento sobre essa camada fluida, que possui valor igual:

$$\tau_{xy} = \lim_{A_y \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta A_y} = \frac{dF}{dA_y} \quad (3.4)$$

Onde,  $\delta A_y$  representa a área de contato do fluido com a placa e  $\delta F$  a força exercida sobre a placa superior. Durante um intervalo de tempo  $dt$ , as partículas em contato com a reta MN, vão girar em um ângulo  $d\beta$ , ao passo que a placa superior, move-se a uma distância  $da = V \cdot dt$ . Assim, o deslocamento angular ou deformação, será dado por:

$$d\beta = \tan \beta = \frac{da}{l} = \frac{V dt}{l} = \frac{du}{dy} dt \quad (3.5)$$

Rearranjando a equação acima, a taxa de deformação, sob a taxa de tensão de cisalhamento  $\tau$ , será:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (3.6)$$

Assim, podemos concluir que um fluido, ao ser submetido a uma tensão de cisalhamento, apresentará uma deformação. Os fluidos em que a taxa de deformação é proporcional a tensão de cisalhamento, são chamados de fluidos newtonianos (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). No escoamento cisalhante unidimensional com a presença de fluidos newtonianos, a tensão de cisalhamento será dada pela relação linear abaixo, onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica ou coeficiente de viscosidade, com unidade  $kg/m.s$  no SI.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.7)$$

Neste trabalho, será feito o uso de fluidos apenas newtonianos, e sua aplicação será referente aos diferentes valores de viscosidades empregados.

#### **Fração Volumétrica da fase gasosa ( $\lambda_G$ )**

Razão entre a vazão volumétrica de gás ( $Q_G$ ) e a vazão volumétrica da mistura:

$$\lambda_G = \frac{Q_G}{Q_L + Q_G} \quad (3.8)$$

#### **Fração Volumétrica da fase líquida ( $\lambda_L$ )**

Dada pela razão entre a vazão volumétrica do líquido ( $Q_L$ ) e a vazão volumétrica da mistura:

$$\lambda_L = \frac{Q_L}{Q_L + Q_G} \quad (3.9)$$

#### **Vazão Mássica da Mistura ( $W$ )**

É dada pela soma das vazões mássicas de cada componente da mistura, em  $kg/s$  no SI. Já a vazão mássica monofásica pode ser obtida por meio da multiplicação entre a vazão volumétrica monofásica e a sua massa específica:

$$W = W_L + W_G \quad (3.10)$$

$$W_k = Q_k \cdot \rho_k \quad (3.11)$$

### Vazão Volumétrica da Mistura ( $Q_{Mi}$ )

A vazão volumétrica de uma mistura é dada pela soma entre a vazão da fase líquida e da fase de vazio. Já a vazão volumétrica de cada fase pode ser calculada como a razão entre a vazão mássica da fase e sua massa específica.

$$Q_{Mi} = Q_G + Q_L \quad (3.12)$$

$$Q_k = \frac{W_k}{\rho_k} \quad (3.13)$$

### Velocidade Superficial do gás ( $U_{SG}$ )

Velocidade que a fase gasosa teria, caso escoasse sozinha na tubulação, onde  $A_p$  representa a área circular da tubulação:

$$U_{SG} = \frac{Q_G}{A_p} \quad (3.14)$$

### Velocidade Superficial do Líquido ( $U_{SL}$ )

É a velocidade que a fase líquida teria em uma situação na qual, apenas o líquido esteja escoando na tubulação:

$$U_{SL} = \frac{Q_L}{A_p} \quad (3.15)$$

### Velocidade Real ( $V_k$ )

A Velocidade Real ou Velocidade *in situ* possuirá valor diferente da velocidade superficial, pois é calculada por meio da vazão volumétrica de cada fase e a sua respectiva área ocupada. Portanto, a Velocidade *in situ* sempre excederá a velocidade superficial para cada fase.

$$V_k = \frac{Q_k}{A_k} \quad (3.16)$$

Utilizando a Velocidade Real é possível calcular a velocidade superficial da fase com o uso do *Holdup* ou da Fração de Vazio.

$$U_{SL} = H \cdot V_L \quad (3.17)$$

$$U_{SG} = \alpha \cdot V_G \quad (3.18)$$

### Fluxo Mássico ( $G$ )

O fluxo mássico de cada fase pode ser calculado como a razão entre a vazão mássica de uma fase e a área e é dado em  $kg/s.m^2$ .

$$G_k = \frac{W_k}{A} \quad (3.19)$$

Também é possível calcular o fluxo mássico por meio das equações de Velocidade Superficial e Vazão Volumétrica:

$$G_k = U_K \cdot \rho_k \quad (3.20)$$

### Holdup ( $H_i$ ) e Fração de Vazio ( $\alpha$ )

Em um escoamento multifásico, cada fase ocupa uma certa fração de área da tubulação. Na prática, tal comportamento leva ao surgimento de diferentes topologias de escoamentos, citadas no item 2.2 dessa seção.

Entende-se por *Holdup* o fenômeno que tem como consequência, a variação do volume local de um líquido quando analisado um trecho da tubulação (MUKHERJEE; BRILL, 1983). Para o líquido, chamamos de *Holdup* do líquido ( $H_L$ ) e para o gás, o termo utilizado é Fração de Vazios ( $\alpha$ ). Na Figura 13 abaixo, a área total do escoamento é dada por  $A_p = A_G + A_L$ , onde  $A_L$  é a área ocupada pela fase gasosa e  $A_G$  a área ocupada pela fase líquida.

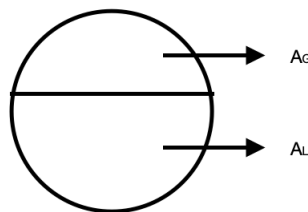


Figura 13 – Representação de uma área de escoamento.

Assim, pela definição acima:

$$H_L = \frac{A_L}{A_p} \quad (3.21)$$

$$\alpha = \frac{A_G}{A_p} \quad (3.22)$$

Na prática a definição do *Holdup* é de suma importância para análise do escoamento multifásico, pois é possível o cálculo da viscosidade, massa específica e entalpia. Entretanto, o seu cálculo não é trivial e no geral, é feito o uso de correlações empíricas e informações de arranjo das fases para o seu cálculo (ANDREOLLI, 2016).

#### **Título ( $X$ )**

É dado pela razão da vazão mássica do gás em relação a vazão mássica da mistura.

$$X = \frac{W_G}{W} \quad (3.23)$$

#### **Número de Reynolds ( $Re$ )**

O número de Reynolds é uma variável adimensional, que é utilizada para caracterizar o regime de um escoamento. Por meio dela, é possível avaliar se as forças viscosas, presentes em um sistema, são ou não desprezíveis em relação as forças de pressão (FOX et al., 2018).

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (3.24)$$

#### **Número de Froude ( $Fr$ )**

Variável adimensional que pode ser representada por meio da relação entre as forças de inércia, representada pela velocidade superficial, e de gravidade. Valores de Froude menores que a unidade indicam escoamento subcrítico, valores maiores que a unidade, indicam escoamento supercrítico (FOX et al., 2018).

$$Fr^2 = \frac{U^2}{g \cdot D} \quad (3.25)$$

## 3.4 Mapas de Escoamento

Mapas de escoamento são ferramentas utilizadas a fim de estimar o padrão do escoamento em função de variáveis ou grupos adimensionais (ANDREOLLI, 2016).

Esses mapas encontram-se na literatura de escoamento multifásico, são representados em planos bidimensionais, com os valores e variáveis de eixos escolhidos de acordo com as condições de escoamento, podendo portanto, apresentar diferentes sistemas de coordenadas. De forma geral, os eixos do mapa possuem as velocidades superficiais das fases, que podem ou não ser multiplicadas por algum parâmetro.

Ao comparar os mapas de diferentes autores, é possível perceber uma diferença notável entre esses mapas, fato que evidencia a falta de certeza presente (ANDREOLLI, 2016).

Nesse trabalho, será feito o uso do mapa de padrão de escoamento em fluxo bifásico ar-água em tubulações horizontais proposto por Mandhane *et al.* (1974).

### 3.4.1 Modelo Proposto por Mandhane *et al.* (1974)

O trabalho realizado por Mandhane *et al.* (1974) consiste na representação da transição entre os padrões do escoamento bifásico água-ar para uma tubulação horizontal. No estudo, os autores basearam-se em um banco de dados de 5935 dados, com um intervalo de diâmetro de tubulação entre 1,27cm e 5,1cm. As condições de contorno utilizadas no trabalho foram:

Tabela 1 – Intervalo dos Dados Utilizados

Diâmetro Interior da Tubulação	0,0127 - 0,1651 m
Massa Específica da Fase Líquida	961 - 1041 $kg/m^3$
Massa Específica da Fase Gasosa	1 - 1,44 $kg/m^3$
Viscosidade da Fase Líquida	0,0003 - 0,09 $kg/m.s$
Viscosidade da Fase Gasosa	0,00001 - 0,000022 $kg/m.s$
Tensão Superficial	0,069 - 0,073 N/m

Fonte: (MANDHANE; GREGORY; AZIZ, 1974)

Para construção do trabalho o autor selecionou três estudos. O primeiro foi escolhido devido ao seu importante papel na indústria petrolífera e refere-se ao trabalho realizado por Baker (1952). Em seu artigo, o autor propõe um mapa que prevê o comportamento do escoamento em uma tubulação, baseado no sistema água-ar, com Padrões do tipo Bolhas, Padrão Estratificado, Estratificado Ondulado, Padrão anular, Padrão GOLFADA, Bolhas alongadas e por fim, Bolhas Dispersas. O mapa possui coordenada  $G/\lambda$  versus  $L\lambda\psi/G$ , o que é equivalente a velocidade da massa de gás (G) versus a razão da velocidade da massa do líquido pela do gás (L/G). As variáveis  $\lambda$  e  $\psi$  são calculadas:

$$\lambda = \left[ \frac{\rho_G}{0,075} \cdot \frac{\rho_L}{62,3} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.26)$$

$$\psi = \frac{73,0}{\sigma_s} \cdot \left[ \frac{\mu_L}{1,0} \cdot \left( \frac{62,3}{\rho_L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.27)$$

Onde  $\rho_G$  e  $\rho_L$  possuem unidade de  $lb/ft^3$ ,  $\mu_L$  está em centipoise e  $\sigma_s$  em  $dyne/cm$ .

O segundo banco de dados escolhido foi o de Hoogendoorn, devido ao seu grande intervalo de dados e valores de parâmetros. O autor faz o estudo do escoamento água-ar

e óleo-ar em tubos horizontais com diâmetro interno de 24 a 140mm e tubos rugosos com diâmetro interno de 50mm (HOOGENDOORN, 1959). Os tipos de escoamentos observados foram Padrão Estratificado, Estratificado Ondulado, Golfadas, Bolhas Alongadas e Anular Estratificado.

Para plotagem do mapa o autor fez uso da Velocidade da mistura ( $V_M$ ) e a fração volumétrica da fase gasosa ( $\lambda_G$ ). Como resultado Hoogendoorn (1959), observou efeitos modestos devido ao diâmetro do tubo escolhido e a viscosidade do líquido inferior a  $0,05kg/m.s$ , entretanto, as coordenadas escolhidas no artigo apresentaram importantes padrões estratificados e névoas estratificadas em uma pequena parte do mapa (MANDHANE; GREGORY; AZIZ, 1974).

Por fim, o último modelo escolhido por Mandhane *et al.* (1974), foi o de Govier e Aziz, uma vez que, o registro apresenta uma boa quantidade de dados e intervalo de valores de parâmetros. O estudo é uma revisão, baseada na adição de dados de Govier e Omer, Baker (1952), Hoogendoorn (1959) e outros.

Para iniciar o cálculo desse sistema de coordenadas, foram definidos dois parâmetros X e Y, que podem ser usados além do sistema água-ar:

$$X = \left( \frac{\rho_G}{0,0808} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Y \quad (3.28)$$

$$Y = \left[ \frac{\rho_L}{62,4} \cdot \frac{72,4}{\sigma_S} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.29)$$

No qual,  $\rho_G$  e  $\rho_L$  possuem unidade de  $lb/ft^3$  e  $\sigma_S$  em  $dyne/cm$ . Em seguida, os valores X e Y são multiplicados pelas velocidades superficiais, gerando as coordenadas finais do mapa:

$$U'_{SG} = X \cdot U_{SG} \quad (3.30)$$

$$U'_{SL} = Y \cdot U_{SL} \quad (3.31)$$

Na sequência, Mandhane *et al.* (1974), levou os dados para análise computacional e criou dois parâmetros, a fim de facilitar a comparação dos dados, no qual o parâmetro  $\alpha_i$  representa a porcentagem de sucesso de um mapa de padrão de escoamento estar de acordo com o regime de escoamento em questão. Ao passo que  $\beta$  é a porcentagem de sucesso de um mapa de padrão de escoamento.

$$\alpha_i = \frac{\text{Pontos Corretamente previstos para estar no regime de fluxo}}{\text{Pontos observados no regime de escoamento } i} \cdot 100 \quad (3.32)$$

$$\beta = \frac{\text{Número de observações corretamente previstas nos respectivos regimes}}{\text{Número total de observações}} \cdot 100 \quad (3.33)$$

Como resultado, os três mapas apresentaram baixo sucesso em prever o Padrão de Bolhas Dispersas, grande parte de erro, devido a baixa quantidade de dados para esse padrão. Ao mesmo tempo, a comparação evidenciou a falta de confiabilidade das equações 2.16 e 2.17 sugeridas por Govier e Aziz. Além disso, os mapas tendem a prever o Padrão Anular Ondulado perfeitamente, mas deixam a desejar no Padrão Estratificado Ondulado. Outra importante observação feita por Mandhane *et al.* (1974), refere-se ao mapa de Hoogendoorn (1959), que se mostrou bem mais confiável que o proposto por Baker (1952).

Como consequência da análise proposta, o autor gerou um mapa água-ar, com aplicação de correlações físicas. Os eixos do diagrama foram modificados em relação a outras abordagens, assim como as áreas de transição de padrões, que foram organizadas de acordo com um certo esquema, o qual assume que a mudança de uma certa propriedade física em um padrão de escoamento pode implicar em uma consequência diferente para outro tipo de padrão.

Quanto a decisão do eixo de coordenadas, foi optado por uma opção mais simples, que consiste em plotar um diagrama log-log usando  $V_{SL}$  e  $V_{SG}$  como eixo de coordenadas, como representado na Figura 14.

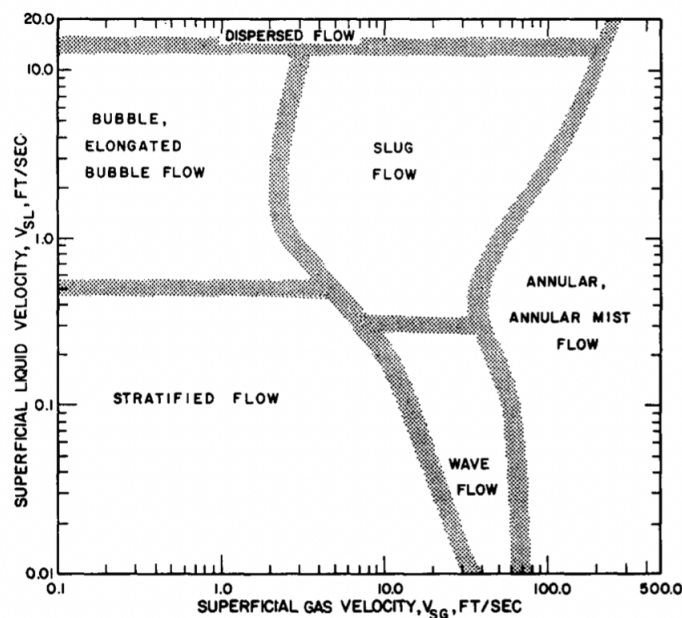


Figura 14 – Mapa proposto proposto por Mandhane (MANDHANE; GREGORY; AZIZ, 1974)

As coordenadas dos limites de transição entre os padrões de escoamento da Figura 14, são apresentadas na Tabela 2.



Tabela 2 – Coordenadas Para Os Limites De Transição

Limites de Transição	$U_{SG}$ (m/s)	$U_{SL}$ (m/s)	Correção das propriedades físicas
Estratificado Liso para Bolhas Alongadas	0,03048	0,1524	1,0/Y
	1,524	0,1524	1,0/Y
Estratificado Ondulado para Golfadas	2,286	0,09144	Y
	12,192	0,09144	Y
Bolhas Alongadas e Golfadas para Bolhas Dispersas	0,03048	4,2672	Y
	70,104	4,2672	Y
Estratificado Liso e Bolhas Alongadas para Estratificado Ondulado e Golfadas	10,668	0,003048	X
	4,2672	0,03048	X
	3,2004	0,06096	X
	0,762	0,35052	X
	0,762	1,46304	X
	0,9906	4,2672	X
Estratificado Ondulado e Golfadas para Anular Ondulado	21,336	0,003048	X
	18,288	0,03048	X
	11,5824	0,09144	X
	12,192	0,170688	X
	15,24	0,3048	X
	30,48	0,762	X
	70,104	4,2672	X
Bolhas Dispersas para Anular Ondulado	70,104	4,2672	X
	81,9912	9,144	X

Fonte: (MANDHANE; GREGORY; AZIZ, 1974)

Em seguida, Mandhane *et al.* (1974) elaborou o fator de correção para as propriedades físicas. Foi analisado a influência do diâmetro da tubulação, além de avaliar os efeitos direcionais para os limites de padrão de escoamento e várias perturbações foram simuladas nos expoentes do fator de correção. Por último, foi adicionado o efeito da viscosidade, o que resultou em:

$$X' = \left( \frac{\rho_G}{0,0808} \right)^{0,2} \cdot \left( \frac{\rho_L}{62,4} \cdot \frac{72,4}{\sigma_S} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{\mu_G}{0,018} \right)^{0,2} \quad (3.34)$$

$$Y' = \left( \frac{\mu_L}{1,0} \right)^{0,2} \cdot \left( \frac{\rho_L}{62,4} \cdot \frac{72,4}{\sigma_S} \right)^{0,25} \quad (3.35)$$

Onde,  $\rho_G$  e  $\rho_L$  encontram-se em lb/ft<sup>3</sup>,  $\mu_L$  e  $\mu_G$  em centipoise e  $\sigma_S$  em dyne/cm.

Os fatores  $X'$  e  $Y'$  são aplicados ao limites de transição e não aos eixos do mapa. Assim, os limites de transição podem ser definidos usando a fórmula abaixo, onde a variável  $\xi$  corresponde ao apropriado fator de correção especificado na Tabela 2.

$$U_{SL} = \xi \cdot U_{SG} \quad (3.36)$$

### 3.5 Perda de Energia ao Longo do Escoamento

Em um sistema petrolífero, a perda de carga costuma-se iniciar no meio poroso e acontece durante todo o escoamento. Inicialmente, no meio poroso, a perda de carga vai depender da permeabilidade da rocha e terá sua formulação baseada na Lei de Darcy. Ao passo que no trecho de elevação, ou seja nas *flowlines*, a perda de pressão é influenciada pela ação gravitacional, que representa uma grande parcela da perda total. Por fim, no trecho de coleta, a fricção torna-se maior, mas as perdas não são tão elevadas em comparação a coluna de produção (ANDREOLLI, 2016).

Nesse sentido, existem diversos modelos matemáticos que permitem prever o comportamento da perda de pressão ao longo de um escoamento. De acordo com Shoham (2006) esses modelos são divididos, de forma geral, em dois tipos: *Black-Box Models*, baseados em correlações empíricas e que desconsideram a complexidade do escoamento bifásico, e os Modelos Mecanicistas.

Os *Black-Box Models* tratam o escoamento bifásico por meio de ferramentas de análise provenientes do escoamento monofásico e é dividido em quatro categorias: o Modelo Homogêneo, Modelo de Fases Separadas, Modelo de Deslizamento e Modelos *Drift-Flux*.

O primeiro modelo, Homogêneo, é uma forma simples, porém versátil de prever o comportamento de um escoamento bifásico (SHOHAM, 2006). Nessa categoria se encaixam os modelos que não consideram o escorregamento entre as fases e tampouco os padrões de escoamento. Ou seja, o fluido é considerado uma mistura perfeita, na qual a fase gasosa e líquida viajam na mesma velocidade. Por isso, este modelo pode falhar em prever certos padrões de escoamento, mas costuma atingir resultados satisfatórios para o padrão bolhas dispersas.

Para o cálculo da categoria acima, parte-se do princípio que as fases encontram-se bem misturadas e em equilíbrio, e o objetivo é determinar o fator de atrito bifásico. Este modelo será explorado mais a frente neste trabalho.

Já Modelo de Deslizamento, trata-se de uma pequena evolução do modelo anterior, ao considerar o escorregamento entre as fases, mas ainda não considera os padrões de escoamento. Portanto, são modelos mais realistas que os anteriores e possui como objetivo

o cálculo do fator de atrito e do *Holdup* com escorregamento (ANDREOLLI, 2016).

Esse modelo é considerado uma extensão do Modelo Homogêneo, que considera o deslizamento entre as fases. Tal consideração possibilita uma expressão mais precisa da fração volumétrica. Em geral, é aplicado para escoamentos verticais, com padrões de Bolhas Dispersas, Intermitente e Névoa.

Por fim, o Modelo de Fases Separadas considera os padrões de escoamento, ao mesmo tempo que parte do princípio que a fase gasosa e a fase líquida possuem velocidades diferentes e portanto, escoam separadamente. Nessa categoria, além de calcular a perda de pressão por fricção em tubos horizontais, visa-se calcular o *Holdup* e os padrões de escoamento. No geral são modelos mais complexos, que necessitam de mais informações para modelagem do escoamento. É o caso, por exemplo, do modelo de Beggs e Brill (1973).

Nesse modelo, cada fase ocupará uma parte da seção transversal da tubulação como representado na Figura 15. As correlações utilizadas são propostas por Lockhart e Martinelli (1949), e em cada uma das fases é aplicado o Método de Fluxo Monofásico baseado no conceito de diâmetro hidráulico ((SHOHAM, 2006)).

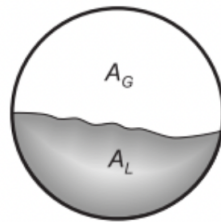


Figura 15 – Esquemático do Modelo de Fases Separadas (SHOHAM, 2006)

### 3.5.1 Modelo Homogêneo

O Modelo Homogêneo parte do princípio que o escoamento multifásico será unidimensional, compressível, em regime permanente e que se comportará como um escoamento monofásico. Para isso, considera-se que as fases estarão bem misturadas, em equilíbrio, podendo haver troca de massa entre o gás e o líquido. O que implica dizer que as fases viajarão com a mesma velocidade *in situ* e que é desconsiderado o escorregamento entre elas. Portanto, os parâmetros como Perda de Carga e *Holdup* serão calculados a partir das propriedades médias dos fluidos.

Inicialmente, tomamos um volume de controle, com uma área transversal  $A$  e um diferencial de espessura na direção horizontal, como representado na Figura 16:

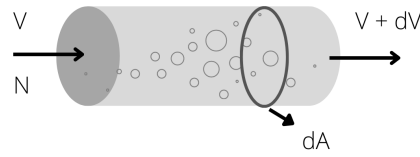


Figura 16 – Modelo de Volume de Controle Horizontal

Podemos relacionar as propriedades do volume de controle acima por meio do Teorema de Transporte de Reynolds. Este representa uma relação fundamental na dinâmica dos fluidos que associa uma propriedade extensiva arbitrária  $N$  pertencente a um sistema e as variações dessa propriedade relacionadas ao volume de controle em questão (FOX et al., 2018). O Modelo Homogêneo tem como base a integral do Teorema de Transporte de Reynolds:

$$\frac{dN}{dt}|_{sist} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \beta \rho dV + \int_{SC} \beta \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (3.37)$$

Onde  $\beta$  representa uma propriedade intensiva que pode ser relacionada a propriedade extensiva  $N$  da seguinte forma:

$$\beta = \frac{\partial N}{\partial m} \quad (3.38)$$

Com o intuito de compreender melhor o significado de cada termo do Teorema de Transporte de Reynolds, dada pela equação 3.37, temos que:

Tabela 3 – Termos do Teorema de Transporte de Reynolds

$\frac{dN}{dt} _{sist}$	Este termo refere-se a taxa de variação da propriedade extensiva $N$ do sistema. No caso deste trabalho, será calculado a taxa de variação da massa e da quantidade de movimento.
$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \beta \rho dV$	Pode ser interpretado como a taxa de variação da quantidade da propriedade $N$ em um volume de controle, portanto, o termo calcula o valor instantâneo de $N$ dentro do volume de controle escolhido.
$\int_{SC} \beta \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$	Revela a taxa com a qual a propriedade $N$ sai da superfície do volume de controle, uma vez que, o termo $\rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA$ irá calcular a taxa de transferência de $N$ saindo da superfície $\vec{n} dA$ .

Ao utilizar a equação 3.37 é preciso atentar-se ao produto escalar entre  $\vec{V}$  e  $d\vec{A}$ , uma vez que, quando o vetor área estiver direcionado para fora, o produto escalar será

positivo. Além disso, para coordenadas do volume de controle estacionárias ou com velocidade linear constante, deve-se aplicar a Segunda Lei de Newton para um sistema inercial (FOX et al., 2018).

Para desenvolver o Modelo Homogêneo, será feito na sequência, o balanço de massa, o balanço da quantidade de movimento, além do cálculo da massa específica da mistura, do componente gravitacional, friccional e aceleracional.

### 3.5.1.1 Balanço de Massa

Inicialmente, vamos aplicar a equação 3.38 para a massa, propriedade extensiva, o que resulta em:

$$\beta = \frac{\partial m}{\partial m} = 1 \quad (3.39)$$

O balanço de massa para um volume de controle com uma área de secção  $A_p$  e diferencial de comprimento  $dz$  pode ser calculado por meio do Teorema de Transporte de Reynolds. Nesse caso, considera-se um regime estacionário, com área transversal constante e sem criação de massa, temos o seguinte resultado:

$$\frac{Dm}{Dt}|_{sist} = 0 \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \beta \rho dV = 0 \quad (3.41)$$

Substituindo os resultados presentes em 3.39, 3.40 e 3.41 na equação do Transporte de Reynolds dada em 3.37:

$$\int_{SC} \rho_m \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (3.42)$$

Resolvendo a integral, a equação da continuidade para a mistura é dada abaixo, onde  $W$  é a vazão mássica da mistura,  $\rho_m$  e  $V_M$  a massa específica da mistura e a velocidade da mistura, respectivamente (SHOHAM, 2006).

$$W = \rho_m V_M A_P = cte \quad (3.43)$$

### 3.5.1.2 Cálculo da Massa Específica da Mistura

Para os modelos apresentados nesse trabalho, se fará necessário o cálculo da massa específica da mistura. Dado que a massa específica é a razão entre a massa e o volume, partimos:

$$\rho_m = \frac{m_L}{V} \cdot \frac{V_L}{V_L} + \frac{m_G}{V} \cdot \frac{V_G}{V_G} = \frac{m_L}{V_L} \cdot \frac{V_L}{V} + \frac{m_G}{V_G} \cdot \frac{V_G}{V} \quad (3.44)$$

Rearranjando a equação e utilizando a definição de *Holdup* e Fração de Vazio, temos uma equação que será válida sempre:

$$\rho_m = \rho_L H + \rho_G \alpha \quad (3.45)$$

Especificamente, no Modelo Homogêneo, as duas fases escoarão com a mesma velocidade real, o que implica em:

$$V_L = V_G = \frac{U_{SL}}{H} = \frac{U_{SG}}{\alpha} \quad (3.46)$$

Podemos relacionar a Fração de Vazio com a Fração Volumétrica da mistura:

$$\alpha = \frac{U_{SG}}{U} = \lambda_m \quad (3.47)$$

Sabendo que a Fração Volumétrica pode ser escrita como uma relação entre as Vazões Volumétricas e que, esta última pode ser explicitada em função do Fluxo Mássico e da massa específica:

$$\lambda_m = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} = \frac{\frac{W_G}{\rho_G}}{\frac{W_G}{\rho_G} + \frac{W_L}{\rho_L}} \quad (3.48)$$

Podemos multiplicar a equação acima por  $\frac{W}{W}$  e em seguida substituir a equação abaixo em 3.48:

$$\lambda_m = \frac{\frac{X}{\rho_G}}{\frac{X}{\rho_G} + \frac{(1-X)}{\rho_L}} \quad (3.49)$$

No qual X representa o título da mistura. No final, encontra-se a seguinte equação, válida para o Modelo Homogêneo:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{1-X}{\rho_L} + \frac{X}{\rho_G} \quad (3.50)$$

### 3.5.1.3 Balanço da Quantidade de Movimento

Para o balanço de quantidade de movimento, usamos o mesmo procedimento adotado no balanço de massa. Partindo novamente da equação 3.38 temos que a propriedade extensiva do sistema é dada por  $mV$  e portanto:

$$\beta = \frac{\partial(mV)}{\partial m} = V \frac{\partial m}{\partial m} = \vec{V} \quad (3.51)$$

Tomando um dado volume de controle representado pela Figura 17, temos:

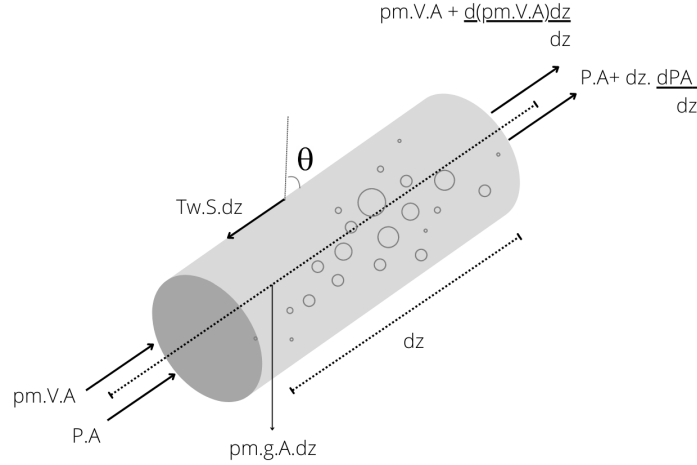


Figura 17 – Volume de Controle

Em seguida, aplicando o Teorema de Transporte de Reynolds, dado em 3.37, para a quantidade de movimento em um regime estacionário:

$$\frac{d(mV)}{dt} \Big|_{sist} = \int_{SC} V \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (3.52)$$

Tomando as coordenadas do volume de controle da Figura 17 como inerciais, e partindo da segunda Lei de Newton para um sistema inercial (FOX et al., 2018), temos que o primeiro termo da equação será:

$$\frac{D\vec{P}}{Dt} \Big|_{sist} = \sum F_{ext} = F_{campo} + F_{superfície} \quad (3.53)$$

Assim, as forças externas podem ser representadas pelo somatório das forças de campo com as forças de superfície presentes em um volume de controle e são dadas respectivamente por:

$$F_{campo} = \rho_m g A_P dz \cdot \text{sen}\theta \quad (3.54)$$

$$F_{superfície} = -\tau_w S dz - \frac{dPA}{dz} dz \quad (3.55)$$

Onde  $\tau_w$  é a tensão de cisalhamento na parede da tubulação, S o perímetro do tubo e  $\theta$  o ângulo de inclinação da tubulação. Na sequência, o segundo termo da equação 3.52 é calculado, no qual a variável V pode ser retirada da integral:

$$\int_{SC} V \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = V \frac{d(\rho_m V A)}{dz} dz \quad (3.56)$$

Em seguida, ao aplicar os achados 3.53, 3.54 e 3.55 na equação 3.52 e assumindo o regime estacionário, o resultado encontrado é:

$$-\tau_w S dz - \frac{dPA}{dz} dz - \rho_m g A_P dz \cdot \text{sen}\theta = V \frac{d(\rho_m V A)}{dz} dz \quad (3.57)$$

Por fim, é possível evidenciar o termo dz e aplicar a equação 3.43 no lado direito da equação acima, e isolar o diferencial de pressão em dz.

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{-\tau_w S}{A_P} - \rho_m g \text{sen}\theta - \frac{W dV}{A_P dz} \quad (3.58)$$

Portanto, o gradiente de pressão total será dado pelo somatório do componente friccional, gravitacional e aceleracional, respectivamente. As expressões para cada componente serão desenvolvidas a seguir.

#### 3.5.1.4 Componente Friccional

Como visto anteriormente, o termo referente ao componente friccional é dado como:

$$\frac{-dP_{fric}}{dz} = \frac{S}{A_P} \tau_w \quad (3.59)$$

Ao relacionar a equação acima com o conceito de diâmetro hidráulico, temos:

$$D = 4 \frac{A_P}{S} \quad (3.60)$$

$$\frac{-dP_{fric}}{dz} = \frac{4 \cdot \tau_w}{D} \quad (3.61)$$

Já o gradiente friccional de pressão é dado de forma prática, pelo Coeficiente de Fricção de Fainning:

$$\tau_w = \frac{1}{2} f_F \rho_m U^2 \quad (3.62)$$

Relacionamos o coeficiente de Fainning com o coeficiente de Darcy por:

$$f_d = 4f_F \quad (3.63)$$

A partir das equações acima podemos reescrever o componente friccional como:



$$-\frac{dP_{fric}}{dz} = \frac{f_d \rho_m U^2}{2 D} \quad (3.64)$$

Utilizando a definição de Fluxo Mássico ( $G$ ) e substituindo em 3.64, tem-se finalmente:

$$-\frac{dP_{fric}}{dz} = \frac{f_d G^2}{2 D \rho_m} \quad (3.65)$$

O cálculo do fator de atrito é baseado no número de Reynolds da mistura para a condição de não escorregamento (SHOHAM, 2006):

$$Re_{NS} = \frac{\rho_m \cdot J \cdot D}{\mu_m} \quad (3.66)$$

Partindo do número de Reynolds acima, tem-se respectivamente o fator de atrito calculado por Davidson *et al.* (2000) para escoamento laminares e turbulentos, onde  $e$  representa a rugosidade da tubulação:

$$f_d = \frac{64}{Re} \quad (3.67)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{e}{3,70D} - \frac{5,16}{Re} \cdot \log \left( \frac{e}{3,70D} + \frac{5,09}{Re^{0,87}} \right) \right) \quad (3.68)$$

### 3.5.1.5 Componente Gravitacional

O componente gravitacional pode ser diretamente determinado pela fórmula dada em 3.58:

$$-\frac{dP_{grav}}{dz} = \rho_m \cdot g \cdot \text{sen}\theta \quad (3.69)$$

Sendo que a massa específica da mistura pode ser calculada por meio da equação 3.74. Em geral, o cálculo do coeficiente gravitacional para o Modelo Homogêneo não é muito rigoroso (SHOHAM, 2006).

### 3.5.1.6 Componente Aceleracional

Para determinar o componente aceleracional reorganiza-se a parcela de interesse na equação 3.58 em função do fluxo mássico:

$$\frac{dP_{acel}}{dz} = \frac{W}{A_P} \frac{dV}{dz} = G \frac{d\left(\frac{W}{\rho_m A}\right)}{dz} \quad (3.70)$$

Sabendo que a vazão mássica não é dependente do deslocamento em  $z$ , podemos escrever a equação acima, como:

$$\frac{dP_{acel}}{dz} = G \frac{W}{A} \frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dz} + G \frac{W}{\rho_m} \frac{d(\frac{1}{A})}{dz} \quad (3.71)$$

Para resolver a derivada da área da equação, pode-se aplicar a regra do quociente:

$$\frac{d(\frac{1}{A})}{dz} = -\frac{1}{A^2} \frac{dA}{dz} \quad (3.72)$$

Já para a derivada da massa específica, faremos uso da relação entre título e pressão, uma vez que a variação da massa específica acontece em função da variação da pressão e do título.

$$\rho_m = \rho_m(X, P) \quad (3.73)$$

$$\frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dz} = \frac{\partial(\frac{1}{\rho_m})}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial z} + \frac{\partial(\frac{1}{\rho_m})}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3.74)$$

O primeiro termo da equação acima, pode ser resolvido em função da equação 3.50:

$$\frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dX} = \frac{d}{dX} \left( \frac{1-X}{\rho_L} + \frac{X}{\rho_G} \right) = \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \quad (3.75)$$

Já para o segundo termo, referente a derivada da massa específica em relação a pressão, utiliza-se a regra do quociente, que resulta em:

$$\frac{\partial(\frac{1}{\rho_m})}{\partial P} = \frac{-1}{\rho_m^2} \cdot \frac{d\rho_m}{dP} \quad (3.76)$$

Por fim, utilizando as expressões 3.72, 3.74, 3.75 e 3.76, na equação 3.71:

$$\frac{dP_{acel}}{dz} = G \frac{W}{A} \left[ \left( \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{1}{\rho_m^2} \frac{d\rho_m}{dP} \frac{dP}{dz} \right] - G \frac{W}{\rho_m} \frac{1}{A_P^2} \frac{dA}{dz} \quad (3.77)$$

$$\frac{dP_{acel}}{dz} = G^2 \left( \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dX}{dz} - G^2 \frac{1}{\rho_m^2} \frac{d\rho_m}{dP} \frac{dP}{dz} - \frac{G^2}{A_P} \frac{1}{\rho_m} \frac{dA}{dz} \quad (3.78)$$

### 3.5.1.7 Modelagem Final

Unindo os resultados encontrados para o componente aceleracional, gravitacional e friccional, tem-se:

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{f_d G^2}{2D\rho_m} + G^2 \left( \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dX}{dz} - G^2 \frac{1}{\rho_m^2} \frac{d\rho_m}{dP} \frac{dP}{dz} - \frac{G^2}{A_P \rho_m} \frac{dA}{dz} + \rho_m g \sin(\theta) \quad (3.79)$$

O gradiente de pressão aparece dos dois lados da equação e portanto, pode ser isolado:

$$-\frac{dP}{dz} \left( 1 - \frac{G^2}{\rho_m^2} \frac{d\rho_m}{dP} \right) = \frac{f_d G^2}{2D\rho_m} + G^2 \left( \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dX}{dz} - \frac{G^2}{A_P \rho_m} \frac{dA}{dz} + \rho_m g \sin(\theta) \quad (3.80)$$

Em seguida, é possível utilizar a equação referente a velocidade do som na mistura ( $c_m$ ):

$$c_m = \left( \frac{d\rho_m}{dP} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.81)$$

$$-\frac{dP}{dz} \left( 1 - \frac{G^2}{\rho_m^2} (c_m)^{-2} \right) = \frac{f_d G^2}{2D\rho_m} + G^2 \left( \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dX}{dz} - \frac{G^2}{A_P \rho_m} \frac{dA}{dz} + \rho_m g \sin(\theta) \quad (3.82)$$

Usando a fórmula do Número de Mach ( $Ma$ ) e a definição de fluxo mássico dada em 3.20, a fim de simplificar o denominador na equação, encontramos:

$$Ma = \frac{J}{c_m} \quad (3.83)$$

$$-\frac{dP}{dz} \left( 1 - \frac{J^2 \rho_m^2 Ma^2}{\rho_m^2 J^2} \right) = \frac{f_d G^2}{2D\rho_m} + G^2 \left( \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dX}{dz} - \frac{G^2}{A_P \rho_m} \frac{dA}{dz} + \rho_m g \sin(\theta) \quad (3.84)$$

O que resulta na equação geral para o Modelo Homogêneo:

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{\frac{f_d G^2}{2D\rho_m} + \rho_m g \sin(\theta) + G^2 \left( \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dX}{dz} - \frac{G^2}{A_P \rho_m} \frac{dA}{dz}}{1 - Ma^2} \quad (3.85)$$

O numerador da parte direita da equação 3.85 representa, respectivamente, o efeito friccional, gravitacional, de mudança de fase e o efeito da mudança de área no gradiente de pressão total, para o Modelo Homogêneo. Por fim, o denominador direito representa o efeito da compressibilidade das fases (SHOHAM, 2006).

De posse da equação 3.85, é possível fazer algumas considerações. Para calcular o Número de Reynolds no Modelo Homogêneo, é necessário a viscosidade da mistura ( $\mu_m$ ), que pode ser obtida pela equação abaixo (SHOHAM, 2006):

$$\mu_m = \mu_L \cdot \alpha + \mu_G(\alpha - 1) \quad (3.86)$$

Para o caso em que  $\alpha$  e  $H$  não podem ser identificados experimentalmente, pode ser feito o uso das definições abaixo, validas somente para o Modelo Homogêneo:

$$\alpha = \frac{U_G}{U} \quad e \quad H = 1 - \alpha \quad (3.87)$$

Finalmente, ao considerar um regime estacionário, sem variação das propriedades do fluido com o tempo, e desprezando os efeitos térmicos que atuam no sistema, podemos afirmar que o título da mistura não terá variação ao longo do escoamento e portanto:

$$\frac{dX}{dz} = 0 \quad (3.88)$$

Em seguida, considerando que a tubulação encontra-se totalmente na horizontal e a área de escoamento é constante durante toda a sua extensão:

$$\frac{dA}{dz} = 0 \quad e \quad \theta = 0 \quad (3.89)$$

Assim, partindo das considerações expostas em 3.86, 3.87, 3.88 e 3.89 aplicadas na equação 3.85, resulta-se na equação simplificada abaixo:

$$\frac{-dP}{dz} = \frac{\frac{f_a G^2}{2D\rho_m} + \rho_m g \sin(\theta)}{1 - Ma^2} \quad (3.90)$$

## 4 A Bancada Experimental

Esta sessão tem o objetivo apresentar os materiais e equipamentos utilizados na bancada experimental, a metodologia de ensaio utilizada, mas também como, explicitar o princípio de funcionamento de um Medidor de Vazão Tipo Turbina e de um Manômetro em U para tomada de pressão diferencial.

Com o intuito de estudar o fenômeno de escoamento bifásico horizontal, construiu-se uma bancada experimental em laboratório. Espera-se observar diferentes padrões de escoamento que podem ser encontrados na produção petrolífera, assim como em outros sistemas industriais.

Neste capítulo, será apresentado primeiramente, os equipamentos utilizados na bancada, com seus respectivos dados técnicos de trabalho. Em seguida, será detalhada a montagem da bancada e relatado algumas informações técnicas a respeito do funcionamento de um Medidor Tipo Turbina e de um Manômetro.

### 4.1 Equipamentos

A bancada experimental foi construída no laboratório de Termofluidos na Universidade de Brasília - Campus Gama. A Figura 18 mostra um esquemático da bancada de escoamento utilizada no trabalho.

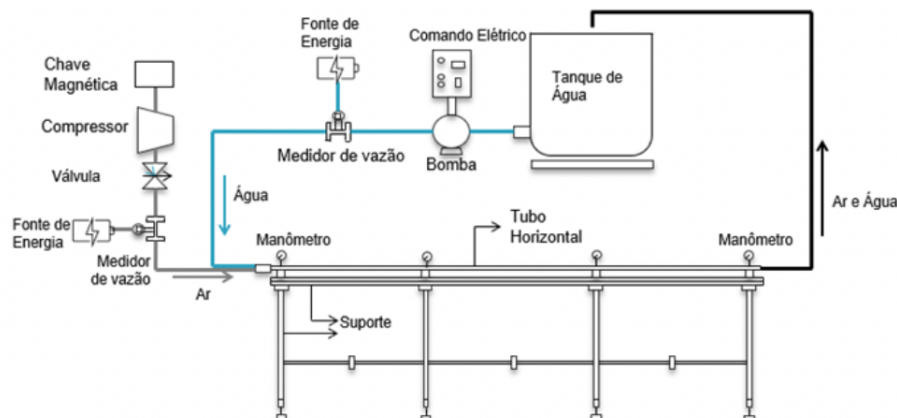


Figura 18 – Esquemático da Bancada de Escoamento Bifásico. (OLIVEIRA, 2020)

Na Figura 18, a água é representada pela linha azul com diâmetro de 1", o gás pela linha cinza de diâmetro de 1/2", e a tubulação onde os dois fluidos se encontram, que possui cor preta e diâmetro de 1". Os equipamentos foram escolhidos de forma a garantir um padrão de vazão semelhante ao observado por Mandhane *et al.* (1974).

Inicialmente, será feita a descrição do sistema de injeção de gás. O primeiro equipamento é uma chave magnética para acionamento do sistema, um compressor da marca Chiaperini, modelo CJ 20 + APV 250 litros, com pressão máxima de trabalho de 175 lbs/pol<sup>2</sup> (12kgf/cm<sup>2</sup>), 34 m<sup>3</sup>/h de deslocamento teórico e dois estágios. A ficha técnica do fabricante encontra-se na Figura 19 abaixo.

	<b>Deslocamento teórico</b>	<b>567 l/min - 20 pcm</b>
	<b>Pressão máxima</b>	<b>175 psi - 12 bar</b>
	<b>Reservatório</b>	<b>250L</b>
	<b>Tempo enchimento</b>	<b>6'29"</b>
	<b>Nº de cilindros</b>	<b>2</b>
	<b>Nº de estágios</b>	<b>2</b>
	<b>RPM do bloco</b>	<b>1050</b>
	<b>Motor elétrico</b>	<b>5 hp - 3.75 kW - 2P</b>
	<b>c/embalagem [mm]</b>	<b>1600x670x1260</b>
	<b>Óleo Lubrif. Volume</b>	<b>0.900 ml</b>
	<b>Peso do cabeçote</b>	<b>40 kg</b>
	<b>Peso c/ embal c/m</b>	<b>190 kg</b>
	<b>Ø Polia</b>	<b>128 mm</b>
	<b>Diâmetro do volante</b>	<b>422 mm</b>
	<b>Correia</b>	<b>A65</b>

Figura 19 – Dados Técnicos do Compressor. (CHIAPERINI, 2020)

Para garantir que a vazão gerada pelo compressor, pode criar os perfis observados por Mandhane *et al.* (1974), foi analisada a ficha técnica acima em comparação a Tabela 2. A velocidade máxima do gás da tabela é de aproximadamente 82 m/s, o que corresponde a uma vazão de 149,58 m<sup>3</sup>/h para tubulações de 0,0254m de diâmetro, o que permite um escoamento do tipo anular, estratificado ondulado, intermitente e bolhas dispersas.

Ao passo que a menor velocidade do gás seria aproximadamente 0,03 m/s, o que corresponde a uma vazão de 0,0547 m<sup>3</sup>/h, o que condiz com o perfil estratificado e de bolhas alongadas.

A fim de garantir a qualidade do gás no escoamento, foi instalado um filtro processador de ar, acompanhado de um manômetro, modelo AIR FIL 1, da marca ARPRESX, com as especificações presentes na Figura 20.

Em seguida, na linha de gás, existe uma válvula para regular a vazão de ar e um medidor de ar tipo turbina, da marca RUCKEN, modelo TCM – 1/2", que terá apresentação mais aprofundada, posteriormente. Por último, o gás entrará na tubulação de escoamento bifásico por meio de uma mangueira flexível e injetores posicionados na parte superior da tubulação, com aproximadamente 1m de distância da entrada de água. A Figura 21 mostra alguns dos equipamentos utilizados no sistema de gás, como a chave

AIR FIL 1 - FILTRO DE BAIXA VAZÃO PCM	
Filtro Completo	Manômetro / 2 Torneiras
Pressão Máx. de Trabalho	160 lbs/pol <sup>2</sup>
Entradas	1/4"
Saída	1/4"
Refil	5 Micra
Refil c/ Carvão Ativado	Para uso odontológico
Drenos	DDA - Dreno Dupla Ação
Vazão	500 l/min
Peso	0,400 Kg
Uso	Uso Geral / Rede de Ar

Figura 20 – Dados Técnicos do Filtro de Ar. (ARPREX, 2019)

magnética de acionamento, compressor e o regulador de pressão instalado no início da linha, respectivamente.



Figura 21 – Componentes do Sistema de Gás

Sobre o sistema de água, tem-se um tanque de água elevado alguns centímetros do chão, com capacidade de armazenamento de 1000 litros, que se conecta a uma tubulação de 1 1/2" e estará aberto em sua parte superior, afim de evitar recirculação do gás na linha de água. Em seguida na linha, tem se uma moto-bomba, marca Schneider, do modelo ME-AL-2250 a qual trabalha afogada, com entrada de 1 1/4". A fim de realizar o comando elétrico manual da bomba foi planejado uma caixa elétrica que possui em sua tampa um botão liga/desliga, um botão de emergência, luzes LED que indicam estados para operação e falha de funcionamento, além de um potenciômetro que controla a frequência de rotação do motor. O controle, acionamento e interrupção são realizados por meio de um inversor de frequência da fabricante WEG modelo CFW300. A Figura 22 mostra o conjunto.

De forma similar ao compressor, a fim de garantir a criação de perfis de escoamento, foi feito uma análise da curva de potência da moto bomba com os valores de velocidade da Tabela 2.

Inicialmente, o menor valor de velocidade da fase líquida é de 0,003 m/s, o que corresponde a uma vazão de aproximadamente 0,005 m<sup>3</sup>/h, para uma tubulação de 0,0254m de diâmetro, contemplando os regimes estratificado liso, estratificado ondulado e anular. O maior valor da tabela é de 9,144m/s, o que corresponde a uma vazão de aproxima-



Figura 22 – Moto Bomba e Caixa Elétrica

mente  $16,417 \text{ m}^3/\text{h}$ , para atingir o padrão de bolhas dispersas e anular. Assim, a faixa de valores de velocidade de Mandhane *et al.* (1974), é alcançada com a moto bomba, como é possível ver nos dados abaixo, presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados Característicos de Desempenho da Moto Bomba

Potência	Pressão Max	Altura Max	Altura Manométrica (m.c.a)								
			36	38	40	45	50	55	60	65	70
5	73	8	Vazão em $\text{m}^3/\text{h}$ para sucção de 0 m.c.a								
			14,9	14,7	14,4	13,8	12,9	11,8	10,1	7,8	4,9

Fonte: Adaptado (SCHNEIDER, 2020)

Assim, como na linha de gás, a linha de água possui uma válvula e em seguida um medidor de vazão tipo turbina da marca RUCKEN, modelo TCM – 1". A entrada de água na linha de escoamento encontra-se posicionada antes dos bicos injetores de ar, e é feita por meio de um cotovelo, ligado a uma tubulação de 1", como representado na Figura 23.

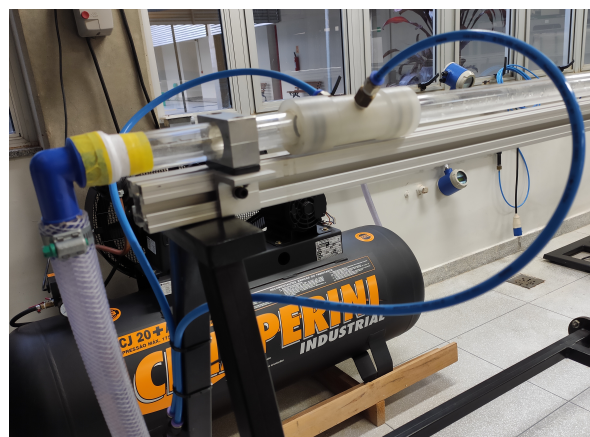


Figura 23 – Entrada de Água e Ar na linha de Escoamento



## 4.2 Montagem da Bancada

Para iniciar a construção da bancada, foi feito, em trabalhos posteriores, o desenho estrutural da linha de escoamento, no qual fez-se o uso de um perfil de alumínio e cantoneiras, representado na Figura 24.

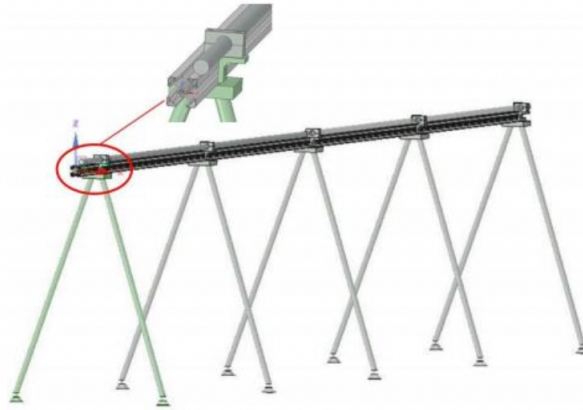


Figura 24 – Desenho do Suporte da Tubulação. (OLIVEIRA, 2020)

A estrutura visa garantir o nivelamento da tubulação ou impor alguma angulação desejada. Neste trabalho, a estrutura de suporte ficará completamente na horizontal. Foram instaladas cantoneiras com o intuito de fixar a tubulação de acrílico no perfil de alumínio, garantindo, rigidez a bancada e impedindo que durante a realização de ensaios, ocorra a movimentação ou vibração da linha de escoamento, o que poderia influenciar nos resultados encontrados. Na Figura 25, podemos ver uma das cantoneiras sobre o perfil de alumínio.

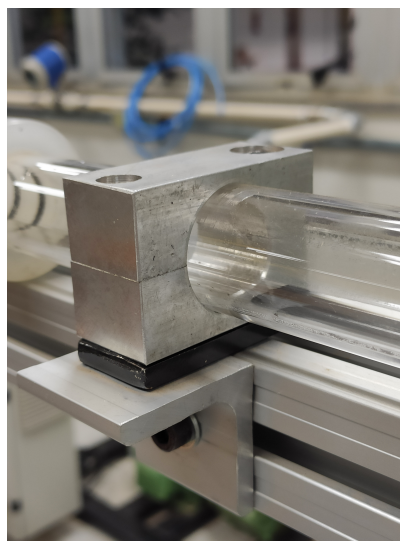


Figura 25 – Cantoneiras na Linha de Escoamento

Posteriormente, a estrutura de ferro rígida do projeto que oferece suporte ao perfil de alumínio, foi modificada e acrescentada mais seções pra não permitir desequilíbrios.

Além disso, a fim de garantir mais estabilidade, foram colocados pés antivibração nos suportes. Na Figura 26, o suporte de ferro no laboratório de Termofluidos.

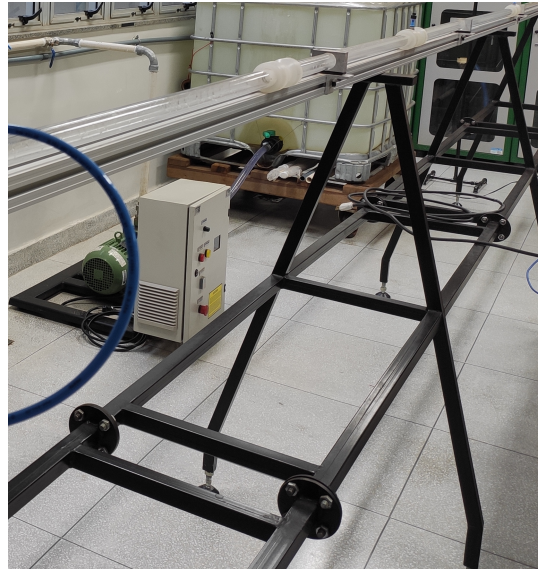


Figura 26 – Suporte de Ferro para o Perfil de Alumínio

A tubulação de acrílico, possui 0,0254m de diâmetro, é dividida entre tubos de 2m e 1m, e encontra-se conectada em sua extensão por conexões de nylon, o que permite uma desmontagem mais prática caso a bancada tenha que ser movimentada, mas também como, garante uma vedação impedindo o vazamento de fluidos, sem prejudicar o comportamento do escoamento. Na Figura 27, o desenho técnico da conexão utilizada no tubo de acrílico.

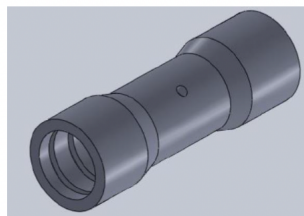


Figura 27 – Desenho Técnico da Conexão de Nylon

Além disso, a conexão de nylon é necessária para inserção de bicos injetores de ar, presentes no início da linha de escoamento e permite a instalação de medidores de pressão ao longo da linha. Na Figura 28, é possível ver a vista lateral de uma conexão de nylon com bicos injetores instalados para entrada de gás.



Figura 28 – Bicos Injetores instalados na Conexão de Nylon

De forma paralela, a conexão do tanque com a tubulação foi realizada por meio de um adaptador de tanque fêmea, que tem como intuito impedir o vazamento do fluido e tornar o encaixe com a mangueira mais fácil. A ligação entre a válvula e a motobomba foi feita com uma tubulação transparente de 1/2" e com o auxílio de um conjunto bucha/espigão de 1.1/4" para 1.1/2", na entrada da motobomba. A válvula na saída do tanque é mostrada na Figura 29.



Figura 29 – Conector entre o Tanque e tubulação

Já os medidores de vazão foram inseridos na linha de gás e água com o auxílio de uma união rosqueável de PVC referente ao diâmetro de cada linha. E posteriormente, instalados cabos com conectores P2 macho na saída lateral esquerda do medidor, para garantir a alimentação do aparelho. Na Figura 30, tem-se o Medidor Tipo Turbina da linha d'água, em funcionamento com a alimentação conectada.



Figura 30 – Medidor Tipo Turbina em Funcionamento

Por sua vez, o Manômetro de Tubo em U foi instalado na linha de escoamento bifásico, por meio das conexões de nylon. As entradas de pressão foram posicionadas de modo que o primeiro conector encontra-se separado do segundo conector por 2,1m.

Por fim, para a saída do escoamento, foi necessário o uso de um suporte para apoiar a tubulação, afim de evitar excesso de carga no final da tubulação de acrílico e desgaste. Por fim, a montagem da bancada experimental resultou na seguinte disposição dos equipamentos:

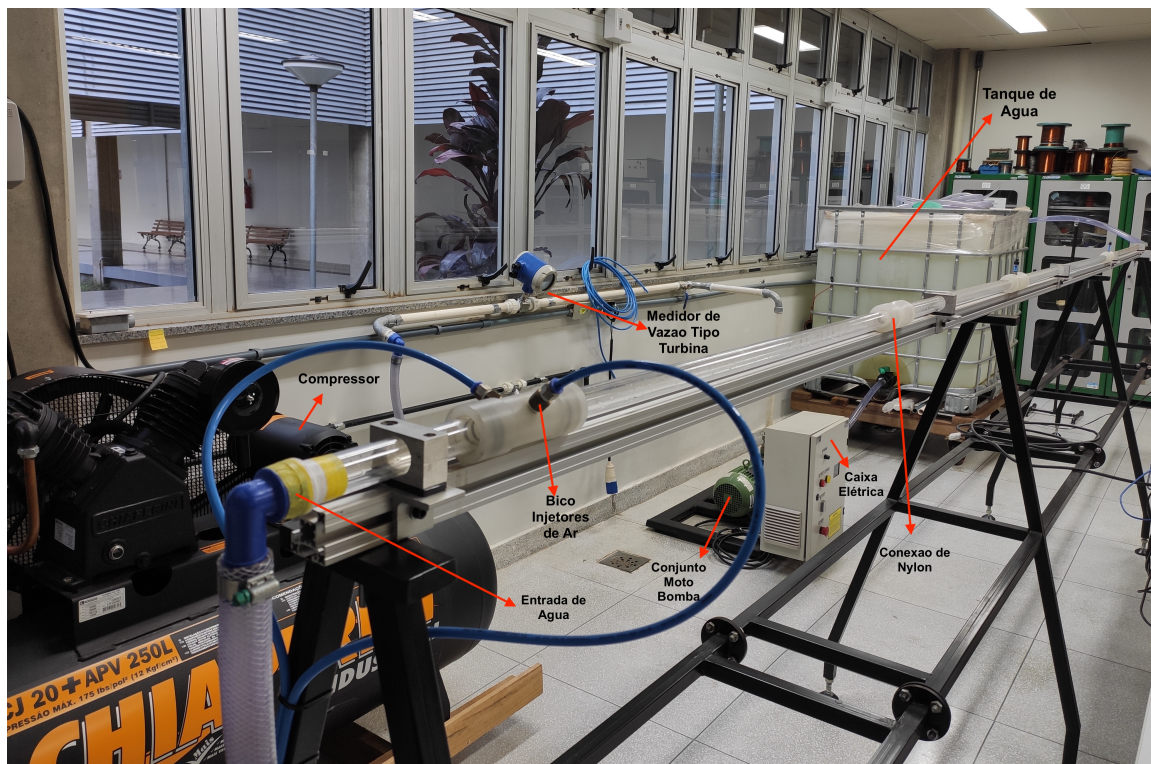


Figura 31 – Visão Geral da Bancada Experimental

### 4.3 Medidor de Vazão Tipo Turbina

Para a realização desse trabalho, é de grande importância o entendimento do princípio de funcionamento dos medidores de vazão tipo turbina instalados na linha de gás e água.

A escolha de um medidor de vazão deve levar em conta, os critérios do projeto, como a incerteza exigida, faixa de medição, custo, complicações, facilidade de leitura e tempo de vida em uso. Desse modo, existem vários tipos de medidores como: de restrição, de vazão linear ou de deslocamento positivo (FOX et al., 2018).

No caso da bancada experimental, foi optado pelo uso de um medidor linear do tipo medidor de turbina, no qual a saída é proporcional a vazão, sem a necessidade de medição do diferencial de pressão (FOX et al., 2018). O medidor escolhido possui um rotor com liberdade de movimento, com palhetas, montado no centro de uma seção cilíndrica e será responsável pela medição monofásica do gás e do líquido.

Para que a medição seja feita de forma correta, é preciso que o rotor seja montado de forma perpendicular ao fluxo. A medição começa a partir do momento em que o fluido impulsiona o rotor, transferindo energia cinética, o que o faz girar em uma velocidade angular definida. Essa velocidade será diretamente proporcional ao fluxo e pode ser medida por um sensor mecânico ou elétrico (DAMASCENO et al., 2006). Na Figura 32, um esquemático do princípio de funcionamento de um rotor presente em um medidor de vazão linear.

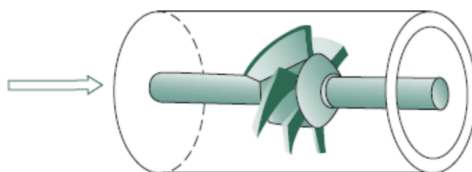


Figura 32 – Representação de um Medidor de Vazão do Tipo Turbina (FOX et al., 2018)

No caso do modelo utilizado no trabalho, do fabricante RUCKEM, o sensor elétrico realiza a medição da velocidade de rotação do rotor e envia a informação para um módulo eletrônico que indicará a vazão e o volume totalizado em unidade de engenharia, além de oferecer algumas opções de saída, como pulsos por unidade de volume, um sinal analógico de 4 a 20 mA proporcional à vazão, alarmes para vazão alta e/ou baixa ou para volume (batelada), e a possibilidade de Comunicação Serial RS-485. O medidor e fonte utilizados no laboratório encontram-se na Figura 33.



Figura 33 – Medidor Rucken e Fonte de Alimentação

Na Tabela 5, são apresentados os dados técnicos dos dois modelos utilizados, sendo instalado o modelo TCM – 1/2" na linha de gás e o TCM - 1" na linha de água.

Tabela 5 – Dados Técnicos do Medidor de Vazão Tipo Turbina.

Código TCM	DN	Faixa de Medição (m <sup>3</sup> /h)	
		Líquido	Gás
12	1/2"	0,288 - 2,34	1,31 - 8,7
25	1"	0,81 - 13,8	4,05 - 80,5

Fonte: Adaptado (RUCKEN, 2019)

Para realizar a alimentação dos medidores, é necessário o uso de uma fonte de 24Vcc e 20mA. Assim, foi escolhida uma fonte chaveada de 24Vcc e 1A, para alimentação dos dois medidores. Abaixo, o diagrama elétrico fornecido pelo fabricante.



Figura 34 – Dados Técnicos do Medidor de Vazão Tipo Turbina. (RUCKEN, 2019)

## 4.4 Manômetro de Tubo em U

A pressão é uma grandeza importante na Mecânica dos Fluidos e muitas vezes, sua medição é feita por meio de um valor referencial. Portanto, dependendo do referencial adotado, é possível ter pressão absoluta, pressão manométrica, pressão diferencial e pressão de vácuo.

Assim, a pressão em um ponto qualquer em um fluido pode ser nomeada por pressão absoluta ou pressão manométrica, sendo que a pressão absoluta será sempre positiva e possui como referência a pressão zero absoluta, ao passo que a pressão manométrica pode ser positiva ou negativa e é medida em relação a pressão atmosférica total. Para os casos em que a pressão manométrica é negativa, chama-se esta de pressão de vácuo. Por fim, a pressão diferencial é usada para medir a diferença de pressão entre dois recipientes ou dois pontos em um dado fluido (MORAN MICHAEL J.; SHAPIRO, 2005).

Neste trabalho, optou-se pelo uso de um Manômetro de Tubo em U, com o intuito de medir o diferencial de pressão entre dois pontos, que encontram-se presentes na linha de escoamento de sistema bifásico água-ar. Os pontos de tomada de pressão do tubo encontram-se separados por uma distancia de 2,1m, representada na Figura 35 pela letra d.

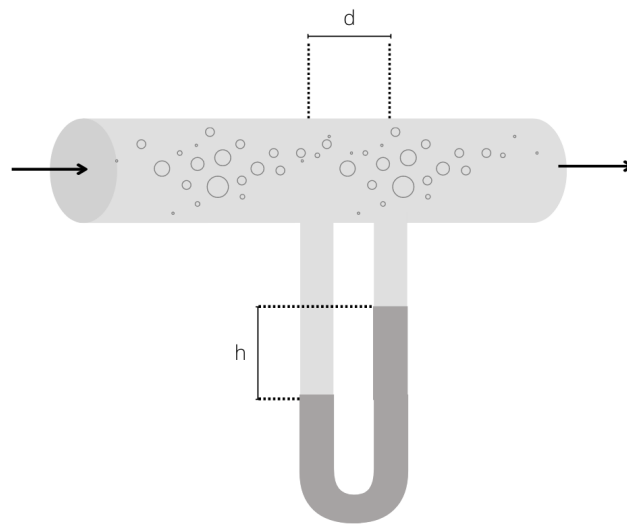


Figura 35 – Representação do Manômetro em U na Linha de Escoamento

Para o cálculo do diferencial de pressão utilizando o manômetro em U, faz-se uso da equação abaixo, na qual  $\rho$  representa a massa específica do fluido manométrico e  $h$  é a diferença entre a altura das colunas desse fluido:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h \quad (4.1)$$

O fluido manométrico utilizado foi o mercúrio e a menor medida de comprimento presente na régua é de 1mm, como é possível observar na Figura 36 abaixo.



Figura 36 – Manômetro em U utilizado



## 5 Procedimento Experimental

Para a realização do ensaio experimental em laboratório, além da montagem da bancada experimental, foram realizadas algumas etapas anteriores ao ensaio. Inicialmente, foram feitas as devidas medidas para garantir que não haveria vazamentos nas linhas de fluidos. Portanto, realizou-se a desmontagem da tubulação e em seguida, sua montagem eliminando os possíveis locais de escape de fluidos.

Em segundo plano, surgiu um empecilho referente ao eixo da bomba, que encontrava-se travado. Assim, foi feita uma limpeza das partes móveis da bomba, assim como a sua lubrificação e destravamento do eixo.

Em seguida, foi feita a limpeza do tanque de água para retirada de impureza e uma limpeza da linha de água, para retirar possíveis ferrugens, provenientes da motobomba e da água acumulada. Essa limpeza fez-se necessária para prevenir danos ao rotor presente no Medidor Tipo Turbina e garantir que não aconteçam certos problemas, como prejuízos a maquinários e interferência nas medições.

Após os passos acima, foi escrito no software MATLAB, um código para reprodução do mapa de Mandhane *et al.* (1974) com unidades de velocidade superficial em m/s. Nele é possível observar de maneira simples, os limites de velocidade para cada perfil de escoamento. O mapa gerado encontra-se na Figura 37.

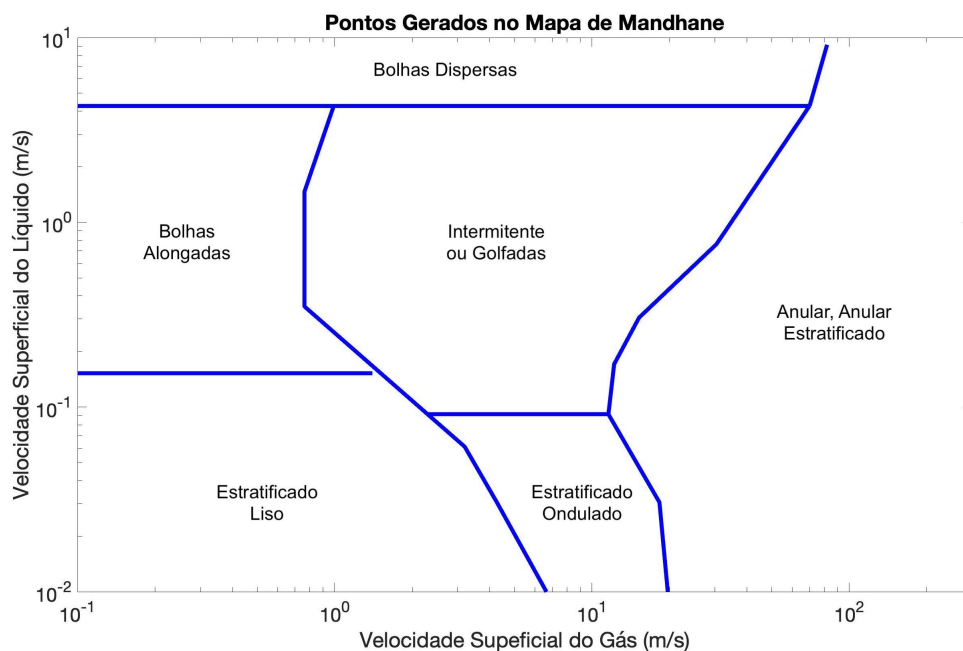


Figura 37 – Reprodução do Mapa

O mapa foi uma ferramenta na hora da produção do experimento, uma vez que de

posse dos limites de velocidade apontados pelas coordenadas do mapa, foi realizada uma análise do máximo e mínimo de dados de vazão para cada perfil de escoamento. Assim, na primeira coleta de dados, para análise dos padrões, utilizou-se o intervalo de valores de vazão, que foram impostos no compressor e motobomba a fim de garantir a visualização de cada perfil. Após o sistema entrar em regime premante, foram coletados os valores de vazão monofásica. Na sequência, para o cálculo da velocidade superficial, foram inseridos no código presente no Apêndice B, os valores coletados, que tinham como intuito calcular a velocidade superficial e reproduzir o Mapa de Mandhane.

Em continuidade, para a coleta de dados de pressão diferencial, buscou-se garantir que o manômetro encontrava-se instalado sem desníveis. Para tal, foi utilizado um medidor de nível bolha. O passo seguinte foi conectar o medidor na linha de escoamento, e com o intuito de diminuir possíveis erros de medição, inseriu-se na mangueira do medidor uma certa quantidade de água, com o uso de uma seringa, a fim de retirar o ar presente. Por fim, foi conferido se as colunas de mercúrio estavam no mesmo nível.

Durante a coleta dos dados de pressão, foi feito, novamente, o uso dos limites de velocidade do gráfico de Mandhane e suas respectivas vazões monofásicas, com a finalidade de impor o Perfil de Escoamento de Bolhas Dispersas.

Após certo tempo de experimento, os valores de vazão do gás e líquido se mantiveram estáveis, em regime permanente, variando na ordem de  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que permitiu a coleta de dados, de modo que para cada par de vazão de gás e líquido, mediu-se de dois a três valores de altura de coluna de líquido, desses dados foi tirada uma média aritmética.

## 5.1 Metodologia de Ensaio

Para realização do ensaio em laboratório, o roteiro presente abaixo foi elaborado. Vale ressaltar que as medições para a análise de padrão de escoamento e de diferencial de pressão foram realizadas em dias diferentes. Em ambas foi respeitado o tempo de estabilização de leitura dos Medidores Tipo Turbina, antes de iniciar a coleta de dados de vazão, para garantir o regime permanente. Abaixo, o passo a passo para o ensaio de padrão de escoamento.

- Passo 1: Encher o reservatório de água e deixar a tampa superior aberta;
- Passo 2: Ligar a fonte de alimentação dos Medidores Tipo Turbina;
- Passo 3: No quadro elétrico do laboratório, ligar o disjuntor do sistema moto-bomba;
- Passo 4: Verificar todas as conexões do sistema de água e abrir as válvulas presentes no sistema;

- Passo 5: Acionar o sistema moto-bomba, com uma vazão reduzida;
- Passo 6: Verificar as conexões do sistema de ar;
- Passo 7: Abrir todas as válvulas do sistema de ar, com exceção da válvula localizada após a saída do compressor, esta deve ter uma abertura parcial;
- Passo 8: Ajustar o sistema moto-bomba para a velocidade desejada;
- Passo 9: Ligar o compressor, monitorando a pressão;
- Passo 10: Ajustar a válvula de regulação de vazão, afim de obter a vazão desejada;
- Passo 11: Esperar o sistema atingir o regime permanente;
- Passo 12: Ao terminar as medições, desligar o compressor e a bomba, assim como os respectivos disjuntores, no quadro elétrico;
- Passo 13: Fechar as válvulas e fazer a limpeza da linha de escoamento;

No que tange ao ensaio de diferencial de pressão, acrescenta-se após o passo 1 os seguintes procedimentos:

- Passo 2: Inserir água, por meio de uma seringa, na mangueira do Manômetro;
- Passo 3: Conectar o Manômetro em U nos pontos de tomada de pressão, presentes nas conexões de nylon;
- Passo 4: Garantir que as colunas de mercúrio do monômetro se encontram no mesmo nível, por meio de um medidor de nível bolha;

Por fim, da-se continuidade a sequência de etapas presentes na primeira listagem.



## 6 Resultados e Discussão

No que tange aos resultados deste trabalho, foi realizada a coleta de dados de vazão, disponíveis por meio dos Medidores Tipo Turbina, assim como a coleta de altura de coluna de líquido. Buscou-se coletar 4 medições de vazão para cada perfil de escoamento horizontal, três pares de medição de vazão para o cálculo de diferencial de pressão e sete valores de altura de coluna de líquido.

Em seguida, o cálculo da velocidade superficial de cada fase foi feito, por meio de um código no software MATLAB, que reproduzia o mapa de Mandhane *et al.* (1974). Tais dados e código encontram-se disponíveis no Apêndice A e B, respectivamente. Além disso, foram realizadas algumas fotos para melhor visualização de cada perfil. Por fim, o cálculo de diferencial de pressão teórico foi feito também pelo software MATLAB e encontra-se no Apêndice D.

Na Figura 38, a reprodução do mapa de Mandhane *et al.* (1974), com seus limites de transição representados pelas linhas azuis, os dados de vazão coletados para validação dos perfis, ilustrados pelos pontos laranjas e os dados de vazão para análise de diferencial de pressão em cor rosa.

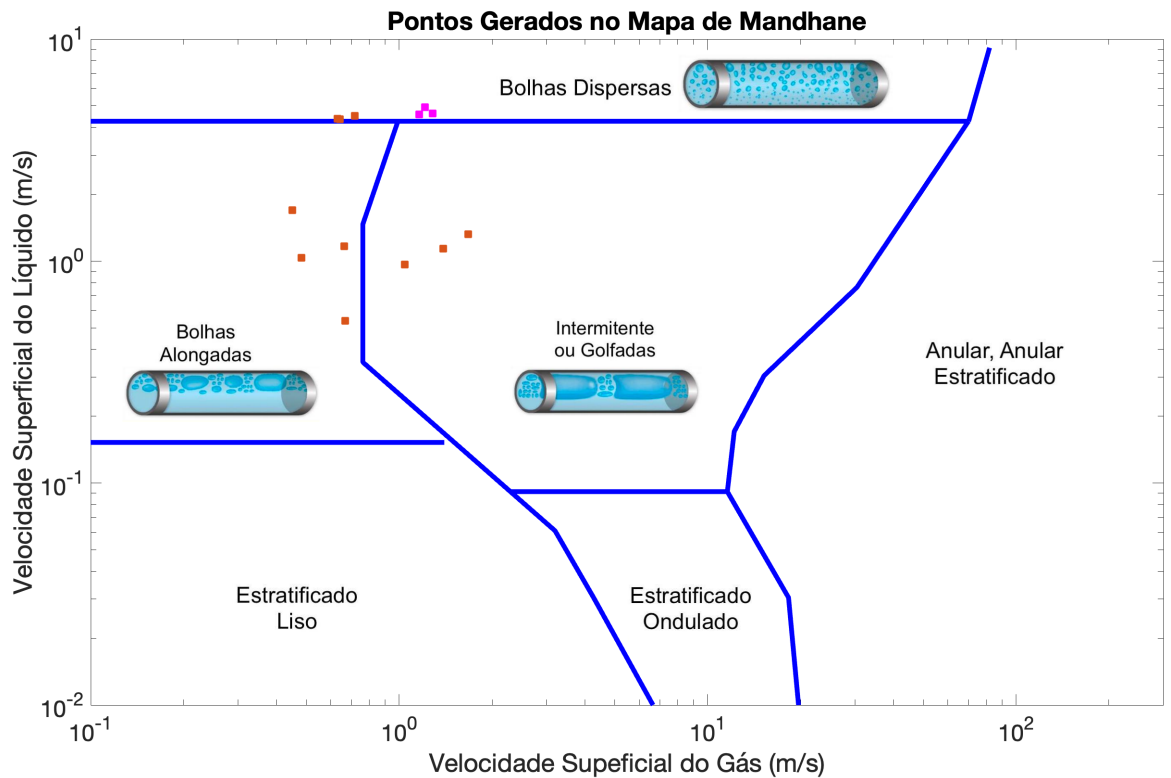


Figura 38 – Dados de Vazão Coletados no Mapa

## 6.1 Padrões de Escoamento

Como visto acima, foram coletados dados para os perfis de Bolhas Dispersas, Bolhas Alongadas e Intermitente. Os perfis Estratificado Liso, Estratificado Ondulado e Anular não foram observados durante a realização do ensaio.

Tal fato se deve a uma sequência de fatores: no perfil Estratificado Liso as velocidades de gás e água, assim como as suas vazões, são baixas, o que implica na necessidade de um range de leitura mínimo de vazão baixo, uma limitação na qual os medidores de Vazão Tipo Turbina possuem, nesse caso. Vale destacar, que esse perfil é pouco recorrente na indústria petrolífera, uma vez que quando temos vazões de gás e líquidos baixas, o fator recuperável do poço diminui, o que geralmente, torna a receita proveniente da venda do petróleo insuficiente para cobrir as despesas de manutenção, o que leva ao abandono do poço.

Quanto ao perfil de escoamento do tipo Estratificado Ondulado, apesar de necessitar de baixas vazões de líquido, altas vazões de gás são requeridas, o que torna-se um impedimento para o medidor de Vazão, que possui um range máximo de aproximadamente 4,769m/s, menor que o necessário para a leitura deste perfil, explicação que se estende para o perfil Anular, que possui velocidade superficial de gás elevada.

Analisando os dados coletados, inicialmente, temos o padrão de Bolhas Alongadas. Esse perfil foi de fácil visualização, entretanto, alguns valores de vazão de gás não ficam dentro do range do medidor, devido a limitação do equipamento. Na Figura 39, uma foto do perfil coletado na bancada.

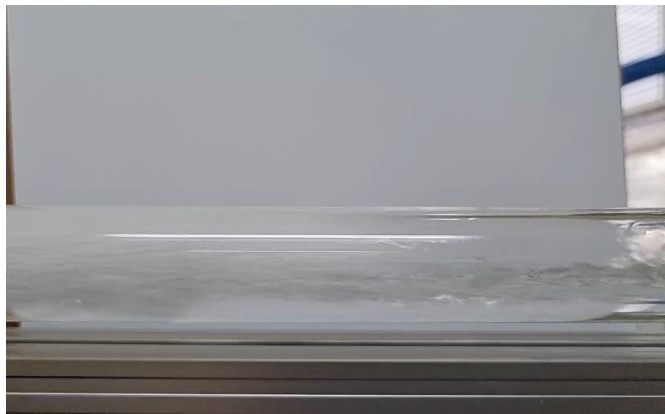


Figura 39 – Perfil de Bolhas Alongadas

O segundo perfil com dados coletados, foi o de Bolhas Dispersas. Para tal, foram impostas altas vazões de líquido, chegando ao máximo de aproximadamente  $9,0m^3/h$ , em consequência do excesso de pressão no sistema de água, o que impediu o funcionamento pleno da bomba em maiores vazões. Já as vazões de gás foram limitadas pelo filtro de ar, o que causou um range de dados com baixos valores. Apesar dos pontos levantados, foi

possível observar o perfil de Bolhas Dispersas de Forma plena. Na Figura 40, tem-se a imagem coletada durante a simulação do perfil. A alta velocidade do líquido tornou difícil uma boa captura que evidenciasse as bolhas dispersas na fase contínua.



Figura 40 – Perfil de Bolhas Dispersas

Por fim, os dados de padrão Intermitente, ou Golfadas foram coletados, mantendo os valores dentro do range dos Medidores. A Figura 41 mostra o perfil gerado durante o ensaio.



Figura 41 – Perfil Intermitente

Na análise de dados experimentais, é importante levar em conta a confiabilidade dos equipamentos e os erros aleatórios impostos durante a medição. Assim, uma análise de confiabilidade dos dados coletados foi realizada. O que levou a uma incerteza de 3,95% no cálculo da Velocidade Superficial do Gás e 2,40% na Velocidade Superficial do Líquido, seguindo a especificação dos instrumentos de mediação. A análise de incerteza e a sua metodologia de cálculo encontram-se no Apêndice C.

Ainda sobre os Medidores de Vazão do Tipo Turbina, além da sua faixa de confiabilidade, estes apresentam fatores que influenciam na medição do fluido, como temperatura, viscosidade e pressão. Entretanto, os três parâmetros citados, só se tornam um problema quando a condição ambiente inferida no medidor é diferente daquela na qual, a calibração

do instrumento foi feita, devido ao efeito mecânico causado pela contração ou expansão termal da caixa ou da turbina. Durante o ensaio, não foram impostas valores de pressão, temperatura ou viscosidades que fogem da faixa de calibração dos medidores, realizada pelos fabricantes.

## 6.2 Gradiente de Pressão - Modelo Homogêneo

Com o intuito de implementar o Modelo Homogêneo foi imposto na bancada o Perfil de Escoamento de Bolhas Dispersas. Para tal fez-se necessário a troca do disjuntor presente na Caixa Elétrica, a fim de evitar limitações na corrente elétrica. O perfil de Bolhas Dispersas é aquele que mais se aproxima da modelagem proposta pelo Modelo Homogêneo: a alta vazão de líquido possibilita que o gás se apresente disperso na forma de bolhas, e portanto, ambas as fases viajam a uma mesma velocidade, o que implica em um escoamento homogêneo, ou seja, sem escorregamento, assumindo uma única fase, a qual possui propriedades da mistura.

É certo que o Modelo Homogêneo é mais simples quando comparado a outros modelos mecanicistas. Entretanto, certos problemas relacionados a abordagem mecanicista devem ser levados em consideração e foram relevantes para a escolha do Modelo Homogêneo. Alguns desses problemas são: a necessidade de um grande número de correlações para cada parâmetro e a dependência de um grande número de dados experimentais. Outro ponto refere-se a precisão do diferencial de pressão dos modelos mecanicistas, que depende fortemente das relações empíricas utilizadas, bem como a predição do *Holdup* nos limites de transição entre os padrões (OUYANG; AZIZ, 2000).

Tais pontos, são abordados no artigo feito por Ouyang e Aziz (2000) e como resultado, os autores indicam bom nível de sucesso do Modelo Homogêneo para predizer facilmente, um escoamento bifásico, líquido-gás em tubulações com saída e entrada de fluido pela parede. Tal fato demonstra um bom nível de confiabilidade do Modelo utilizado neste trabalho.

Quanto aos valores de diferencial de pressão para o Modelo Homogêneo, para o cálculo teórico foi implementada a equação 3.90 em um código no software MATLAB, onde os valores de entrada referiam-se aos dados de Vazão Volumétrica monofásica. O código e os dados de vazão encontram-se respectivamente, no Apêndice D e A. Os parâmetros dos fluidos utilizados estão representados na Tabela 6.

Já os dados experimentais de diferencial de pressão foram obtidos por meio de um Manômetro em U. Os valores de pressão teóricos e experimentais encontram-se na Tabela 7 para comparação.



Tabela 6 – Propriedades dos Fluidos

Massa Específica da Água ( $kg/m^3$ )	997
Massa Específica do Ar ( $kg/m^3$ )	1,184
Viscosidade Dinâmica da Água ( $N.s/m^2$ )	0,000893
Viscosidade Dinâmica do Ar ( $N.s/m^2$ )	0,0000184
Velocidade do Som na Água ( $m/s$ )	340
Velocidade do Som no Ar ( $m/s$ )	1435
Gravidade ( $m/s^2$ )	9,8
Rugosidade da Tubulação	0,000005

Tabela 7 – Dados de Pressão Diferencial Teórico e Experimental

dP Teórico (mbar)	dP Experimental (mbar)
41,949	39,534
44,180	40,876
49,687	43,853

Realizando uma análise comparativa entre os dados teóricos e experimentais, observa-se que os valores teóricos encontram-se sempre acima dos valores experimentais, conforme representado na Figura 42.

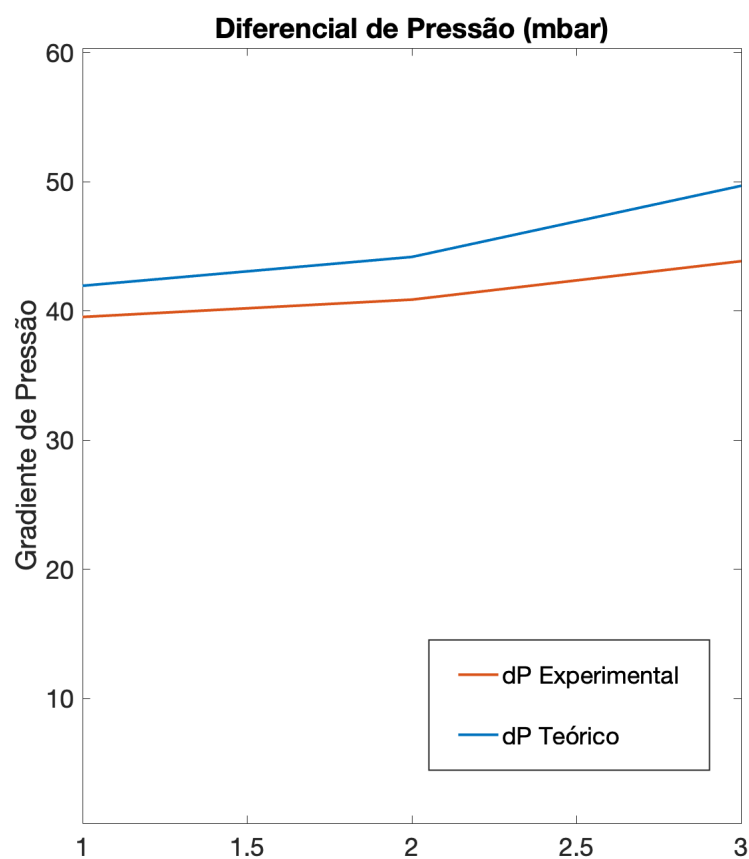


Figura 42 – Comparação Entre o Comportamento dos Dados de Pressão

Tal comportamento, era esperado, visto que o Modelo Homogêneo considera o escoamento como monofásico e usa as médias de propriedade de cada fase. Entretanto, o percentual de diferença entre os valores fica entre 5,7% e 11%, intervalo aceitável quando os erros experimentais são levados em consideração. Tendo em vista a diferença de valores, foi realizada uma análise de confiabilidade para os dados de pressão experimentais, o que resultou em um percentual de incerteza de 1,68%. O cálculo dos erros experimentais para o gradiente de pressão encontra-se no Apêndice C.

Entretanto, o valor de incerteza acima faz referência apenas ao erro do instrumento. Assim, é preciso levar em conta o Erro de Paralaxe das medições coletadas no Manômetro em U com escala, para a medição do diferencial de pressão.

Além da variável de pressão, outros parâmetros como *Holdup*, Número de Reynolds, Vazão Mássica, Fator de Fricção e Massa Específica da Mistura foram calculados por meio das definições de escoamento multifásico, presentes respectivamente em 3.87, 3.24, 3.11, 3.68 e 3.50. Tais parâmetros encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados Modelo Homogêneo

Ponto	<i>Holdup</i>	Número de Reynolds	Vazão Mássica da Mistura ( $kg/s$ )	Fator de Fricção	Massa Específica da Mistura ( $kg/m^3$ )
1	0,7829	562825,629	2,3381	0,00316	780,84
2	0,7975	593141,617	2,3131	0,00313	795,36
3	0,8028	654948,681	2,4932	0,00310	800,68

O *Holdup* apresenta valores próximos a um, o que era esperado, conforme descrito na teoria deste trabalho: quanto maior a vazão mássica de líquido, maior será o valor do *Holdup*. Ademais, ao observar a regressão linear presente na esquerda da Figura 43, é possível perceber um comportamento ascendente da reta de regressão conforme ocorre o acréscimo da vazão mássica de líquido. Ao observar o gráfico da direita, o comportamento da reta mostra-se inversamente proporcional: quanto maior a vazão mássica do gás, menor o valor do *Holdup*.

Quanto ao Número de Reynolds os valores encontrados indicam escoamento turbulento, sem um comportamento linear das fases. Quanto ao fator de fricção, seu valor pode variar de 0 até 0,1 e dependerá do Número de Reynolds e da rugosidade da tubulação, que neste caso é de 0,000005. Os valores teóricos calculados encontram-se na faixa de 0,03, que apresenta conformidade com a literatura.

Na sequência, nota-se que a Massa Específica apresenta valores elevados, uma vez que o componente gasoso é menor que o líquido. Fato que pode ser confirmado pelos gráficos presentes na Figura 44. A reta na esquerda possui comportamento ascendente, o que implica afirmar que a massa específica da mistura é diretamente proporcional a vazão mássica da água. Por outro lado, pelo gráfico da direita, percebe-se que quanto

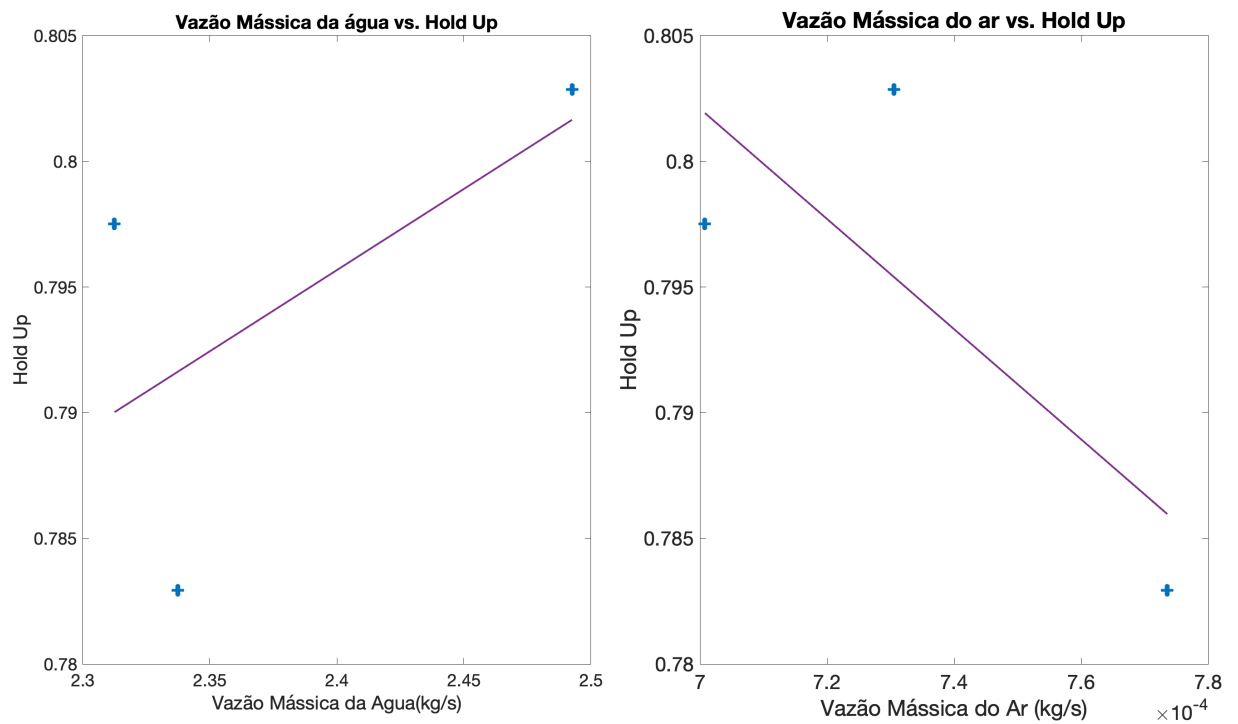


Figura 43 – Comportamento do *Holdup*

maior a vazão mássica do gás, menor a massa específica da mistura. O comportamento apresentado deve-se a grande diferença entre as massas específicas do ar e da água.

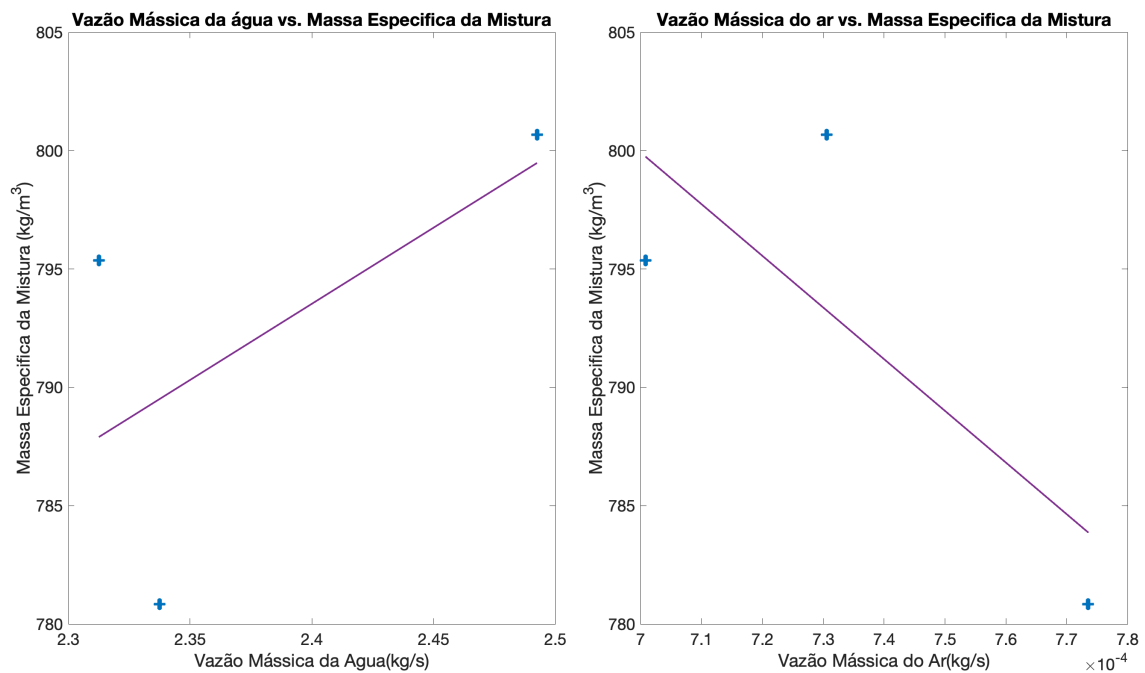


Figura 44 – Comportamento da Massa Específica da Mistura

Ao se comparar o comportamento das variáveis referentes ao diferencial de pressão experimentais com os dados de Bolhas Dispersas presentes no trabalho feito por Kilmer (2020), é possível constatar uma semelhança na tendência dos valores encontrados. O trabalho citado, apresenta relações entre Vazão Mássica e *Holdup* além de mostrar a dependência entre Massa Específica e Vazão Mássica. Tais relações foram observadas de forma semelhante neste trabalho.

Todavia é importante atentar que o diferencial de pressão para o Perfil de Bolhas Dispersas é elevado em função do alto gradiente gravitacional e de fricção. Assim, pensando no escoamento multifásico petrolífero, do ponto de vista de perda de carga, operar uma *flowline* com Perfil de Escoamento de Bolhas Dispersas, não é vantajoso, devido ao aumento da parcela de fricção. Logo, o padrão de escoamento mais interessante do ponto de vista de menor perda de carga, está entre o Perfil Intermitente e Anular (ANDREOLLI, 2016).

Por fim, a viscosidade dinâmica e a vazão volumétrica do líquido são variáveis que influenciarão o escoamento petrolífero: quando é aumentada a viscosidade, ocorre o aumento das perdas por fricção, o que implica em uma maior perda de carga, uma vez que esta variável influencia no cálculo do fator de atrito. O mesmo raciocínio pode ser feito para a vazão do líquido, que ao ser elevada implica na elevação da velocidade das fases e no aumento da perda de carga por fricção, pois eleva-se o valor do fluxo mássico. Portanto, ao utilizar um modelo para um determinado escoamento em um poço é necessário que este seja adequado para o fluxo, para as propriedades do óleo e para o tempo de vida do poço.

## 7 Conclusão

O trabalho em questão foi composto por várias etapas de processo. A primeira dela referiu-se a aquisição de materiais e equipamentos, tal fase, requiriu bastante tempo, pois necessitou-se de serviços terceirizados, contatos com a assistência técnica e a possibilidade de indisponibilidade de certos produtos no mercado.

Outra dificuldade encontrada foi referente a viabilidade financeira para a aquisição de certos equipamentos. Paralelamente, alguns problemas técnicos surgiram durante o trabalho, o que demandou mais tempo devido aos reparos necessários. Por fim, durante ao estágio final, ocorreram contratemplos relacionados a compra do Medidor de Diferencial de Pressão Digital, pois o equipamento não chegou a tempo para realização do experimento, o que implicou no uso de um Manômetro em U. Tais pontos foram empecilhos para o escopo do projeto e foram considerados durante a produção deste estudo.

No geral, este trabalho procurou realizar uma análise qualitativa do perfil de escoamento bifásico água-ar. Para tal, foi realizada a coleta dos dados de vazão monofásicos de forma a se obter valores de Velocidade Superficial, o que foi feito de forma satisfatória, conforme presente no objetivo específico. Em seguida, foi possível reproduzir o modelo proposto de Mandhane *et al.* (1974) para certos perfis de escoamento de forma a observar tais valores no Mapa de Escoamento e de forma visual na bancada experimental. Apesar de certos perfis não serem vistos, a análise dos dados dos perfis coletados mostrou-se com boa confiabilidade e coerente ao Padrão de Escoamento esperado no mapa.

Concomitantemente, o estudo procurou utilizar o Modelo Homogêneo para análise comparativa de perda de carga entre dados teóricos e experimentais. Para tal, foram coletados valores de diferencial de pressão experimentais, juntamente com seus respectivos valores de vazão monofásica, que foram utilizados no cálculo do diferencial de pressão teórico. Como resultado, a comparação entre os valores experimentais e teóricos foram satisfatórios. Constatou-se que o escoamento encontra-se em regime turbulento e que a massa específica da mistura é inversamente proporcional a vazão mássica do componente gasoso. Além disso, o *Holdup* mostrou-se diretamente proporcional ao fluxo mássico da fase líquida, como era esperado para o Modelo Homogêneo. Bem como, a viscosidade dinâmica e a vazão volumétrica do líquido se mostraram fatores de influência no escoamento multifásico.

## 7.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Diante dos pontos levantados e das dificuldades encontradas durante a execução do trabalho em questão, para futuros ensaios, que terão como objetivo a análise de escoamento multifásico, propõe-se:

- Coletar dados de outros padrões de escoamento para compreender o comportamento do Modelo Homogêneo para diferentes condições;
- Substituir o líquido por outros com diferentes viscosidades dinâmicas, a fim de estudar o comportamento do componente friccional;
- Aplicar outros Modelos de Perda de Carga, a fim de entender o modelo que mais se adapta a cada padrão;
- A nível de pós-graduação é possível fazer o uso de ferramentas computacionais com modelos mecanicistas como o software OLGA;

# Referências

- ANDREOLLI, I. *Introdução a elevação e Escoamento Monofásico e Multifásico de Petróleo*. [S.l.]: Editoria Interciência Ltda., 2016. Citado 17 vezes nas páginas 11, 21, 22, 27, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 43, 44, 48, 49 e 82.
- ARPREX. *Arprex Instruções de Uso AIR FIL 1*. [S.l.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 61.
- AZIZ, K.; GOVIER, G. W. Pressure drop in wells producing oil and gas. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, OnePetro, v. 11, n. 03, 1972. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 33.
- BAI, Y.; BAI, Q. *Sistemas Marítimos de Produção de Petróleo: Processos, Tecnologias e Equipamentos Offshore*. 1 edição. ed. [S.l.]: Elsevier, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 28, 30 e 32.
- BAKER, O. Design of pipelines for the simultaneous flow of oil and gas. v. 1, p. 323–G, 1952. Disponível em: <<https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings/53FM/All-53FM/SPE-323-G/155222>>. Citado 6 vezes nas páginas 22, 23, 35, 44, 45 e 46.
- BEGGS, D. H.; BRILL, J. P. A study of two-phase flow in inclined pipes. *Journal of Petroleum technology*, OnePetro, v. 25, n. 05, p. 607–617, 1973. Citado 3 vezes nas páginas 23, 33 e 49.
- BRILL, J. P. Multiphase flow in wells. *Journal of petroleum technology*, OnePetro, v. 39, n. 01, p. 15–21, 1987. Citado na página 35.
- CHIAPERINI. *Ficha Técnica CJ 20 + APV 250L*. [S.l.], 2020. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 60.
- DAMASCENO, M. A. et al. Parâmetros que influenciam na medição de petróleo por medidores do tipo turbina. v. 49, p. 65–72, 2006. Disponível em: <[https://www.ipen.br/biblioteca/cd/metrosul/2004/anais/MetrosullV\\_4196.pdf](https://www.ipen.br/biblioteca/cd/metrosul/2004/anais/MetrosullV_4196.pdf)>. Citado na página 67.
- DAVIDSON, J.; SAVIC, D.; WALTERS, G. Approximators for the colebrook-white formula obtained through a hybrid regression method. 2000. Citado na página 55.
- FOX, R. W. et al. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Grupo GEN, 2018. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521635000>>. Citado 6 vezes nas páginas 12, 43, 50, 51, 53 e 67.
- GOVIER, G.; OMER, M. The horizontal pipeline flow of air-water mixtures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Wiley Online Library, v. 40, n. 3, p. 93–104, 1962. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- HOOGENDORN, C. J. Gas-liquid flow in horizontal pipes. v. 9, p. 205–217, 1959. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000925095985003X>>. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 45 e 46.

MANDHANE, J.; GREGORY, G.; AZIZ, K. A flow pattern map for gas—liquid flow in horizontal pipes. *International journal of multiphase flow*, Elsevier, v. 1, n. 4, p. 537–553, 1974. Citado 14 vezes nas páginas 11, 19, 23, 24, 44, 45, 46, 47, 59, 60, 62, 71, 75 e 83.

MARTINELLI, R.; LOCKHART, R. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chemical Engineering Progress*, v. 45, n. 1, p. 39–48, 1949. Citado na página 49.

MORAN MICHAEL J.; SHAPIRO, H. N. M. B. R. D. D. P. *Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos*. [S.l.]: Grupo GEN, 2005. Citado na página 69.

MUKHERJEE, H.; BRILL, J. P. Liquid holdup correlations for inclined two-phase flow. *Journal of Petroleum Technology*, OnePetro, v. 35, n. 05, p. 1003–1008, 1983. Citado 3 vezes nas páginas 23, 33 e 42.

OLIVEIRA, K. F. *Previsão do Gradiente de Pressão em Escoamento Bifásico Horizontal Ar-Água*. 2020. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/28506>>. Citado 4 vezes nas páginas 11, 59, 63 e 82.

OUYANG, L.-B.; AZIZ, K. A homogeneous model for gas—liquid flow in horizontal wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, v. 27, n. 3-4, p. 119–128, 2000. Citado na página 78.

PETROBRAS. *Unidade de Operações e Exploração da Bacia de Santos*. 2018. Disponível em: <[https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/sites/default/files/Apresentacao\\_AP\\_ET3\\_PB\\_Caragua.pdf](https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/sites/default/files/Apresentacao_AP_ET3_PB_Caragua.pdf)>. Citado 4 vezes nas páginas 11, 21, 28 e 31.

QUELHAS, A. D. et al. *Processamento de petróleo e gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímica, meio ambiente*. 2 edição. ed. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2014. Citado na página 33.

ROSA, E. S. *Escoamento Multifásico Isotérmico*. [S.l.]: Artmed Editora S.A, 2012. Citado na página 35.

RUCKEN. *Série TCM Medidor de Vazão Tipo Turbina*. [S.l.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 68.

SAMPAIO, P. A. de; FACCINI, J. L.; SU, J. Modelling of stratified gas—liquid two-phase flow in horizontal circular pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, v. 51, n. 11-12, p. 2752–2761, 2008. Citado na página 21.

SCHNEIDER. *Curva Característica/Curva de Desempenho*. [S.l.], 2020. Citado na página 62.

SCOTT, D. S. Properties of cocurrent gas-liquid flow. Elsevier, v. 4, p. 199–277, 1964. Citado na página 22.

SHOHAM, O. *Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes*. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2006. Citado 6 vezes nas páginas 11, 48, 49, 51, 55 e 57.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2 edição. ed. [S.l.]: Editora Interciência Ltda., 2004. Citado 5 vezes nas páginas 11, 22, 27, 29 e 33.



---

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos Fundamentos e Aplicações*. [S.l.]: AMGH Editora Ltda., 2007. Citado 3 vezes nas páginas 11, 39 e 40.



# APÊNDICE A – Dados Coletados

<b>Dados de Vazão</b>	
Vazão Gás ( $Q_G$ ) [ $m^3/h$ ]	Vazão Líquido ( $Q_L$ ) [ $m^3/h$ ]
1,90	1,76
2,53	2,08
3,05	2,14
1,17	7,96
1,15	7,99
1,15	8,0
1,31	8,23
1,22	0,98
0,88	1,89
1,21	2,13
0,82	3,09
<b>Dados de Vazão para Cálculo Teórico de dP</b>	
Vazão Gás ( $Q_G$ ) [ $m^3/h$ ]	Vazão Líquido ( $Q_L$ ) [ $m^3/h$ ]
2,12	8,35
2,34	8,44
2,21	9,0
Altura Manométrica (m)	Média Aritmética da Altura (m)
0,031	0,03076
0,0308	
0,0305	
0,030	0,02975
0,0295	
0,0325	0,033
0,0335	
<b>Dados de Velocidade Superficial Calculados no MATLAB</b>	
Velocidade do Gás ( $U_{SG}$ ) [m/s]	Velocidade do Líquido ( $U_{SL}$ ) [m/s]
1,0416	0,9648
1,3869	1,1403
1,6720	1,1732
0,6414	4,3637
0,6304	4,3801
0,6304	4,3856
0,7181	4,5117
0,6688	0,5372
0,4824	1,0361
0,6633	1,1677
0,4495	1,6939

Tabela 9 – Dados de Vazão Coletados



# APÊNDICE B – Código do Mapa de Mandhane

```

clc;
clear all;
close all;

%Dados da Tabela 2 de Mandhane
vazao_gas = [0.03048 1.4];
vazao_gas1 = [2.286 11.65];
vazao_gas2 = [0.03048 70.104];
vazao_gas3 = [10.668 4.2672 3.2004 0.762 0.762 0.9906];
vazao_gas4 = [21.336 18.288 11.5824 12.192 15.24 30.48 70.104];
vazao_gas5 = [70.104 81.9912]
vazao_liquido = [0.1524 0.1524];
vazao_liquido1 = [0.09144 0.09144];
vazao_liquido2 = [4.2672 4.2672];
vazao_liquido3 = [0.003048 0.03048 0.06096 0.35052 1.46304 4.2672];
vazao_liquido4 = [0.003048 0.03048 0.09144 0.170688 0.3048 0.762 4.2672];
vazao_liquido5 = [4.26 9.144];

%Dados de Vazao Coletados(m3/h)
vazaodogas = [1.90 2.53 3.05 1.17 1.15 1.15 1.31 1.22 0.88 1.21 0.82];
vazaodoliquido = [1.76 2.08 2.14 7.96 7.99 8.00 8.23 0.98 1.89 2.13 3.09];

%Calculo da Velocidade em funcao da vazao (1 polegada de diametro)
velocidade_gas = (4*vazaodogas)/(pi*0.0254*0.0254*3600);
velocidade_liquido = (4*vazaodoliquido)/(pi*0.0254*0.0254*3600);

%Plot Inicial para os limites do mapa de Mandhane
figure(1)
loglog(vazao_gas,vazao_liquido,'LineWidth',2 , 'color', 'r');
hold on
loglog(vazao_gas1,vazao_liquido1, 'LineWidth',2, 'color', 'r');
hold on

```

```
loglog(vazao_gas2,vazao_liquido2, 'LineWidth',2, 'color', 'r');
hold on
loglog(vazao_gas3, vazao_liquido3, 'LineWidth',2, 'color', 'r');
hold on
loglog(vazao_gas4, vazao_liquido4, 'LineWidth',2, 'color', 'r');
hold on
loglog(vazao_gas5, vazao_liquido5, 'LineWidth',2, 'color', 'r');
hold on
% Aqui começa os plots dos pontos coletados
plot(velocidade_gas, velocidade_liquido, 's', 'MarkerFaceColor', [0 0.447 0.741]);
xlabel('Velocidade Superficial do Gás (m/s)');
ylabel('Velocidade Superficial do Líquido (m/s)');
title('Pontos Gerados no Mapa de Mandhane');
axis([0.1 300 0.01 10]);
```

# APÊNDICE C – Análise de Incertezas Experimentais

Um método eficiente para avaliar a confiabilidade de valores medidos, é realizar uma mesma medição e repeti-la várias vezes, e analisar os valores obtidos. Entretanto, nem todas as incertezas experimentais podem ser avaliadas apenas pela análise estatística baseada nos dados obtidos, sendo necessário recorrer a análise de incertezas aleatórias ou sistemáticas. Incertezas aleatórias são aquelas que podem ser tratadas de forma estatística, ao passo que as incertezas sistemáticas, não podem.

Na pesquisa experimental em mecânica dos fluidos as medições possuem amostragem simples, ou seja cada medição é verificada poucas vezes.

Considerando uma variável qualquer  $x_i$  que possui uma dada incerteza conhecida por  $\delta x_i$ . A forma como representamos essa variável e a sua incerteza é:

$$x_i = x_i(\text{medido}) \pm \delta x_i \quad (\text{C.1})$$

Na qual, a melhor estimativa de  $x_i$  é dada por  $x_i(\text{medido})$ . Além disso, a incerteza possui como valor 95%, o que representa a probabilidade de  $x_i$  estar entre  $\pm \delta x_i$ . Na equação acima  $x_i(\text{medido})$  representa a medida realizada, em uma amostragem simples, já o valor  $\delta x_i$  é igual a  $2\sigma$ , onde  $\sigma$  é o desvio padrão da população de possíveis medidas, e pode ser calculado a partir do desvio padrão da amostra S, utilizando a distribuição de Student.

Na Distribuição de Student, para encontrar o intervalo de confiança, é necessário a porcentagem da incerteza, o grau de liberdade da amostra, porcentagem unicaudal e a média e desvio padrão amostral. Na Tabela 10 tem-se o intervalo de confiança encontrado, que mostra que existe 95% de chance da média populacional de cada amostra de dados estar entre os intervalos abaixo.

Tabela 10 – Resultado do Intervalo de Confiança de Dados Coletados

Perfil de Escoamento	Fluido	Intervalo de Confiança
Intermitente	Gás	$1,5592 \leq \alpha \leq 3,5008$
Intermitente	Água	$1,5321 \leq \alpha \leq 6,6279$
Bolhas Dispersas	Gás	$1,0472 \leq \alpha \leq 1,2728$
Bolhas Dispersas	Água	$7,8132 \leq \alpha \leq 8,1768$
Bolhas Alongadas	Gás	$0,7352 \leq \alpha \leq 1,3548$
Bolhas Alongadas	Água	$0,7441 \leq \alpha \leq 3,2759$

Podemos representar um resultado  $R$ , na forma de um conjunto de medições feita em um experimento na forma:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{C.2})$$

Para expressar a incerteza no resultado calculado, seguindo a mesma maneira do cálculo das incertezas em cada medida, pode se usar o modelo proposto por Kline e McClintock (1953). Neste, a incerteza do resultado calculado  $R$  pode ser estimada como uma combinação dos efeitos individuais de cada variável sobre o resultado. Assim, se apenas uma variável possui uma incerteza associada a sua medição, a incerteza do resultado calculado devido ao efeito dessa variável, é calculada por:

$$\delta R_{x_i} = \frac{\delta R}{\delta x_i} \cdot \delta x_i \quad (\text{C.3})$$

No qual a derivada parcial de  $R$  em função de  $x_i$  é o coeficiente de sensibilidade da variável  $R$  em relação a  $x_i$ . No caso de existir mais de uma variável independente no cálculo de  $R$ , deve ser combinar as incertezas individuais da seguinte forma:

$$\delta R = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta R}{\delta x_i} \cdot \delta x_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.4})$$

A equação C.4 é válida quando as medições da variáveis são independentes e expressas com a mesma probabilidade. É possível que o resultado calculado  $R$ , seja expresso na forma de um produto das variáveis medidas:

$$R = x_1^a \cdot x_2^b \cdot x_3^c \dots x_n^m \quad (\text{C.5})$$

Neste caso, a incerteza da grandeza calculada  $R$  pode ser dada por:

$$\frac{\delta R}{R} = \left[ \left( a \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left( b \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left( m \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.6})$$

Logo, considerando as incertezas relativas, dadas nas equações presentes em C.7, ao se substituir estas, na equação C6, encontra se uma maneira de representar a incerteza de uma grandeza calculada  $R$  (C.8) em função das incertezas relativas de cada variável independente:

$$\frac{\delta R}{R} = \mu_R \quad e \quad \frac{\delta x_i}{x_i} = \mu_{x_i} \quad (\text{C.7})$$



$$\mu_R = \left[ (a \cdot \mu_{x1})^2 + (b \cdot \mu_{x2})^2 + \dots + (m \cdot \mu_{xn})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.8})$$

Onde as variáveis  $\mu_R$  e  $\mu_{xi}$  representam um valor de incerteza em relação ao valor medido, e portanto essa incerteza será uma fração do valor medido.

## C.1 Análise de Incerteza para a Velocidade Superficial

A equação da velocidade superficial do ar é dada por:

$$U_{SG} = \frac{Q_G}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{C.9})$$

Por tanto, a incerteza associada ao cálculo da velocidade superficial do gás é dada por:

$$u_G = \frac{D^2}{Q_G} \cdot \sqrt{\frac{4Q_G^2 \cdot u_D + D^2 \cdot u_{Q_G}^2}{D^6}} \quad (\text{C.10})$$

Da forma análoga, a incerteza associada a velocidade superficial do líquido é dada por:

$$u_L = \frac{D^2}{Q_L} \cdot \sqrt{\frac{4Q_L^2 \cdot u_D + D^2 \cdot u_{Q_L}^2}{D^6}} \quad (\text{C.11})$$

## C.2 Análise de Incerteza Para o dP Experimental

Sabemos que a representação de uma variável qualquer  $x_i$  possui uma dada incerteza associada a ela dada por  $\delta x_i$ . Assim, para o dP experimental representamos essa variável da seguinte forma:

$$x_i = x_i(\text{medido}) \pm \delta x_i \quad (\text{C.12})$$

Para garantir uma maior confiabilidade de uma medição pode-se realizar uma série de medidas e sob elas aplicar um conceito básico da estatística, a média aritmética. Portanto, partindo da equação C.8, a média aritmética para uma série de variáveis do tipo  $x_i$ , levando em consideração sua incerteza:

$$x_{\text{média}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \pm \frac{\mu_R}{\sqrt{n}} \quad (\text{C.13})$$

### C.3 Precisão dos Instrumentos de Medição

No geral, a precisão de instrumentos utilizados em ensaios experimentais possui valor determinado pelo fabricante, em catálogo. Na Tabela 11, encontra-se a incerteza dos instrumentos.

Tabela 11 – Precisão dos Instrumentos de Medição Segundo os Fabricantes

Variável	Representação	Precisão do Catálogo	Incerteza Relativa
D	Diâmetro da Linha de Escoamento medido com um paquímetro	0,01% sobre o valor lido	$\pm 0,02\%$
$Q_G$	Vazão Volumétrica do Gás	0,1%	$\pm 0,1\%$
$Q_L$	Vazão Volumétrica do Líquido	0,05%	$\pm 0,05\%$
h	Altura da Coluna de Líquido no Manômetro	0,5mm sobre o valor lido	$\pm 0,5\%$

### C.4 Incertezas Experimentais

As incertezas experimentais das variáveis utilizadas se encontram calculadas na tabela abaixo.

Tabela 12 – Incertezas Calculadas durante o experimento

Variável	Incerteza
Velocidade Superficial do Gás	3,95%
Velocidade Superficial do Líquido	2,40%
dP Experimental	1,68%

# APÊNDICE D – Código Modelo Homogêneo

```

clc;
clear all;
close all;

%Código Modelo Homegeneo
%Dados a 25C

rhoagua = 997; %massa especifica da agua em kg/m^3
mi_agua = 8.93 * 10^-4; %viscosidade dinamica da agua em N.s/m^2
rho_ar = 1.184; %massa espezifcia do ar em kg/m^3
mi_ar = 1.84*10^-5; %viscosidade dinamica do ar em N.s/m^2
g = 9.8; %gravidade
comp = 2.1;%comp da tubulação em m
D = 0.0254; %diametro da tubulacao em m
e = 0.000005; %rugosidade relativa da tubulacao de acrilico

%Dados Coletados

Q1_ar = [2.12 2.34 2.21]; %vazao volumetrica do ar [m^3/h]
Q_ar = Q1_ar/3600;
Q1_agua = [8.35 8.44 9.0]; %vazao volumétrica da agua [m^3/s]
Q_agua = Q1_agua/3600;
Q = Q_ar + Q_agua;

%Vazao Mássica

W_ar = Q_ar*rho_ar; %vazao massica do ar [kg/s]
W_agua = Q_agua*rhoagua; %vazao massica do liquido [kg/s]
W = W_ar + W_agua;

%Calculo da Velocidade Superficial

U_sg = 4*Q_ar./((pi*D^2)); % velocidade superficial do ar

```

```

U_sl = 4*Q_agua./((pi*D^2)); %velocidade superficial do liquido
U = U_sl + U_sg; %velocidade superficial da mistura

alpha = U_sg./U; %fracao de vazio
H = 1 - alpha; %holdup

%Fluxo mássico

G_ar = 4*Q_ar.*rho_ar./((pi*D^2)); %fluxo massico do ar (kg/s.m^2)
G_liq = 4*Q_agua.*rhoagua./((pi*D^2)); %fluxo massico do liquido (kg/s.m^2)
G = G_ar + G_liq; %fluxo massico total

%Num de Froud

Fr = U.^2./(g*D); %caracteriza o escoamento em critico, subcritico e supercritico (adime

%Calculo da massa especifica da mistura (kg/m^3)

X = W_ar./W;
rho_m = 1./(((1-X)./rhoagua) + (X./rho_ar));

%Fator de atrito

mi_m = mi_agua*alpha + mi_ar*(1 - alpha); %viscosidade da mistura (N.s/m^2)
Re = D*U.*rho_m./mi_m; %reynolds (adimensional)
a = e/(3.70*D);
b = 5.16./Re;
c = 5.09./(Re.^0.87);

f= (1./(-2*log(a-(b.*log(a+c))))).^2; %fator de atrito para escoamento turbulento

%Numero de Mach

c_ar = 1435; %velocidade do som no ar
c_agua = 340; %velocidade do som na agua
c_m = sqrt(1./(rho_m.*(((1-alpha)./(rhoagua + c_agua^2))+((1-alpha)./(rho_ar+c_ar^2))))))

Ma = U./c_m;

```

---

```
%Gradiente de pressao em Pa (como A_p é cte, dA/dz=0 e X é cte, dX/dz=0)

dp = (((f.*G.^2./(2*rho_m.*D)) + (rho_m.*g*sin(0)))./(1-(Ma).^2.))*comp);

dp_1 = dp.*0.01; %grad teorico em mbar

%pressao colhida na bancada dp_2 e experimental, cor laranja

h = [0.02975 0.03076 0.033]; %em metros
dp_calculado2 = 1.32888*h %dif de pressao em bar
dp_2 = dp_calculado2.*1000; %grad de pressao em mbar

%plots dos dados coletados
%dp2 coletado
%dp1 calculado
tiledlayout(1,2)
nexttile
plot(dp_2, 'LineWidth', 2, 'Color',[0.8500 0.3250 0.0980]);
hold on
plot(dp_1, 'LineWidth', 2, 'Color',[0 0.4470 0.7410]);
ylabel('Gradiente de Pressão', 'FontSize', 30);
title('Diferencial de Pressão (mbar)', 'FontSize', 38);
axis([1 3 0 60]);
ax = gca;
ax.FontSize = 19;
nexttile
plot(H, '+', 'LineWidth', 11, 'Color',[0.4940 0.1840 0.5560]);
xlabel('Pontos', 'FontSize', 30);
ylabel('Holdup', 'FontSize', 30);
title('Calculo do Holdup', 'FontSize', 38);
axis([0 4 0 1]);
ax = gca;
ax.FontSize = 19;
```