

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

JIM CHIEN

ANÁLISE DE ESCOAMENTO ÁGUA-AR EM UM TUBO DE VENTURI

Joinville
2019

JIM CHIEN

ANÁLISE DE ESCOAMENTO ÁGUA-AR EM UM TUBO DE VENTURI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, no curso Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Goes Oliveira.

Joinville
2019

JIM CHIEN

ANÁLISE DE ESCOAMENTO ÁGUA-AR EM UM TUBO DE VENTURI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jorge Luiz Goes Oliveira
Orientador

Prof. Dr. Kleber Vieira de Paiva
Membro

Prof. Dr. Anderson Wedderhoff Spengler
Membro

RESUMO

As medições da produtividade de uma plataforma de petróleo têm grande importância estratégica para a indústria de óleo e gás. A partir de medições precisas em linha, é possível determinar as operações logísticas, além de analisar o controle de produção e estoque, sem a necessidade de separadores de fases para fins de medição. A inserção de equipamentos para análise da produtividade em tempo real pode diminuir consideravelmente o custo operacional de uma plataforma. O presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre medições de escoamento de água e de ar em tubo de Venturi para estimar as vazões de cada fluido. Isso será feito com o modelo de fases separadas onde o domínio em análise será dividido em partes infinitesimais na direção axial ao escoamento. Um algoritmo será desenvolvido para esse propósito a partir das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e de escorregamento entre fases para permitir solução do sistema linear proposto. Os resultados de previsão são comparados a dados gerados por bancada experimental multifásica. Os resultados preliminares obtidos são promissores, porém ressaltam a necessidade de modelagem da perda carga bifásica em geometria convergente-divergente.

Palavras-chave: Escoamento multifásico; Tubo de Venturi; Indústria de Óleo e Gás.

ABSTRACT

The measurement of productivity of an oil platform have a huge strategic importance to Oil&Gas industry. With precise measures inline, it is possible to know how logistics operation will have to work, besides the power to manage production and tanks without the needs of a separator for measurement purposes. Installing a machine that can analyze productivity in real time can reduce considerably the cost of the plataform operation. This graduation project aim to study air-water flow measurements with a Venturi tube and estimate each phase mass flow. In order to do that it will propose a separate phase model where the domain of the analysis will be split in infinitesimals parts in axial direction of the flow. An algoritm will be developed from conservation of mass, momentum and slip between phases that will transform into a linear system. The estimated mass flow are compared with the measurements generated by an experimental multiphase bench. The preliminary results are promising, but it still needs a better two-phase frictional pressure drop model in convergent-divergent geometry.

Keywords: Multiphase flow; Venturi tube; Oil&Gas industry.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais por todo o apoio durante toda a minha vida e especial durante o período do curso.

Ao meu orientador Professor Jorge Luiz, pelo apoio na execução deste trabalho.

Ao grupo T2F, especialmente, Prof. Kleber Paiva, Prof. Anderson Spengler, Juliano, Leonel, Matheus, Ramon e ao ex- membro Rafael, por compartilharem seus conhecimentos.

Aos meus amigos, Daniel, Filipe, Gabriel, Maurício e Raissa.

À minha namorada Maila pelo todo apoio e pela força que me deu.

"Se pude ver mais longe, foi por
estar de pé sobre ombros de
gigantes."

Isaac Newton

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Trajetória do escoamento laminar	15
Figura 2 – Trajetória do escoamento turbulento	15
Figura 3 – Padrão de escoamento horizontal	18
Figura 4 – Mapa de padrões de escoamento horizontal Baker (1954)	19
Figura 5 – Esquemático da bancada de testes multifásica	22
Figura 6 – Esquemático da linha de gás: vista frontal (a) e superior (b)	25
Figura 7 – Esquemático da linha de água: visão frontal (a) e superior (b)	26
Figura 8 – Vista isométrica do misturador	27
Figura 9 – Esquemático da linha trifásica: vista isométrica	27
Figura 10 – Esquemático do tubo de Venturi: vista frontal	28
Figura 11 – Fotografia do tubo de Venturi	28
Figura 12 – Ilustração da programação de blocos e interface no LabVIEW	29
Figura 13 – Ilustração da interface do programa da bancada multifásica em plataforma LabVIEW	30
Figura 14 – Ilustração de elemento Infinitesimal do tubo de Venturi com ínfima variação da seção transversal	31
Figura 15 – Medições de perda de carga em Venturi para escoamentos bifásicos (símbolos). As linhas representam as curvas de pressão obtidas a partir da solução do sistema linear com C_{fit} igual a 2,4.	38
Figura 16 – Fluxograma principal do algoritmo	39
Figura 17 – Parâmetros de entrada do algoritmo de previsão de vazões mássicas	40
Figura 18 – Fluxograma das funções secundárias do algoritmo	41
Figura 19 – Comportamento da curva de pressão estática calculada pelo algoritmo	43
Figura 20 – Curvas de pressão geradas a partir de possíveis combinações de vazão para dados experimentais da primeira linha da Tabela 6	44
Figura 21 – Curva de pressão estática calculada pelo algoritmo para os dados experimentais da última linha da Tabela 6	44
Figura 22 – Curvas de pressão geradas a partir de possíveis combinações de vazão para dados experimentais da última linha da Tabela 6	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais componentes e características referentes à tubulação da bancada multifásica	23
Tabela 2 – Válvulas e filtro da bancada multifásica	24
Tabela 3 – Descrição dos principais equipamentos e componentes da bancada de testes e suas quantidades	24
Tabela 4 – Valores do coeficiente C	37
Tabela 5 – Modificações no coeficiente C na expressão do multiplicador do gás e do líquido	38
Tabela 6 – Medições da bancada de multifásica	42
Tabela 7 – Estimativas de vazão mássica a partir do algoritmo proposto	43
Tabela 8 – Estimativa de Vazão sem Modificação no Coeficiente C	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMU	Capacitance Measurement Unity (Unidade de Medição de Capacitância)
EDO	Equação diferencial ordinária
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
MFM	Multiphase Flow Metering (Medidor de Escoamento Multifásico)
PIV	Particle image velocimetry (Velocimetria por imagem de partículas)
PSHE	Plate and Shell Heat Exchanger (Trocador de calor Casco-Placas)
PVC	Polyvinyl chloride (Policloreto de Vinila)
VFR	Válvulas de fechamento rápido

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino

- A - Area total da secao transversal [m^2]
- B - Coeficientes do sistema linear
- C_f - Coeficiente de friccao
- C_o - Parâmetro de distribuição
- D - Diametro do tubo [m]
- E - Termos independentes do sistema linear
- f - Fator de atrito
- g - Aceleração da gravidade [m/s^2]
- G - Fluxo massico bifásico [$kg/s^{-1}.m^2$]
- M - Transferencia de massa na interface entre os fluidos [kg/s]
- m_t - Vazao massica total do escoamento [kg/s]
- MV - Transferencia de quantidade de movimento na interface entre os fluidos [$kg.m/s$]
- P - Pressao estática [N/m^2]
- r - Raio do tubo [m]
- Re - Número de Reynolds
- t - Tempo [t]
- U - Velocidade do fluido [m/s]
- U_m - Velocidade média da mistura [m/s]
- U_s - Velocidade de escorregamento [m/s]
- X - Parâmetro de Lockhart-Martinelli
- x - Título mássico
- Y - Variáveis dependentes do sistema linear
- z - Comprimento do tubo [m]

Alfabeto grego

- α - Fração de vazio
- θ - Ângulo de inclinação do tubo [$^\circ$]
- λ - Parâmetro de Baker
- μ - Viscosidade dinâmica [$Pa.s$]
- ν - Viscosidade cinemática [m^2/s]
- ρ - Massa específica [kg/m^3]
- σ - Tensão superficial [N/m^2]
- ϕ - Fator de correção de Lockhart-Martinelli
- ψ - Parâmetro de Baker

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	14
1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO TEÓRICA	15
2.1	Escoamento interno	15
2.1.1	Laminar	15
2.1.2	Turbulento	15
2.2	Equação de movimento do fluido	16
2.3	Escoamento multifásico	16
2.3.1	Conceitos básicos	16
2.3.2	Padrões de Escoamento	17
2.3.3	Mapas de padrões	18
2.4	Medidores de vazão	20
2.5	Medidores de pressão	20
2.6	Medição de escoamentos bifásicos	20
2.7	Método de Runge-Kutta	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	Componentes da bancada	23
3.1.1	Tubulações, flanges, cotovelos e junções	23
3.1.2	Válvulas e filtro	23
3.1.3	Equipamentos	24
3.2	Linha de ar	24
3.3	Linha de água e de óleo	25
3.4	Linha trifásica	26
3.5	Tubo de Venturi	27
3.6	Aquisição de dados	28
3.7	Metodologia Física	30
3.7.1	Modelagem do Problema	30
3.7.2	Propriedades na entrada do domínio	33
3.7.3	Propriedades ao longo do domínio	35
3.8	Algoritmo	39
4	RESULTADOS	42
5	CONCLUSÕES	46

REFERÊNCIAS	47
APÊNDICE A	49
APÊNDICE B	58
APÊNDICE C	59
APÊNDICE D	60
APÊNDICE E	61
APÊNDICE F	62
APÊNDICE G	63
APÊNDICE H	64
APÊNDICE I	65
APÊNDICE J	66
APÊNDICE K	67
APÊNDICE L	68
APÊNDICE M	71
APÊNDICE N	76
APÊNDICE O	77

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP) (2016), o custo para produzir um barril de petróleo em águas profundas no Brasil é elevado se comparado aos poços localizados no Oriente Médio. A necessidade de redução dos custos de produção no Brasil foi intensificada após a redução do preço de venda do barril de petróleo a partir de 2014. Uma das formas sugeridas pela IBP (2016) foi a diminuição de insumos como aço, equipamentos e serviços sobre as plataformas.

Entre os possíveis métodos para a redução dos custos de produção, destacam-se, nesse trabalho, as medições multifásicas em linha (popularmente conhecida como Multiphase Flow Metering - MFM). Segundo Falcone et al. (2002), a técnica de medição MFM consiste nas medições em tempo real da produtividade da extração sem a necessidade de separadores de fase, reduzindo custos operacionais e aumentando a produtividade do poço ao evitar a interrupção do mesmo. A atividade de produção pode ser simplificada em duas etapas principais: uma relacionada à extração do fluido dos reservatórios até o bombeamento para os separadores de fases, e uma relacionada à unidade de medição para medir individualmente a vazão de cada fase do escoamento após o separador de fases. A necessidade de medições a partir de separadores de fases é cara, demandando mais infraestrutura para realizar medições precisas da produtividade. Ocorrem também paralizações periódicas da produção para testes de confiabilidade.

Tecnologias MFM têm o intuito de medir a vazão de cada fluido em um escoamento multifásico de forma não intrusiva, ou seja, sem ter que separar as fases. As medições sobre a produtividade da extração do petróleo têm um grande impacto nas operações da cadeia de produção, ver (FALCONE; HEWITT; ALIMONTI, 2009). A partir desses dados, são tomadas decisões sobre o controle logístico do petróleo, pois dependem do controle de produção e da estocagem. O desenvolvimento de técnicas de MFM foi iniciado no começo da década de 80 após avanços em tecnologias de medição em geral (FALCONE et al., 2002).

Avanços em tecnologias para medição de escoamentos multifásicos seriam benéficos para outras aplicações industriais ou de interesse da sociedade. Citam-se como exemplos de escoamentos multifásicos: a passagem de sangue no corpo humano, padrões de escoamento em fluidos refrigerantes em mudança de fase e processo de craqueamento. O escoamento multifásico consiste na passagem simultânea de uma mistura heterogênea dentro de um sistema a ser estudado. As fases presentes podem

ser misturas de sólidos, líquidos e gases (FALCONE; HEWITT; ALIMONTI, 2009).

Segundo Oliveira et al. (2008), equipamentos deprimogênios (i.e. equipamentos que medem vazão associada a uma diferença de pressão) compõem normalmente técnicas de MFM. Dessa forma, o presente trabalho irá propor um algoritmo capaz de prever o campo de pressões de líquido e de gás ao longo de um Venturi de modo a prever as vazões de cada fase. Um Venturi modificado será construído e testado para esse propósito em uma bancada de testes multifásica.

1.1 Objetivo Geral

Determinar as vazões mássicas de escoamentos líquido-gás a partir do campo de pressões medido em um tubo de Venturi modificado.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a. Calibrar os equipamentos de medição;
- b. Calibrar a bancada multifásica;
- c. Medir quedas de pressões em áreas específicas do tubo de Venturi;
- d. Definir estratégia de cálculo da vazão mássica;
- e. Aplicar os cálculos em algoritmo.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os tópicos necessários para entender a solução do problema físico do trabalho a ser realizado.

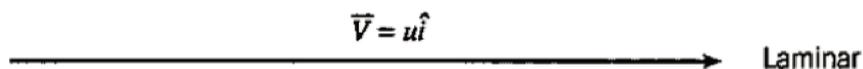
2.1 Escoamento interno

O escoamento interno pode ser definido como a passagem de fluido confinado por uma superfície, ver (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2006). O escoamento monofásico é classificado como regime laminar ou turbulento.

2.1.1 Laminar

Para Fox et al. (2006) o escoamento laminar consiste de partículas fluidas em movimento organizado na forma de camadas lisas ou lâminas e, conseqüentemente, tem o campo de velocidades conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Trajetória do escoamento laminar

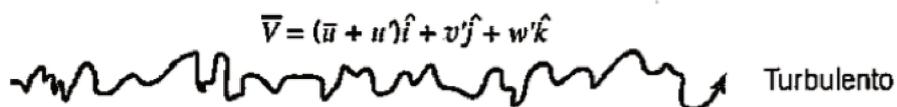


Fonte: Fox et al. (2006).

2.1.2 Turbulento

O escoamento turbulento, ao contrário do laminar, necessita de descrição estatística do campo de velocidades, em função das flutuações das partículas fluidas. A definição das propriedades desse escoamento normalmente é feita por teorias semi-empíricas ou através de experimentos, ver (FOX et al., 2006).

Figura 2 – Trajetória do escoamento turbulento



Fonte: Fox et al. (2006).

2.2 Equação de movimento do fluido

A equação da continuidade ou conservação da massa é definida como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho U) = 0 \quad (1)$$

onde U é a velocidade do fluido, ρ , a massa específica e t , o tempo.

A equação de Navier-Stokes descreve o comportamento de um fluido newtoniano:

$$\frac{DU}{Dt} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 U \quad (2)$$

onde ν é a viscosidade cinemática, g , a aceleração da gravidade, e p , a pressão estática. Desprezando o termo viscoso, obtém-se a equação de Euler, ver (FOX et al., 2006):

$$\frac{DU}{Dt} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (3)$$

2.3 Escoamento multifásico

O escoamento multifásico é definido como a passagem de duas ou mais fases em uma dada linha de um sistema, ver (FALCONE et al., 2002). A seguir, são definidos alguns conceitos básicos a respeito de escoamentos multifásicos.

2.3.1 Conceitos básicos

Considere um escoamento em regime permanente, adiabático, unidirecional e com propriedades constantes ao longo do tubo. Pode-se definir que a vazão mássica total, m_t , de um escoamento multifásico é a soma de todas as vazões mássicas das fases presentes no escoamento, ver (PEREIRA, 2006). Dessa forma:

$$m_t = \sum_{i=1}^n m_n \quad (4)$$

onde n é o número de fases do escoamento.

Sabendo-se a velocidade média de cada fase, U_i , em uma determinada seção transversal, obtém-se as vazões mássicas individuais, m_i :

$$m_i = \rho_i * U_i * A_i \quad (5)$$

onde A_i é a área da seção transversal ocupada pela fase “i”.

O título mássico, x , de um escoamento líquido-gás é definido como:

$$x_t = \frac{m_g}{m_g + m_l} \quad (6)$$

onde os índices g e l correspondem à fase gasosa e à fase líquida.

Outro conceito muito importante para escoamentos multifásicos líquido-gás é a fração de vazio. Trata-se do volume que o gás, U_g , ocupa em relação ao volume total, $U_g + U_l$, a ser estudado, ver (PEREIRA, 2006).

$$\alpha = \frac{U_g}{U_g + U_l} \quad (7)$$

2.3.2 Padrões de Escoamento

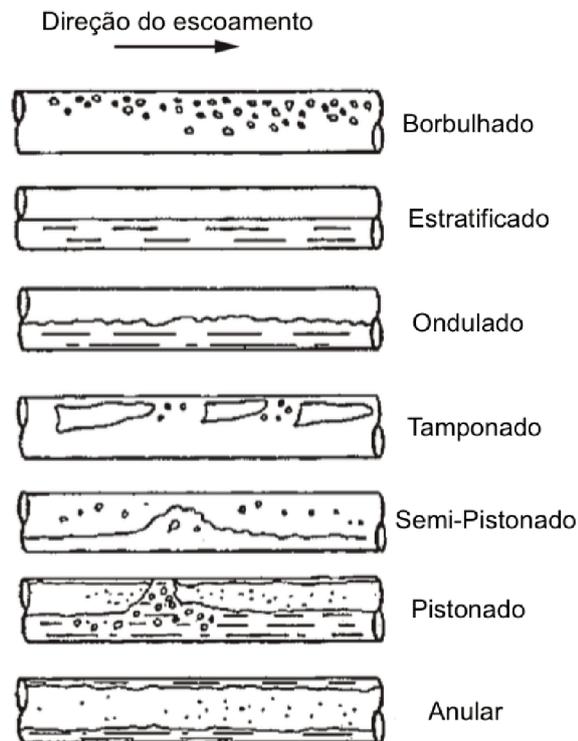
Os padrões de escoamento multifásico definem o comportamento e o formato da interface entre as fases; ver (FALCONE et al., 2002).

Os fatores que determinam o padrão de um escoamento multifásico são:

- Propriedades e velocidades das fases;
- Fração de vazio;
- Pressão e temperatura de operação;
- Diâmetro, formato, inclinação e rugosidade do tubo;
- Variações da seção transversal do duto (e.g. presença de válvulas, dobras, tubo T etc.) na entrada ou saída do escoamento.

Tais padrões foram observados em experimentos de escoamentos bifásico feitos em laboratórios. Na Figura 3, são apresentadas ilustrações de padrões de escoamento gás-líquido com o tubo na direção horizontal.

Figura 3 – Padrão de escoamento horizontal



Fonte: Adaptado pelo autor de Falcone et al. (2002).

Os padrões de escoamentos horizontais são classificados como:

- Borbulhado: bolhas de gás dispersas em líquido;
- Estratificado: separação de fases bem definida onde o líquido fica abaixo do gás;
- Ondulado: formação ondulada na interface gás-líquido a partir do aumento de velocidade do gás;
- Tamponado: presença de bolhas alongadas de gás na região superior do duto;
- Semi-Pistonado: formação de ondas periódicas causadas pelo aumento da quantidade de movimento da fase líquida, que não encosta na parte superior;
- Pistonado: formação de ondas periódicas causadas pelo aumento da quantidade de movimento da fase líquida, encostando na parte superior;
- Anular: formação de anel líquido ao redor do tubo e escoamento de gás através da região central.

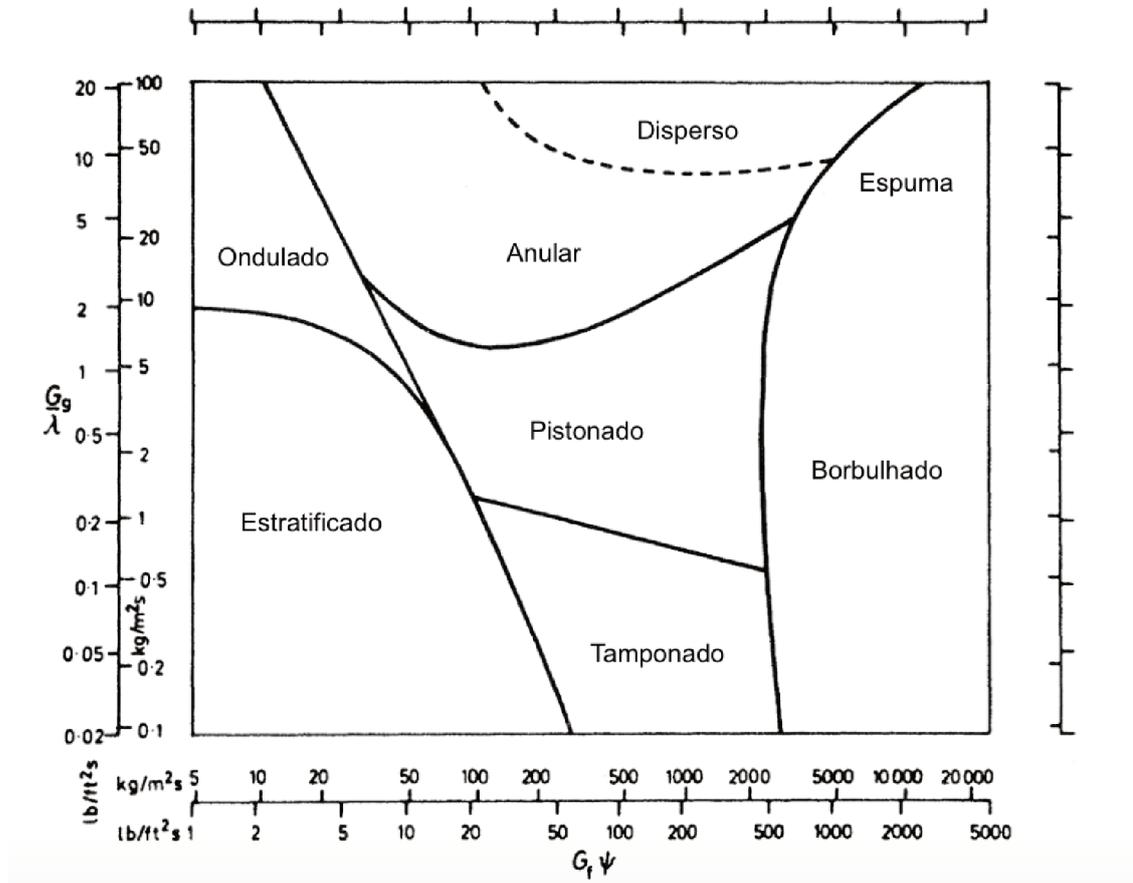
2.3.3 Mapas de padrões

Para prever a ocorrência de um determinado padrão de escoamento multifásico, foram criados mapas de padrões a partir de experimentos e modelos semi-empíricos.

Baker (1954), por exemplo, criou um mapa de padrões para escoamentos líquido-gás através de experimentos com escoamentos de água e ar na direção horizontal. A ocorrência dos padrões é determinada a partir dos fluxos mássicos

e das propriedades do fluido; ver Figura 4.

Figura 4 – Mapa de padrões de escoamento horizontal Baker (1954)



Fonte: Adaptado pelo autor de Baker apud Collier e Thome (1994).

Para definir onde o escoamento está dentro do mapa, as equações 8 e 9 calculam os multiplicadores das vazões mássicas apresentadas no mapa. Para definir o padrão de escoamento, as vazões mássicas são modificadas por multiplicadores, λ e ψ :

$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_A} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\psi = \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_l} \right) \left[\left(\frac{\mu_l}{\mu_w} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_l} \right) \right]^{1/3} \quad (9)$$

onde os índices g e l correspondem à fase gasosa e à fase líquida de qualquer escoamentos líquido-gás; os índices A e W correspondem a propriedades do ar e da água; μ é a viscosidade dinâmica e σ , a tensão superficial.

2.4 Medidores de vazão

Os medidores de vazões podem funcionar por diferença de pressão, velocidade do fluxo, deslocamento positivo e fluxo de massa. (ENGINEERING TOOLBOX, 2003) . Para o controle das condições de trabalho da bancada, serão utilizados medidor de vazão Coriolis para o fluxo de ar e um medidor eletromagnético de vazão de água, anteriormente ao ponto de mistura.

2.5 Medidores de pressão

A pressão é um dos parâmetros mais utilizados na indústria de controle de processos, segundo Cassiolato (2008). O principal dispositivo criado em 1849 foi o Tubo de Bourdon, patenteado por Eugene Bourdon e usado para medições de pressões relativas. Na mudança para a era digital, uma nova tecnologia de medição de pressões surgiu: os transdutores de pressão. Estes fazem a aferição da pressão a partir de um sinal elétrico gerado por diferentes princípios físicos, posteriormente amplificados e filtrados, e armazenados em um computador. Os transdutores podem ser do tipo: capacitivo, piezo-resistivo, potenciométrico, piezo-elétrico, relutância variável, ressonante e ótico.

2.6 Medição de escoamentos bifásicos

Para aferir escoamentos bifásicos ou multifásicos em linha, várias técnicas de medição são, em geral, empregadas para permitir a descrição do campo de escoamento. Entre as técnicas empregadas, destacam-se: PIV, efeitos Doppler, ultrassom, impedância elétrica, sondas intrusivas, válvulas de fechamento rápido (VFR), atenuação radioativa, tomografia.

2.7 Método de Runge-Kutta

A solução para EDO (equações diferenciais ordinárias) pode ser obtida por meio de computadores com auxílio de vários métodos numéricos, que dividem problemas matemáticos em operações básicas (soma, subtração, multiplicação e divisão). Os métodos de Runge-Kutta permitem soluções de sistemas lineares a partir da série de Taylor sem a necessidade de calcular derivadas de ordem maior. O mais conhecido dos métodos é o de quarta ordem; ver equação 10 (CHAPRA, 2004):

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad (10)$$

onde k_1 , k_2 , k_3 e k_4 podem ser definidos pelas equações a seguir. onde a variável independente y é obtida a partir de uma passo especificado, $h = x_{i+1} - x_i$. No presente trabalho, o passo h é a distância infinitesimal ao longo do Venturi. A variável y no incremento posterior " $i + 1$ " é dependente dos termos k_1 , k_2 , k_3 e k_4 , definidos a seguir:

$$k_1 = f(t_i, y_i) \quad (11)$$

$$k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1h\right) \quad (12)$$

$$k_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2h\right) \quad (13)$$

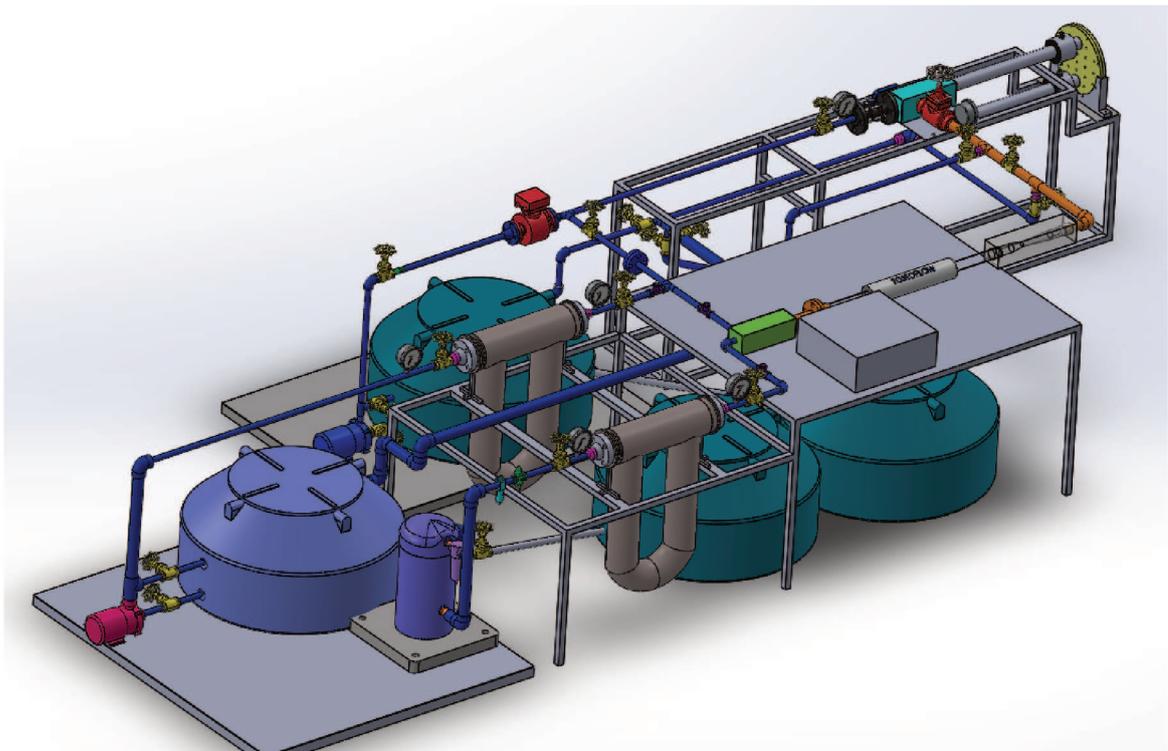
$$k_4 = f(t_i + h, y_i + k_3h) \quad (14)$$

3 METODOLOGIA

O presente trabalho utilizará uma bancada dedicada para simulações de escoamentos multifásicos. Escoamentos bifásicos de água e ar serão criados ao longo de um tubo de Venturi. Um total de 11 pontos experimentais serão testados, mantendo-se a vazão de ar igual a 0,001 kg/s. A vazão mássica de água será testada com os seguintes valores: 0,65, 0,80, 0,95, 1,10, 1,25, 1,40, 1,55, 1,70, 1,85, 2,00 e 2,15 kg/s.

Na Figura 5, é apresentada um esquemático da bancada multifásica, capaz de gerar escoamentos com 3 fases distintas. No tanque azul é armazenada água, nos tanques roxos, óleo de cozinha. Há também uma linha dedicada para escoamento de ar. A seguir, será descrita detalhadamente a bancada de testes.

Figura 5 – Esquemático da bancada de testes multifásica



Fonte: Autor (2019).

3.1 Componentes da bancada

Nesta seção, serão abordados os principais componentes utilizados na bancadas, incluindo normas, dimensões e características. Os componentes são divididos em: tubulação, válvulas, filtros e equipamentos.

3.1.1 Tubulações, flanges, cotovelos e junções

Na Tabela 1, são apresentados todos os componentes com suas quantidades estimadas e especificações necessárias para a passagem de fluidos na bancada. Os tubos, cotovelos, tê, reduções e flanges são de aço inox para permitir a passagem de fluidos à alta pressão. As passagens em PVC permitem a integração de um tomógrafo de capacitância elétrica. Os trechos de PVC podem ser repostos por tubulações de aço inox.

Tabela 1 – Principais componentes e características referentes à tubulação da bancada multifásica

Quantidade	Descrição
8 m	Tubo Inox 1"
1,1 m	Tubo PVC 40mm
8	Cotovelo 1"
1	Cotovelo 40 mm
1	Tê 1"
4	Flanges 2" - CL150 ANSI B16.5 316/F316L weld neck flange - Coriolis (Cinza) - Inox
2	Flanges de 40 mm - CL150 ANSI weld neck flange - Tomógrafo (Verde) - Nylon
4	Redução de 2" - 1" (Rosa)

Fonte: O Autor (2019).

3.1.2 Válvulas e filtro

Na Tabela 2, estão indicados as válvulas e o filtro utilizados para o controle de fluxo na bancada, além das respectivas descrições. A escolha de válvulas de bronze se deve ao fato de terem baixo custo e serem compatíveis com o aço inox.

Tabela 2 – Válvulas e filtro da bancada multifásica

Quantidade	Descrição
2	Válvula de retenção horizontal com portinhola PN 16 BSP NBR 15055 - 1" (Roxo)
1	Válvula globo bronze PN 16 Disco PTFE BSP - 1 1/2" (Vermelho)
6	Válvula globo bronze PN 16 Disco PTFE BSP - 1" (Amarelo)
1	Válvula redutora de pressão PRV-17 - 1" (Verde Claro)
1	Filtro de ar com purgador - 1" (Azul turquesa)

Fonte: O Autor (2019).

3.1.3 Equipamentos

Na Tabela 3, são apresentados os equipamentos necessários para armazenar, transferir, misturar e mensurar os fluidos. A escolha das bombas e do compressor foi baseada na faixa de Reynolds que um canal de um trocador de calor do tipo PSHE iria alcançar em operação em plantas de óleo e gás. Os manômetros foram inseridos nas linhas para controle e segurança dos usuários.

Tabela 3 – Descrição dos principais equipamentos e componentes da bancada de testes e suas quantidades

Quantidade	Descrição
2	Coriolis - CMF200M - 2"
1	Transdutor de Pressão Diferencial
1	Medidor Eletromagnético - 8732E - 1"
1	Tomoflow R100
5	Manômetros Analógicos
2	Bombas 1 CV BC-91 S/T 1B - Schneider - Rosa
4	Tanque 310 L Fortlev
1	Compressor CSA 8,2/25 - 2 HP
2	Inversores de Frequência
2	Misturador

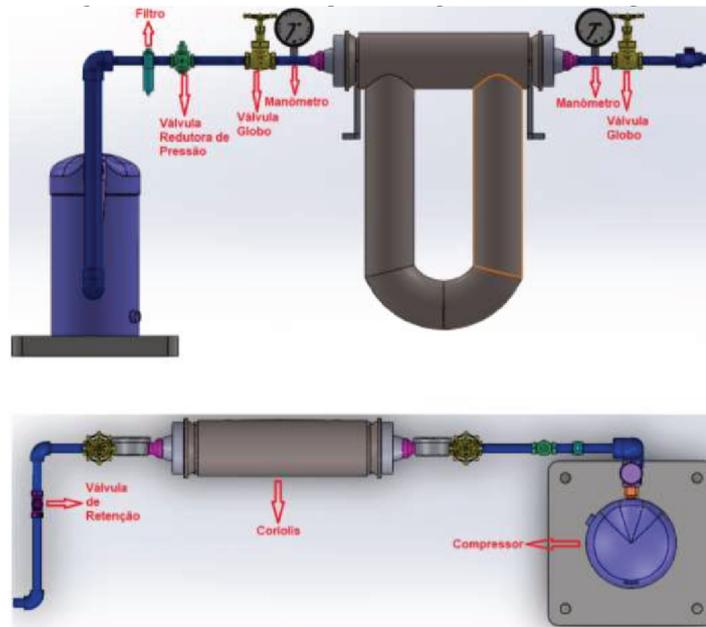
Fonte: O Autor (2019).

3.2 Linha de ar

Na Figura 6, é apresentada detalhadamente a linha monofásica de gás da bancada. Há a presença de um compressor e de um filtro para evitar a inserção de contaminantes, além de evitar danos a equipamentos como o medidor Coriolis e o tomógrafo de capacitância elétrica. Antes do Coriolis, há a presença de uma válvula globo para controle do fluxo, além de um manômetro para aferição da pressão estática. Na saída do Coriolis, há um manômetro e válvula globo que irão ajudar no controle do fluxo de ar na caixa de mistura de fluidos, logo após a válvula de retenção.

Quando a linha de ar comprimido é acionada e a de óleo já estiver ativa, ocorrerá uma queda de pressão no ponto de mistura que pode ocasionar “backflow”. Para evitar esse tipo de evento, é utilizada uma válvula de retenção horizontal.

Figura 6 – Esquemático da linha de gás: vista frontal (a) e superior (b)

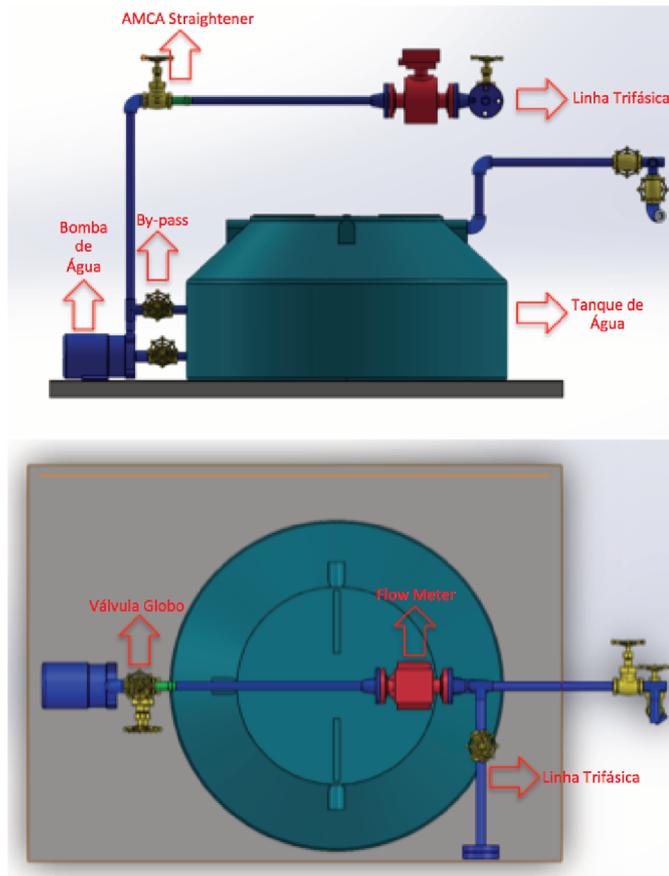


Fonte: O Autor (2019).

3.3 Linha de água e de óleo

Na Figura 7, é apresentada a linha de água. Há uma bomba centrífuga conectada por um by-pass ao tanque de armazenamento de água de 310 litros de forma similar à linha de óleo. Um medidor de vazão do tipo eletromagnético é empregado após a bomba. No caso da linha de óleo, há a presença de um medidor Coriolis. Conexões e junções permitem inverter o sentido do fluxo na seção de testes, como vertical ascendente ou descendente.

Figura 7 – Esquemático da linha de água: visão frontal (a) e superior (b)

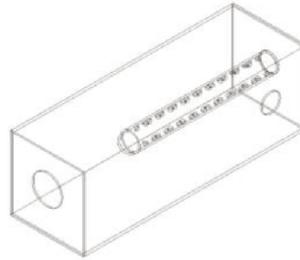


Fonte: O Autor (2019).

3.4 Linha trifásica

A linha trifásica é composta por: misturador, tomógrafo e tubo de Venturi. O misturador possui duas entradas de fluidos e uma saída, conforme apresentado na Figura 8. O misturador foi concebido para promover mais facilmente a geração de padrão de escoamento borbulhado. As entradas e saídas do misturador possuem furos com roscas das mesmas dimensões das tubulações a que estão conectadas. Após a mistura ser estabelecida, há a conexão do tubo de Inox com o Tomoflow (sensores em um tubo de acrílico). Esta conexão é feita com um flange de aço e um flange de nylon. Há um anel de borracha entre o flange de aço e o tubo de acrílico para evitar danos ao tomógrafo “Tomoflow”.

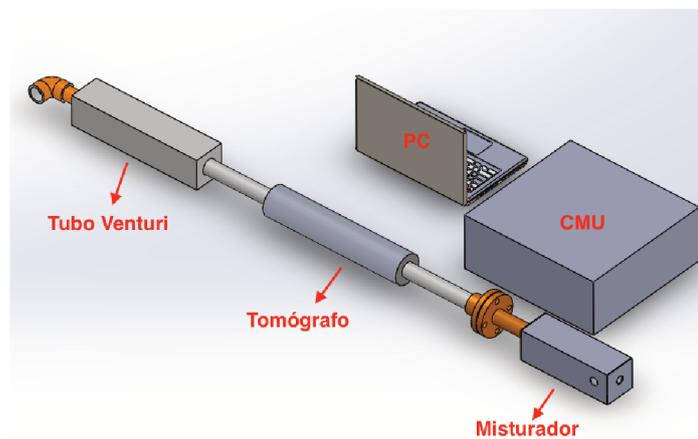
Figura 8 – Vista isométrica do misturador



Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 9, é apresentado esquemático com a linha de mistura. Há também a presença da central de processamento de dados do tomógrafo (CMU), o computador de controle e de um tubo de Venturi.

Figura 9 – Esquemático da linha trifásica: vista isométrica

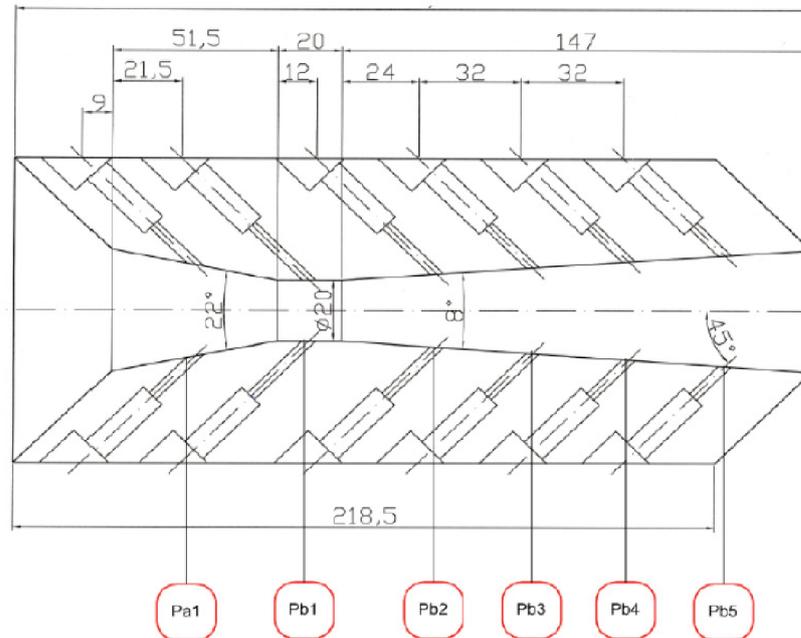


Fonte: O Autor (2019).

3.5 Tubo de Venturi

Na Figura 10, são apresentadas as dimensões do tubo de Venturi utilizado na bancada de testes. Trata-se de um dispositivo modificado, permitindo várias tomadas de pressão ao longo do Venturi. O mesmo é usinado em acrílico, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 10 – Esquemático do tubo de Venturi: vista frontal



Fonte: O Autor (2019).

Figura 11 – Fotografia do tubo de Venturi

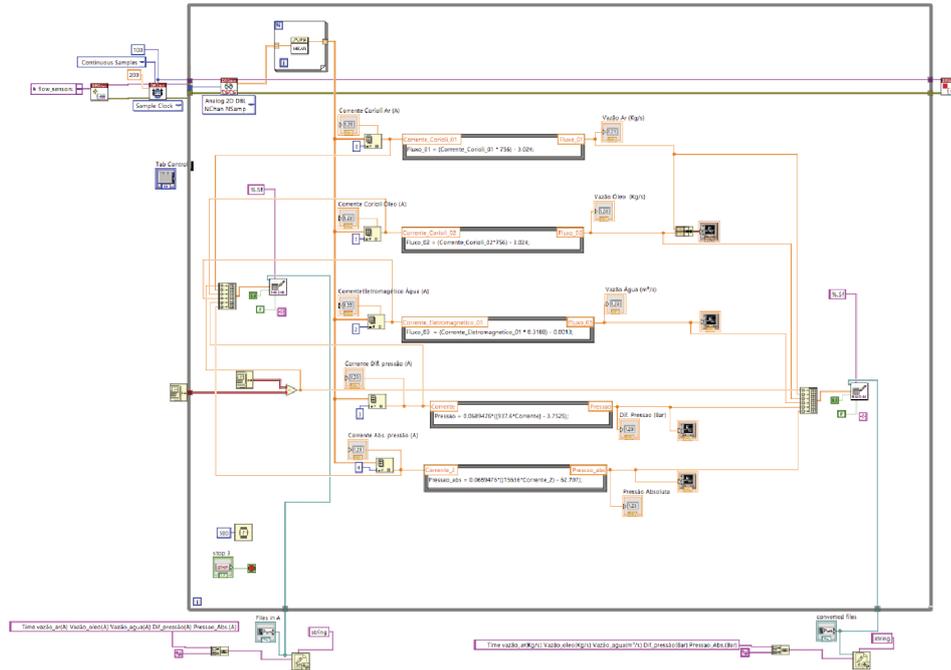


Fonte: O Autor (2019).

3.6 Aquisição de dados

A aquisição e transmissão dos dados de medição (vazões, temperatura, pressão e tomografia) ocorreu através de equipamento NI, Compact DAQ. Para observação em tempo real e armazenagem dos dados em computador, foi utilizado o software LabVIEW. Os sinais de corrente provenientes da bancada foram enviados para o computador através de USB. Na Figura 12, é apresentada uma ilustração da construção dos blocos programados via LabVIEW para converter os dados de corrente provenientes dos equipamentos de medição. As informações de pressão foram convertidas em bar, e as de vazão de água, ar e óleo, em kg/s.

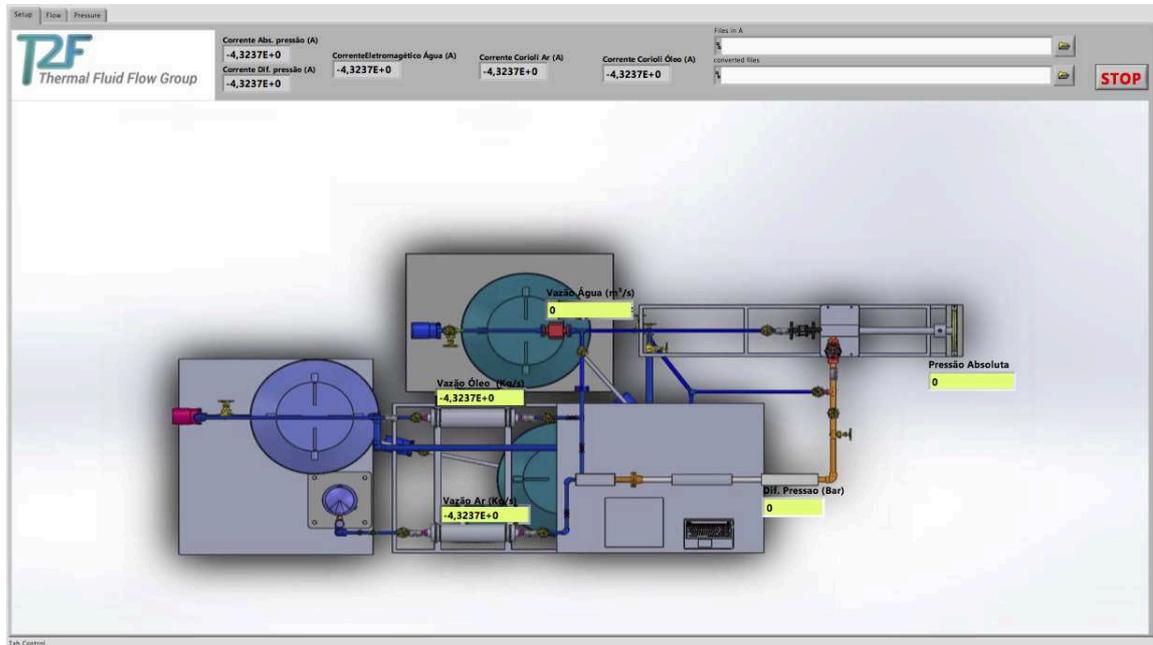
Figura 12 – Ilustração da programação de blocos e interface no LabVIEW



Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 13, é apresentada uma ilustração contendo esquemático da bancada experimental, além de indicar em tempo real informações de medição, como vazões e pressões absolutas e diferenciais. Foi criada uma interface intuitiva para indicar as medições e posições de cada sensor instalado na bancada. Além disso, há o armazenamento dos dados em arquivos .txt tanto em corrente como convertidos em pressões absolutas e diferenciais, temperatura e vazões de cada corrente fluida.

Figura 13 – Ilustração da interface do programa da bancada multifásica em plataforma LabVIEW



Fonte: O Autor (2019).

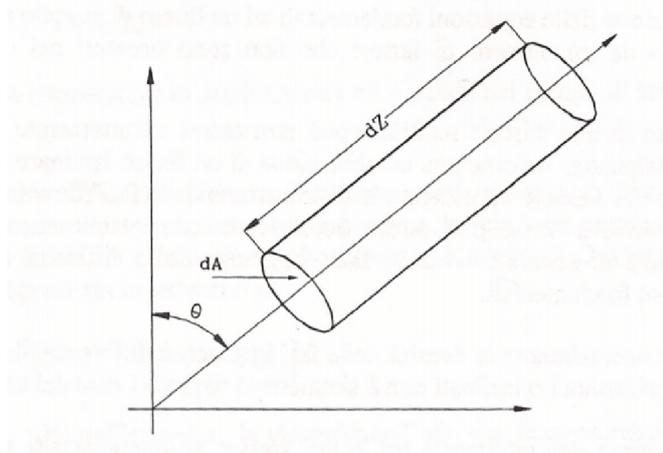
3.7 Metodologia Física

Nesta seção será abordada a metodologia adotada para determinar as vazões mássicas de escoamentos líquido-gás a partir do campo de pressões medido em um tubo de Venturi modificado.

3.7.1 Modelagem do Problema

O modelo de separação de fases proposta por Caudullo (1996), tendo como base o modelo proposto por Lockhart e Martinelli (1949), propõe a discretização de um tubo Venturi em elementos infinitesimais nos quais a variação de seção transversal é ínfima; ver Figura 14. São desprezadas mudanças de fase e reação química entre os fluidos.

Figura 14 – Ilustração de elemento Infinitesimal do tubo de Venturi com ínfima variação da seção transversal



Fonte: Caudullo (1996).

As equações da conservação da massa para o gás e para o líquido são:

$$\frac{d(\alpha\rho_g U_g)}{dz} = -\frac{\alpha\rho_g U_g}{A} \frac{dA}{dz} + M_l \quad (18)$$

$$\frac{d[(1-\alpha)\rho_l U_l]}{dz} = -\frac{(1-\alpha)\rho_l U_l}{A} \frac{dA}{dz} + M_g \quad (19)$$

onde M é a transferência de massa na interface entre os fluidos por unidade de comprimento na direção axial (z) do tubo e por unidade de área.

Desprezando mudança de fase, obtém-se:

$$\frac{d(\alpha\rho_g U_g)}{dz} = -\frac{\alpha\rho_g U_g}{A} \frac{dA}{dz} \quad (20)$$

$$\frac{d[(1-\alpha)\rho_l U_l]}{dz} = -\frac{(1-\alpha)\rho_l U_l}{A} \frac{dA}{dz} \quad (21)$$

As equações da conservação da quantidade de movimento linear para o gás e para o líquido são:

$$\frac{d(\alpha\rho_g U_g^2)}{dz} + \alpha \frac{dP}{dz} = -\frac{\alpha\rho_g U_g^2}{A} \frac{dA}{dz} - \alpha\rho_g g \cos \theta + (MV)_{gl} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{gl} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{gf} \quad (22)$$

$$\frac{d[(1-\alpha)\rho_l U_l^2]}{dz} + (1-\alpha) \frac{dP}{dz} = -\frac{(1-\alpha)\rho_l U_l^2}{A} \frac{dA}{dz} - (1-\alpha)\rho_l g \cos \theta + (MV)_{lg} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{lg} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{lf} \quad (23)$$

onde MV é a transferência de quantidade de movimento na interface entre os fluidos, $(dp/dz)_{lg}$ é a perda de carga devido a efeitos viscosos no gás por unidade de comprimento na direção axial (z) do tubo e por unidade de área, e $(dp/dz)_{lf}$, a perda de carga devido a efeitos viscosos no líquido.

As equações 22 e 23 podem ser rearranjadas através da Terceira lei de Newton. Dessa forma, obtém-se:

$$\frac{d[\alpha\rho_g U_g^2 + (1-\alpha)\rho_l U_l^2]}{dz} + \frac{dP}{dz} = -\frac{\alpha\rho_g U_g^2 + (1-\alpha)\rho_l U_l^2}{A} \frac{dA}{dz} - [\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l]g \cos\theta - \left(\frac{dp}{dz}\right)_f \quad (24)$$

onde P é a pressão estática e $(dp/dz)_f$ a perda de carga devido efeitos viscosos. Para fechar o sistema linear, é necessário a introdução de uma equação suplementar. Para isso, é adotado o modelo de escorregamento proposto por Zuber e Findlay (1965):

$$U_g = C_o U_m + U_s \quad (25)$$

onde C_o é o parâmetro de distribuição, U_s , a velocidade de escorregamento, e U_m , a velocidade média da mistura, que pode ser definida como:

$$U_m = \alpha U_g + (1-\alpha)U_l \quad (26)$$

Assim, substituindo a definição de U_m , equação 26, na equação 25 e derivando em relação a z , obtém-se a equação necessária para a solução do sistema linear:

$$[1 - \alpha C_o] \frac{dU_g}{dz} - [C_o(1 - \alpha)] \frac{dU_l}{dz} - [C_o(U_g - U_l)] \frac{d\alpha}{dz} = \frac{dU_s}{dz} \quad (27)$$

Assumindo que a variação do parâmetro de distribuição é desprezível na direção axial e o líquido é incompressível, o sistema linear é simplificado da seguinte forma:

$$[1 - \alpha C_o] \frac{dU_g}{dz} - [C_o(1 - \alpha)] \frac{dU_l}{dz} - [C_o(U_g - U_l)] \frac{d\alpha}{dz} = \frac{dU_s}{dz} \quad (28)$$

$$[\alpha \rho_g] \frac{dU_g}{dz} + [\rho_g U_g] \frac{d\alpha}{dz} + \left[\alpha U_g \frac{d\rho_g}{dP} \right] \frac{dP}{dz} = - \frac{\alpha \rho_g U_g}{A} \frac{dA}{dz} \quad (29)$$

$$[(1 - \alpha) \rho_l] \frac{dU_l}{dz} + [\rho_l U_l] \frac{d\alpha}{dz} = - \frac{(1 - \alpha) \rho_l U_l}{A} \frac{dA}{dz} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} [2\alpha \rho_g U_g] \frac{dU_g}{dz} + [2(1 - \alpha) \rho_l U_l] \frac{dU_l}{dz} + [\rho_g U_g^2 - \rho_l U_l^2] \frac{d\alpha}{dz} + \left[1 + \alpha U_g^2 \frac{d\rho_g}{dP} \right] \frac{dP}{dz} = \\ - \frac{\alpha \rho_g U_g^2 + (1 - \alpha) \rho_l U_l^2}{A} \frac{dA}{dz} - [\alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l] g \cos \theta - \left(\frac{dp}{dz} \right)_f \end{aligned} \quad (31)$$

As equações 27 -31 representam um sistema linear na forma $BY = E$, onde a matriz B contém os coeficientes que estão entre colchetes, Y é a matriz contendo as variáveis dependentes (dU_g/dz , dU_l/dz , $d\alpha/dz$, dP/dz) e E é a matriz que contém termos independentes no lado direito das equações 27 a 31 .

3.7.2 Propriedades na entrada do domínio

As propriedades da água e do ar serão calculadas pelas equações de estado com a temperatura T e a pressão estática P medidas na entrada do tubo de Venturi.

A massa específica do ar (ρ_g), a variação da massa específica em relação à pressão ($d\rho_g/dP$) e a viscosidade dinâmica do ar (μ_g) do ar podem ser obtidas como; ver (ÇENGEL; GHAJAR, 2015), e (PEIXIANG et al., 2009):

$$\rho_g = 1,2041 \left(\frac{273,15 + 21,1}{273,15 + T} \right) \left(\frac{101,325 + P}{101,325} \right) \quad (32)$$

$$\frac{d\rho_g}{dP} = \frac{0,871 + 0,003008(400 - (273,15 + T))}{10^5} \quad (33)$$

$$\mu_g = 0,001(4,8(273,15 + T)10^{-6} + 0,001721) \quad (34)$$

onde a temperatura T é dada em °C, e a pressão P , em Pa. No presente caso, a

massa específica (ρ_l) e a viscosidade dinâmica (μ_l) do líquido podem ser consideradas constantes. ρ_l é aproximadamente 998 kg/m^3 , e μ_l é $1,002 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$.

O parâmetro de distribuição C_o pode ser obtido através de fator de atrito f , baseado em um número de Reynolds, Re , para escoamentos bifásicos; ver (BEATTIE; SUGAWARA, 1986):

$$C_o = 1 + 2,5\sqrt{f} \quad (35)$$

$$f = 0,05525Re^{-0,237} + 0,0008 \quad (36)$$

$$Re = \frac{2rG}{3\mu_l} \quad (37)$$

onde G é o fluxo mássico bifásico e r , o raio do tubo em determinada seção transversal.

A velocidade de escorregamento é dependente do padrão de escoamento. Será utilizado o modelo proposto por Harmathy (1960) baseado no trabalho de Zuber e Findlay (1965), desenvolvido para padrão borbulhado. Nesse modelo, a velocidade de escorregamento é dependente das propriedades dos fluidos como massa específica e tensão superficial (σ):

$$U_s = 1,53 \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{0,25} \quad (38)$$

Quando houver casos de padrões pistonados, assume-se que a velocidade de escorregamento é dominada pela inércia da fase líquida; ver (WALLIS, 1969).

$$U_s = C_1 \rho_l^{-0,5} [gd(\rho_l - \rho_g)]^{0,5} \quad (39)$$

onde o coeficiente C_1 é 0,345, conforme White e Beardmore (1962), e d é o diâmetro da seção transversal.

Após calcular a velocidade de escorregamento, as condições de contorno no domínio da entrada do tubo de Venturi são definidas. São elas a fração de vazão α , as velocidades médias do gás e do líquido (U_g, U_l). A pressão estática já foi obtida anteriormente.

$$\alpha = \frac{Q_g}{C_o Q + U_s A} \quad (40)$$

$$U_g = \frac{Q_g}{\alpha A} \quad (41)$$

$$U_l = \frac{Q_l}{[(1 - \alpha)A]} \quad (42)$$

3.7.3 Propriedades ao longo do domínio

Ao longo do tubo de Venturi, as variáveis ρ_g , Re , f , C_o e U_s serão recalculadas em cada passo definido pelo método numérico empregado. Também são calculadas as variações da geometria do tubo de Venturi.

Para definir a perda de carga devido ao atrito, serão calculados os fatores de fricção de Fanning individualmente para cada fase:

$$f = \frac{16}{Re}, \text{ para } Re < 2100 \quad (43)$$

$$f = \frac{0,079}{Re^{-0,25}}, \text{ para } Re > 2100 \quad (44)$$

O valor de 2100 indica a transição entre o regime laminar e turbulento. O número de Reynolds para a fase líquida e gasosa são calculados como:

$$Re_l = \frac{G(1 - x)d}{\mu_l} \quad (45)$$

$$Re_g = \frac{Gxd}{\mu_g} \quad (46)$$

O termo que descreve o gradiente de pressão por atrito, segundo Lockhart e Martinelli (1949), pode ser obtido através de fatores de correção, ϕ_l^2 e ϕ_g^2 , e de parcelas de perda de carga que consideram apenas uma das fases do escoamento:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_f = \phi_l^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_l = \phi_g^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_g \quad (47)$$

onde $(dp/dz)_l$ considera a perda por fricção como a vazão total sendo apenas líquido,

e $(dp/dz)_g$ considera a vazão total sendo apenas gás:

$$\left(-\frac{dp}{dz}\right)_l = \frac{2f_l G^2 (1-x)^2}{\rho_l d} \quad (48)$$

$$\left(-\frac{dp}{dz}\right)_g = \frac{2f_g G^2 x^2}{\rho_g d} \quad (49)$$

Lockhart e Martinelli (1949) fez uma modelagem generalizada para determinar os fatores de correção (ϕ_g^2 e ϕ_l^2), supondo que há equilíbrio termodinâmico entre as fases, e que os fatores de correção ϕ^2 e a fração de vazão (α) são independentes. Se o parâmetro de Lockhart-Martinelli, X^2 , for maior ou igual a 1, o escoamento sofre maior perda de carga devido à fase líquida. Em contrapartida, se o parâmetro X^2 for menor que 1, a influência da fase gasosa na perda de carga será maior:

$$X^2 = \frac{(dp/dz)_l}{(dp/dz)_g} \quad (50)$$

Para regimes turbulentos, o cálculo do parâmetro de Lockhart-Martinelli será:

$$X^2 = \frac{\rho_g}{\rho_l} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0,25} \left(\frac{1-x_t}{x_t}\right)^{1,75} \quad (51)$$

A partir do parâmetro de Lockhart-Martinelli, é possível determinar os multiplicadores bifásicos necessários para determinar o gradiente de pressão causada pelo atrito; ver equações abaixo:

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (52)$$

$$\phi_g^2 = 1 + CX + X^2 \quad (53)$$

onde o coeficiente C depende do regime de escoamento de cada fase e é definida de acordo com a Tabela 4; ver (COLLIER; THOME, 1994).

Tabela 4 – Valores do coeficiente C

Liquid	Gas	C
Turbulent	Turbulent	20
Laminar	Tubulent	12
Turbulent	Laminar	10
Laminar	Laminar	5

Fonte: Collier e Thome (1994).

Agora com todos os dados é possível calcular as perdas de carga ao longo do tubo de Venturi. Porém os resultados do cálculo não tinham o mesmo comportamento dos experimentos, mesmo com as correções propostas por Falcone et al. (2002) e Chisholm (1967) no coeficiente C. A solução encontrada para melhorar as aproximações do modelo físico para o experimento é conforme a seguir: Note que o cálculo de perda de carga em escoamentos bifásicos segundo o procedimento acima foi definido para tubos sem variação da seção transversal. Para o cálculo da perda de carga em tubulações com variação de seção transversal, é necessária a introdução de um parâmetro de correção, C_{fit} :

$$\left(-\frac{dp}{dz}\right)_l = C_{fit} \left(-\frac{dp}{dz}\right)_l (\phi_l^2)_{fit} \quad (54)$$

$$(\phi_l^2)_{fit} = 1 + \frac{C_{mod}}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (55)$$

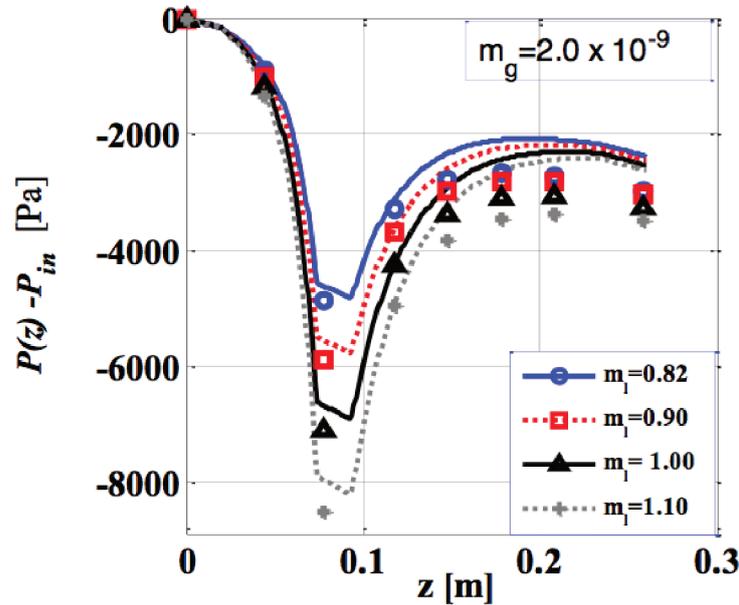
$$\left(-\frac{dp}{dz}\right)_g = C_{fit} \left(-\frac{dp}{dz}\right)_g (\phi_g^2)_{fit} \quad (56)$$

$$(\phi_g^2)_{fit} = 1 + C_{mod}X + X^2 \quad (57)$$

onde a perda de carga no escoamento bifásico é corrigido pelo coeficiente C_{fit} igual a 2,4, enquanto o C_{mod} é a modificador para os multiplicadores do líquido e do gás.

O coeficiente C_{fit} foi determinado através de medições de escoamentos monofásicos com óleo Shell Macron EDM 110. O valor 2,4 foi obtido, conforme inferido da Figura 15. No exemplo da figura abaixo, a perda de carga total, $P(z) - P_{in}$, é aproximadamente 2 kPa. O cálculo de perda de carga segundo as aproximações de Blasius e com $C_{fit} = 1$ é de 830 Pa. O comportamento da curva teórica só se aproximava da curva medida com a correção C_{fit} próxima a 2,4.

Figura 15 – Medições de perda de carga em Venturi para escoamentos bifásicos (símbolos). As linhas representam as curvas de pressão obtidas a partir da solução do sistema linear com C_{fit} igual a 2,4.



Fonte: O Autor (2019).

Observou-se que a classificação do regime de escoamento do líquido e do gás em laminar ou turbulento com demarcação no número de Reynolds igual a 2100 não era suficiente para prever a perda de carga a partir das correções dos multiplicadores dos escoamentos bifásicos. Para a correta previsão de perda de carga no Venturi, são necessárias mais demarcações em virtude das perturbações, acelerações e desacelerações da camada limite ao longo do Venturi. Foram escolhidas 16 diferentes faixas para atribuir novos valores para o coeficiente C_{mod} . As faixas foram demarcadas a partir de números de Reynolds para a fase líquida e gasosa entre 3000, 10000 e 20000. Na Tabela 5, são apresentados os valores ótimos de C_{mod} para cada região que permitiram reproduzir o campo de pressão estática ao longo do Venturi para as medições de escoamentos bifásicos realizados.

Tabela 5 – Modificações no coeficiente C na expressão do multiplicador do gás e do líquido

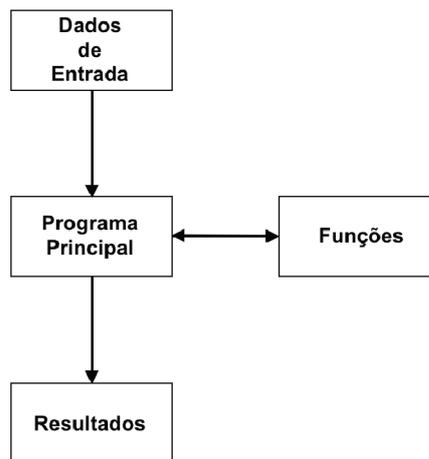
	$Re_g < 3000$	$3000 < Re_g < 10000$	$10000 < Re_g < 20000$	$Re_g > 20000$
$Re_l < 3000$	121	121	121	121
$3000 < Re_l < 10000$	150	1	$Re_l^{0,4}$	$Re_l^{0,49}$
$10000 < Re_l < 20000$	70	80	$Re_l^{0,44}$	$Re_l^{0,48}$
$Re_l > 20000$	10	90	125	133

Fonte: O Autor (2019).

3.8 Algoritmo

O software Matlab foi utilizado para realizar os cálculos numéricos. O algoritmo principal, no Apêndice A, pode ser dividido em 4 partes, conforme apresentado na Figura 16. Funções secundárias são usadas a partir do algoritmo principal para segmentar o algoritmo em etapas e aprimorar a sua leitura, facilitando a entrada de dados e o fornecimento de resultados.

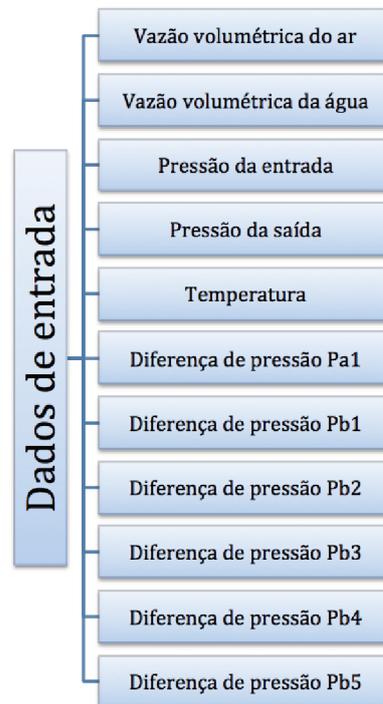
Figura 16 – Fluxograma principal do algoritmo



Fonte: O Autor (2019).

Na etapa de entrada de dados, é necessário inserir os seguintes valores: estimativa de vazão volumétrica do ar, estimativa de vazão volumétrica da água, pressão da entrada e da saída do tubo de Venturi, temperatura, diferença de pressão entre a entrada do tubo e as regiões Pa1, Pb1, Pb2, Pb3, Pb4 e Pb5, conforme apresentado na Figura 10.

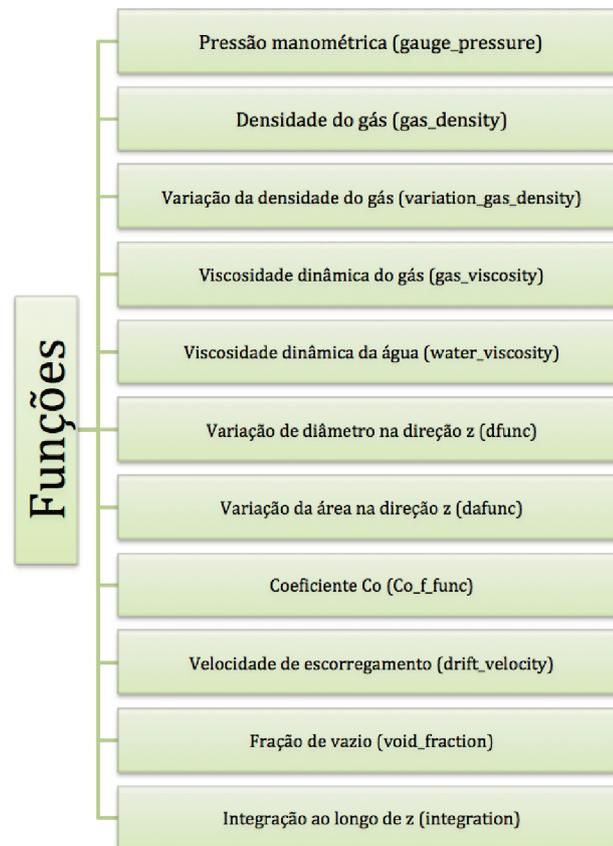
Figura 17 – Parâmetros de entrada do algoritmo de previsão de vazões mássicas



Fonte: O Autor (2019).

Após o algoritmo receber os dados de entrada, a parte principal ficará encarregada de calcular todos os coeficientes do sistema linear apresentado nas equações 28 , 29 , 30 e 31 . Como pode ser visto no Apêndice A, a primeira parte consiste em definir as propriedades mensuradas. Em seguida, são calculadas: a pressão manométrica (Apêndice B), a massa específica do gás (Apêndice C), a variação da densidade do gás em relação à pressão (Apêndice D), a viscosidade dinâmica do gás (Apêndice E) e a viscosidade dinâmica da água (Apêndice F). São então calculadas as variações de geometria do tubo de acordo com o passo selecionado. Verificou-se que os resultados finais não eram modificados se o passo fosse igual ou menor a 1 mm. O cálculo do diâmetro e da área da seção transversal são observados nos Apêndice G e H, respectivamente. Antes do processo de integração, são calculados: o parâmetro de distribuição e o fator de atrito (Apêndice I), a velocidade de escorregamento (Apêndice J) e a fração de vazio (Apêndice K). A sequência lógica apresentada pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma das funções secundárias do algoritmo



Fonte: O Autor (2019).

Na última parte do algoritmo, são calculadas: a velocidade do ar, a velocidade da água, a fração de vazio e a pressão do escoamento a cada 1 mm ao longo do tubo. Para isso, é calculada, na função de integração (Apêndice L), a perda de carga a partir da modificação do parâmetro de Lockhart-Martinelli (Apêndice M). O método utilizado para solucionar o sistema linear com equações diferenciais foi o método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Para prever as vazões mássicas de cada fase é necessário um “chute” inicial com valores prováveis de vazões. A solução teórica do campo de pressões deve se sobrepor às medições de pressão ao longo do Venturi. Para delimitar as combinações de vazões a serem testadas, sugere-se determinar a máxima vazão de líquido e de gás, supondo um escoamento monofásico de líquido e também de gás. Ao implementar um processo iterativo de testes de vazão (a partir de um determinado passo), procura-se a curva teórica gerada de pressão estática com menor desvio em relação aos dados experimentais. As vazões testadas que geram a curva teórica com menor desvio padrão serão consideradas as vazões reais. Para visualizar o gradiente de pressão ao longo do tubo de Venturi, a função do Apêndice N gera gráfico de melhor curva teórica, enquanto no Apêndice O todas as curvas testadas durante o processo iterativo são geradas.

4 RESULTADOS

Na Tabela 6, são apresentados os dados de medição obtidos na bancada multifásica: vazão volumétrica de água e de ar, pressão manométrica, temperatura, diferencial das pressões ao longo do tubo de Venturi. Esses dados serão inseridos na entrada do algoritmo para fazer uma estimativa das vazões volumétricas do ar e da água. Note que o objetivo do algoritmo é prever vazões: reproduzir os resultados da primeira e segunda colunas da Tabela 6. A seleção das possíveis combinações de vazões a serem testadas no algoritmo foram explicadas na seção anterior.

Tabela 6 – Medições da bancada de multifásica

Ql (m3/s)	Qsg (m3/s)	P2 (kPa)	T (°C)	P_a1 (kPa)	P_b1 (kPa)	P_b2 (kPa)	P_b3 (kPa)	P_b4 (kPa)	P_b5 (kPa)
6,513E-04	2,318E-04	2,773E+01	20	8,813E-02	3,671	2,750	1,959	2,351	2,665
8,016E-04	1,550E-03	6,720	20	4,529E-02	1,957	1,191	8,702E-01	7,456E-01	6,539E-01
9,519E-04	1,657E-03	9,652	20	9,652E-02	2,961	1,865	1,278	1,165	9,633E-01
1,102E-03	1,162E-03	2,170E+01	20	1,608E-01	4,191	2,690	1,792	1,679	1,321
1,102E-03	2,480E-04	3,166E+01	20	2,329E-01	5,679	3,617	2,426	2,312	1,752
1,253E-03	6,049E-04	3,173E+01	20	2,220E-01	5,689	3,542	2,421	2,294	1,738
1,403E-03	5,918E-04	4,161E+01	20	3,311E-01	7,309	4,639	3,129	3,051	2,180
1,553E-03	1,072E-03	6,886E+01	20	5,383E-01	1,126E+01	7,115	4,871	4,771	3,360
1,703E-03	9,489E-04	8,423E+01	20	6,707E-01	1,359E+01	8,698	5,898	4,611	3,999
1,854E-03	8,267E-04	1,007E+02	20	7,989E-01	1,608E+01	1,038E+01	7,021	5,340	4,693
2,004E-03	1,001E-03	1,187E+02	20	9,431E-01	1,882E+01	1,224E+01	8,245	6,354	5,451
2,154E-03	8,986E-04	1,384E+02	20	1,051	2,173E+01	1,412E+01	9,474	7,302	6,244

Fonte: O Autor (2019).

Utilizando a presente metodologia e as modificações do coeficiente C para prever a perda de carga por atrito ao longo do Venturi, foram estimadas as vazões mássicas para cada caso presente na Tabela 6. Os resultados obtidos são resumidos na Tabela 7. São apresentadas as vazões testadas que geram curva de pressão com menor desvio em relação às pressões medidas. As estimativas de vazão volumétrica da água e de ar são observadas na primeira e segunda colunas, respectivamente. O desvio padrão dos diferenciais de pressões, o erro da vazão volumétrica de água em relação à vazão medida e o erro da vazão volumétrica do ar em relação à vazão medida são apresentados nas colunas 3, 4 e 5, nessa ordem.

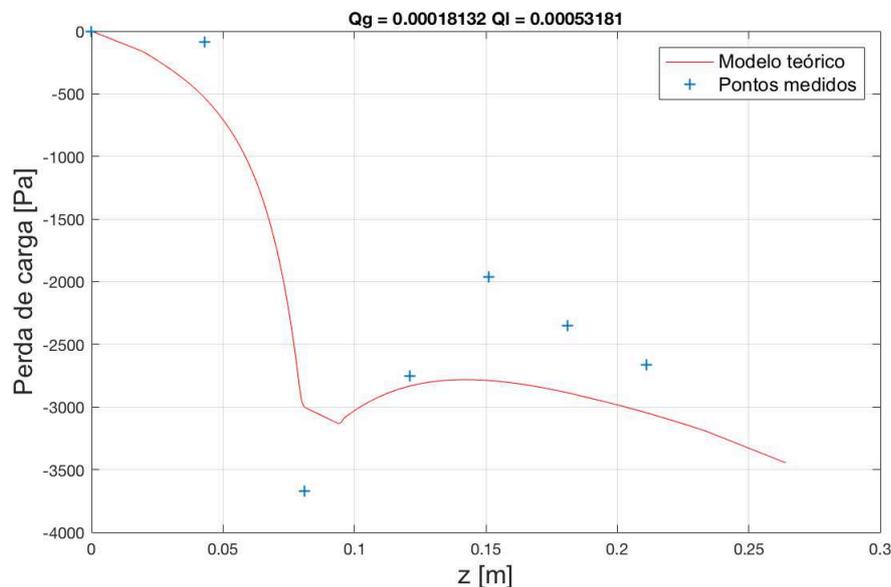
Tabela 7 – Estimativas de vazão mássica a partir do algoritmo proposto

Ql_ans (m3/s)	Qg_ans (m3/s)	Std (Pa)	Err(Ql_ans)	Err(Qg_ans)
5,32E-04	1,81E-04	5,47E+02	18,35%	21,78%
8,02E-04	7,49E-04	5,57E+03	0,00%	51,69%
9,52E-04	8,66E-04	7,37E+03	0,00%	47,73%
1,10E-03	9,04E-04	9,21E+03	0,20%	22,15%
6,48E-04	1,88E-04	1,14E+03	41,21%	24,09%
6,05E-04	4,59E-04	1,64E+03	51,70%	24,13%
6,92E-04	4,18E-04	1,59E+03	50,69%	29,37%
1,10E-03	6,36E-04	3,99E+03	29,17%	40,68%
9,49E-04	5,16E-04	2,68E+03	44,30%	45,60%
1,10E-03	4,13E-04	2,86E+03	40,66%	50,03%
1,20E-03	4,59E-04	3,42E+03	40,12%	54,12%
1,40E-03	3,78E-04	3,57E+03	35,01%	57,89%

Fonte: O Autor (2019).

O erro absoluto máximo, em relação ao medido na bancada, ficou em 57,89 %. Na Figura 19, é apresentado o comportamento típico de uma curva de pressão estática calculada pelo algoritmo. As vazões utilizadas pelo algoritmo correspondem à primeira linha de dados da Tabela 7. Os pontos de medição ao longo do tubo de Venturi são também exibidos.

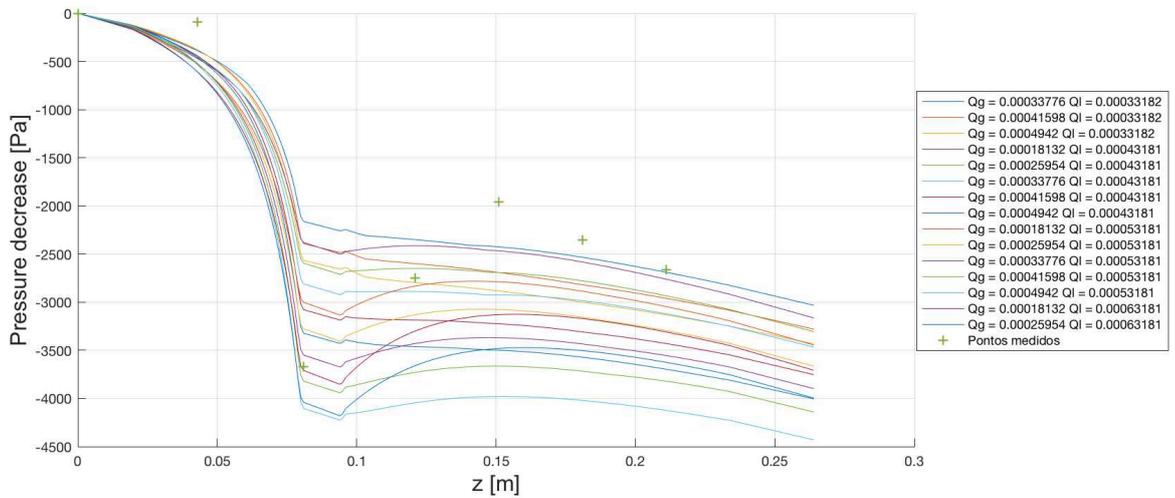
Figura 19 – Comportamento da curva de pressão estática calculada pelo algoritmo



Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 20, é exemplificada a atuação do algoritmo para selecionar as prováveis vazões. Todos os resultados obtidos para o primeiro ponto experimental (primeira linha da Tabela 6) são exibidos. Apenas o resultado com o menor desvio é apresentado na Figura 19.

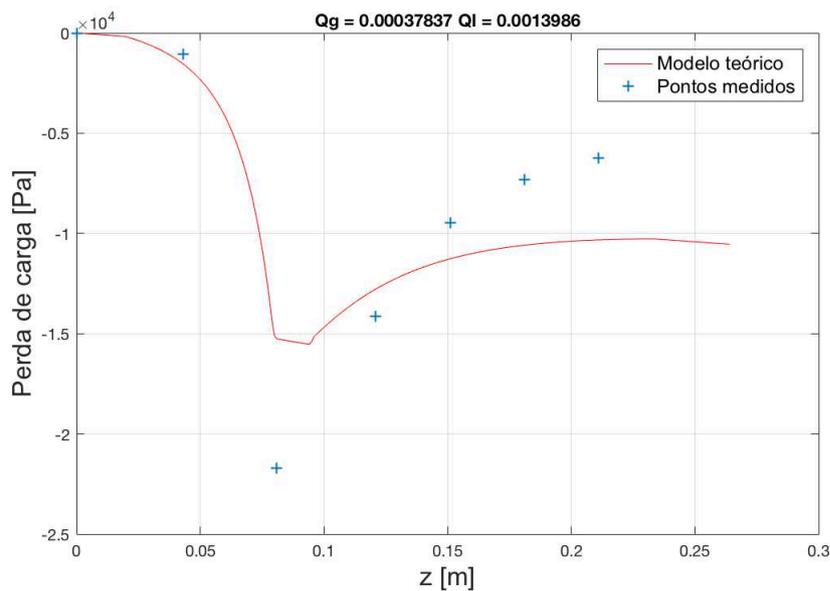
Figura 20 – Curvas de pressão geradas a partir de possíveis combinações de vazão para dados experimentais da primeira linha da Tabela 6



Fonte: O Autor (2019).

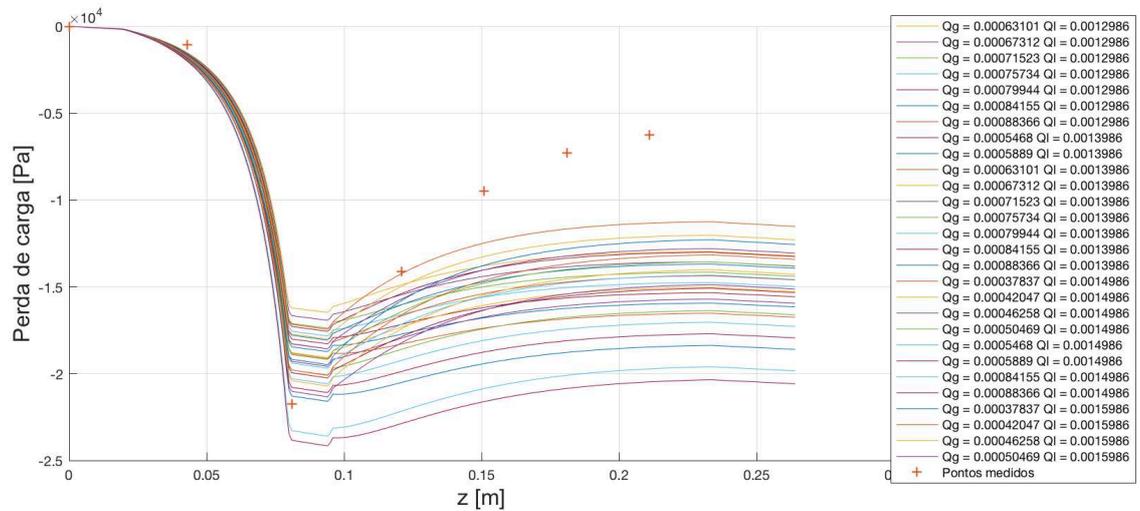
De forma similar, são apresentadas, nas Figuras 21 e 22, a curva de pressão estática calculada pelo algoritmo de melhor representatividade e todas as curvas geradas pelo algoritmo, respectivamente, para o ponto experimental com maiores erros de previsão (última linha da Tabela 7).

Figura 21 – Curva de pressão estática calculada pelo algoritmo para os dados experimentais da última linha da Tabela 6



Fonte: O Autor (2019).

Figura 22 – Curvas de pressão geradas a partir de possíveis combinações de vazão para dados experimentais da última linha da Tabela 6



Fonte: O Autor (2019).

Note que os resultados obtidos pelo algoritmo revelam a necessidade de aperfeiçoar a modelagem da perda de carga bifásica, representada pelo C_{mod} . A utilização da constant C de acordo com os valores sugeridos por Lockhart e Martinelli (1949) também resultam em elevados erros, conforme observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Estimativa de Vazão sem Modificação no Coeficiente C

Ql_ans (m3/s)	Qg_ans (m3/s)	Std (Pa)	Err(Ql_ans)	Err(Qg_ans)
6,32E-04	3,38E-04	292,88	2,99%	-45,70%
8,02E-04	7,49E-04	2,49E+03	0,00%	51,69%
9,52E-04	8,66E-04	2,99E+03	0,00%	47,73%
0,0011	9,04E-04	3,43E+03	0,20%	22,15%
7,48E-04	7,20E-04	353,79	32,14%	-190,16%
7,05E-04	9,14E-04	340,46	43,72%	-51,11%
8,92E-04	7,71E-04	306,62	36,43%	-30,30%
0,0012	8,73E-04	582,82	22,74%	18,54%
0,0014	5,16E-04	543,27	17,81%	45,60%
0,0016	4,13E-04	739,21	13,69%	50,03%
0,0017	6,43E-04	1,06E+03	15,17%	35,80%
0,002	8,84E-04	1,39E+03	7,16%	1,66%

Fonte: O Autor (2019).

5 CONCLUSÕES

Um algoritmo para permitir previsão de vazões de escoamentos multifásicos do tipo líquido-gás, utilizando-se medições de pressão ao longo de um tubo de Venturi modificado foi desenvolvido. O algoritmo determina a evolução das velocidades das fases líquida e gasosa, da fração de vazio e da pressão estática a partir de um sistema linear composto pelas equações de conservação da massa, quantidade de movimento e de um modelo para a velocidade de escorregamento entre fases. As variáveis são determinadas no domínio a partir do método numérico Runge-Kutta de quarta ordem. A motivação para criação do algoritmo é a determinação de vazões em linhas sem a separação de fases, comuns à indústria de óleo e gás.

Medições em uma bancada experimental para gerar escoamentos multifásicos foram realizadas. A bancada se encontra pronta para capturar pressões estáticas ao longo de um Venturi modificado. Os resultados preliminares obtidos para a previsão de vazões são satisfatórios para o estágio atual de trabalho.

Os próximos trabalhos devem ser concentrados na modelagem da perda de carga de escoamentos multifásicos na geometria convergente-divergente do Venturi. É necessária a correção das perdas de cargas de modelos como o de fases separadas que apenas consideram dutos sem variação da seção da transversal. A aceleração e desaceleração do escoamento, além das flutuações de concentração no espaço, demandam modelagem de novos fatores de fricção.

REFERÊNCIAS

BEATTIE, D. R. H.; SUGAWARA, S. Steam-water void fraction for vertical upflow in a 73.9 mm pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 12, n. 4, 1986.

CASSIOLATO, C. **Medição de pressão**. 2008. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/medicao-de-pressao-caracteristicas-tecnologias-e-tendencias>>. Acesso em: 20 jul 2018.

CAUDULLO, A. **Flussi bifase in un venturimetro**. Dissertação (Mestrado) — Univ. “La Sapienza”, Rome, Italy, 1996.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Heat and mass transfer: Fundamentals applications**. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2015.

CHAPRA, S. **Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists**. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2004. (McGraw-Hill International edition).

CHISHOLM, D. Pressure gradients during the flow of incompressible two-phase mixtures through pipes, venturis and orifice plates. **Chem. Eng**, 1967.

COLLIER, J.; THOME, J. **Convective Boiling and Condensation**. Clarendon Press, 1994. ISBN 9780191591266. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=B-1mFnS6UV4C>>.

FALCONE, G. et al. **Multiphase flow metering: current trends and future developments**. [S.l.]: SPE, 2002.

FALCONE, G.; HEWITT, G. F.; ALIMONTI, C. **Multiphase Flow Metering**. [S.l.]: Elsevier, 2009. v. 54.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

HARMATHY, T. Z. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent. **AIChE**, 1960.

IBP. **Ciclo de debates sobre petróleo e economia: Custos e competitividade da atividade de e&p no brasil**. [S.l.]: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2016. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2016/07/TD-custosecompetitividade.pdf>>. Acesso em: 5 set. 2017.

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

OLIVEIRA, J. L. G. et al. Mass flow rate measurements in gas–liquid flows by means of a venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2008.

PEIXIANG, H. et al. A new method of measuring two-phase mass flow rates in a venturi. **Multiphase Science and Technology**, v. 21, 2009.

PEREIRA, M. F. **Determinação das vazões em escoamentos bifásicos ar-água por meio de tubo venturi e medidor de fração de vazio**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

TOOLBOX, E. **Types of fluid flow meters**. 2003. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/flow-meters-d_493.html>. Acesso em: 21 jun. 2018.

WALLIS, G. B. **One-dimensional Two-phase Flow**. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1969.

WHITE, E. T.; BEARDMORE, R. H. The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquid contained in vertical tubes. **Chemical Engineering Science**, 1962.

ZUBER, N.; FINDLAY, J. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. **Journal of Heat Transfer**, v. 87, 1965.

APÉNDICE A

1 %	<i>Ql:</i>	=	<i>Liquid Flow Rate (m3/s)</i>
2 %	<i>Qsg:</i>	=	<i>Gas Flow Rate (stand m3/s)</i>
3 %	<i>P1</i>	=	<i>Relative pressure_model P1 (Pa)</i>
4 %	<i>P2</i>	=	<i>Relative pressure_model P2 (Pa)</i>
5 %	<i>t:</i>	=	<i>Test temprature (in degrees Celsius)</i>
6 %	<i>Pa1:</i>	=	<i>differential pressure_model drop Pa1 (Pa)</i>
7 %	<i>Pb1:</i>	=	<i>differential pressure_model drop Pb1 (Pa)</i>
8 %	<i>Pb2:</i>	=	<i>differential pressure_model drop Pb2 (Pa)</i>
9 %	<i>Pb3:</i>	=	<i>differential pressure_model drop Pb3 (Pa)</i>
10 %	<i>Pb4:</i>	=	<i>differential pressure_model drop Pb4 (Pa)</i>
11 %	<i>Pb5:</i>	=	<i>differential pressure_model drop Pb5 (Pa)</i>

12

13

14 %

15 %

Defining variables

16 %

```

17 gas_prop = 1.2041;
18 rhol = 998;
19 Ql = input('Ql: \n');
20 Qg = input('Qg: \n');
21 P1 = input('P1: \n');
22 P2 = input('P2: \n');
23 P_a1 = input('P_a1: \n');
24 P_b1 = input('P_b1: \n');
25 P_b2 = input('P_b2: \n');
26 P_b3 = input('P_b3: \n');
27 P_b4 = input('P_b4: \n');
```

```

28 P_b5 = input('P_b5: \n');
29 T = input('T: \n');
30 range = input('Range: \n');
31
32 flow_init = sort([ Ql, Qg]);
33 flow_range = flow_init(1):range:flow_init(2);
34
35 Pa1z = P_a1*1000;
36 Pb1z = P_b1*1000;
37 Pb2z = P_b2*1000;
38 Pb3z = P_b3*1000;
39 Pb4z = P_b4*1000;
40 Pb5z = P_b5*1000;
41 %
42 %
43 %
44
45 % gravitational acceleration [m/s2]
46 g = 9.81;
47
48 % gauge pressure_model at Pa2 [kPa]
49 Pp= gauge_pressure(P1,P2);
50
51 % gas density [kg/m3]
52 rhog = gas_density(T,Pp,gas_prop);
53
54 % change of gas density to the changes of pressure_model
55 drhogdp = variation_gas_density(T,gas_prop);
56
57 % gas viscosity [Pa*s]
58 mug= gas_viscosity(T);
59
60 mul = water_viscosity(T);
61

```



```

90 Zero_offset_Pb1 = 0;
91 Zero_offset_Pb2 = 0;
92 Zero_offset_Pb3 = 0;
93 Zero_offset_Pb4 = 0;
94 Zero_offset_Pb5 = 0;
95
96 %Differential pressure_model with zero offset correction
97 Pa1 = Pa1z + Zero_offset_Pa1;
98 Pb1 = Pb1z + Zero_offset_Pb1;
99 Pb2 = Pb2z + Zero_offset_Pb2;
100 Pb3 = Pb3z + Zero_offset_Pb3;
101 Pb4 = Pb4z + Zero_offset_Pb4;
102 Pb5 = Pb5z + Zero_offset_Pb5;
103
104 %

105 %                               Numerical method

106 %

107
108 step = 0.001;                    % integration step [m]
109
110 %

111 %                               Geometry of the venturi

112 %

113
114 z      = (0: step: L);
115 N_z    = max(size(z)) ;
116 dVldz  = zeros(1,N_z) ;
117 Co     = zeros(1,N_z) ;
118 Vs     = zeros(1,N_z) ;

```

```

119 Acc = zeros(1,N_z) ;
120
121
122 %

123 %                               Geometric subroutine

124 %

125
126 d = dfunc(L1,L2,L3,L4,L5,D1,d1,z); % Diameter [m] matrix form
127
128 s = pi * d.^2 /4 ;                % Surface [m2] matrix form
129 da = dafunc(d,z);
130
131 % Index at which 'element' de divergent part starts
132 k_diverg_start = find(z>(L1+L2+L3),1,'first') ;
133
134 %

135 %                               Graphics

136 %

137
138 % The following are the pressure drops measured to Pp
139 pa2 = 0;                          % A2
140 pa1 = Pa1;                         % A1
141 pb1 = Pb1;                         % B1
142 pb2 = Pb2;                         % B2
143 pb3 = Pb3;                         % B3
144 pb4 = Pb4;                         % B4
145 pb5 = Pb5;                         % B5
146
147 p_test = [pa2, pa1, pb1, pb2, pb3, pb4, pb5];

```

```

148
149 % And the following are the corresponding positions to that of
      Pp:
150 za0 = 0;
151 za1 = z1;
152 zb1 = z1+z2;
153 zb2 = z1+z2+z3;
154 zb3 = z1+z2+z3+z4;
155 zb4 = z1+z2+z3+z4+z5;
156 zb5 = z1+z2+z3+z4+z5+z6;
157
158 z_point = [za0, za1, zb1, zb2, zb3, zb4, zb5];
159
160 %

161 %                               Initialization

162 %

163 iterator = 1;
164 results.liquid_flux = [];
165 results.gas_flux = [];
166 results.sigma = [];
167 results.equation = {};
168
169 for Ql = flow_range
170     for Qg = flow_range
171
172         Q      = Qg + Ql;                % [m^3/s]
173         beta   = Qg / Q;                % [ ]
174         mdotg  = rhog * Qg;             % [kg/s]
175         mdotl  = rhol * Ql;             % [kg/s]
176         Gg     = mdotg / s(1);          % [kg/(m^2*s)]
177         Gl     = mdotl / s(1);          % {kg/(m^2*s)}
178         G      = Gg + Gl;                % total mass
            flux [kg/(m^2*s)]

179

```

```

180     Re= d(1) * G / (mul);           % Reynolds
        number [ ]
181     [Co(1), friction_f] = Co_f_func(Re);   %
        distribution parameter [ ]
182
183     % Drift velocity
184     Vs = drift_velocity(rhol,rhog); %1.53 * ((0.073*9.8*(
        rhol rhog))/(rhol^2))^0.25;
185
186     alfa = void_fraction(Qg,Co(1),Q,Vs(1),s(1)); % Qg ./ (
        Co(1) .* Q + Vs .* s);           % Void fraction [ ]
187     vg = Qg / (alfa * s(1));           % average
        water velocity [m/s]
188     vl = Ql / ((1 - alfa) * s(1));           % average
        water velocity [m/s]
189
190 %
191 %
        Integration start
192 %
193 % The following coefficients are used in the Runge Kutta method
        :
194     p1 = 1/2;
195     q  = 1/6;
196
197     [l , dvldz] = integration(N_z,vg,vl , alfa , Pp,mdotg , mdotl , s
        ,d,mul,mug,rhol ,...
198         rhog , drhogdp , da , p1 , q , step , Acc , dvldz ) ;
199
200 %
201 %
        Difference between Theory and Experiments
202 %

```

```

203
204     % Pressure of model at points measurements
205     % First 2 points at 0 m are not taken into account
206     P_1stPoint = l(4,round(za1/step))    l(4,1);
207     P_2ndPoint = l(4,round(zb1/step))    l(4,1);
208     P_3rdPoint = l(4,round(zb2/step))    l(4,1);
209     P_4thPoint = l(4,round(zb3/step))    l(4,1);
210     P_5thPoint = l(4,round(zb4/step))    l(4,1);
211     P_6thPoint = l(4,round(zb5/step))    l(4,1);
212
213     % Difference between measured and predict pressure
214     Verschil_1stPoint = pa1    P_1stPoint;
215     Verschil_2ndPoint = pb1    P_2ndPoint;
216     Verschil_3rdPoint = pb2    P_3rdPoint;
217     Verschil_4thPoint = pb3    P_4thPoint;
218     Verschil_5thPoint = pb4    P_5thPoint;
219     Verschil_6thPoint = pb5    P_6thPoint;
220
221     results.liquid_flux(iterator) = Ql;
222     results.gas_flux(iterator) = Qg;
223
224     % Average difference over 6 measured points [Pa]
225     results.sigma(iterator) = sqrt(( (Verschil_1stPoint)^2+(
226         Verschil_2ndPoint)^2+ ...
227         (Verschil_3rdPoint)^2+(Verschil_4thPoint)^2+(
228         Verschil_5thPoint)^2+...
229         (Verschil_6thPoint)^2)/6);
230
231     results.equation{iterator} = l;
232     iterator = iterator + 1;
233
234 end
235 end
236
237 result_index = find(results.sigma == min(results.sigma));
238 err = min(results.sigma)

```

```
238 Ql_ans = results.liquid_flux(result_index)
239 Qg_ans = results.gas_flux(result_index)
240
241 plot_single_graphic(p_test , z , z_point , results , result_index) ;
242
243 plot_multiple_graphics(p_test , z , z_point , results) ;
```

APÉNDICE B

```
1 % gauge pressure_model at Pa2 [kPa]
2
3 function Pp = gauge_pressure(P1, P2)
4 Pp = P2 - P1;
5 end
```

APÉNDICE C

```
1 % gas density [kg/m3]
2
3 function rhog = gas_density(T, Pp, gas_prop)
4
5 rhog = gas_prop.* ((273.15 + 21.1) ./ (273.15 + T)) .* (101.325 +
    Pp) ./ 101.325;
6
7 end
```

APÉNDICE D

```
1 function drhogdp = variation_gas_density(T, gas_prop)
2
3 drhogdp = gas_prop.* ((273.15 + 21.1)./(273.15 + T))./101325;
4
5 end
```

APÊNDICE E

```
1 % gas viscosity [Pa*s]
2 function mug = gas_viscosity(T)
3
4 mug= 0.001 .* (0.0000048.*(273.15 + T)+ 0.001721);
5
6 end
```

APÊNDICE F

```
1 function mul = water_viscosity(T)
2
3 mul = 1.0016*10^3 * ((273.15 + 20)./(273.15 + T));
4
5 end
```

APÉNDICE G

```

1 function dia = dfunc(L1,L2,L3,L4,L5,D1,d1,z)
2 %This M file defines the function  $D(z)=D+B/L*z$ 
3
4 z1 = L1;
5 z2 = (z1+L2);
6 z3 = (z2+L3);
7 z4 = (z3+L4);
8 z5 = (z4+L5);
9 LL2 = L2;
10 LL4 = L4;
11
12 dia=zeros(size(z));
13
14 for k=1:length(z)
15
16
17 if ( z(k) < z1 ) dia(k) = D1;
18 % Straight part
19 elseif ( (z(k) >= z1) & (z(k) < z2) ) dia(k) = (D1 ((D1 d1)/
20 LL2)*(z(k) z1)); % Convergent
21 elseif ( (z(k) >= z2) & (z(k) < z3) ) dia(k) = d1;
22 % Throat
23 elseif ( (z(k) >= z3) & (z(k) < z4) ) dia(k) = (d1+((D1 d1)/
24 LL4)*(z(k) z3)); % Divergent
25 elseif ( (z(k) >= z4) & (z(k) < z5) ) dia(k) = D1;
26 % Straight part
27 else dia(k) = D1;
28 end
29 end;
30
31
32
33 %plot(z, dia)

```

APÉNDICE H

```
1 %ds/dz=pi*r*dd/dz
2
3 function A = dafunc(d,z)
4
5
6 A=zeros(size(z));
7
8 for k=2:length(z)
9
10 A(k-1) = pi*d(k-1)/2 * (d(k)-d(k-1))/(z(k)-z(k-1));
11
12 end;
13
14
15 %plot(z,A)
```

APÊNDICE I

```
1 % Co_f_func.m
2
3 function [Co, friction_f] = Co_f_func(Re)
4 %
5
6 friction_f = 5.525 * 1.e 2 *(Re^( 0.2370)) + 8.0 * 1.0e 4 ;
7 Co = 1 + 2.6 * sqrt(friction_f);           % distribution
      parameter [ ]
```

APÊNDICE J

```
1 function Vs = drift_velocity(rhol,rhog)
2
3 Vs = 1.53 * ((0.073*9.8*(rhol rhog))/(rhol^2))^0.25;
4
5 end
```

APÊNDICE K

```
1 %void fraction
2 function alfa = void_fraction(Qg,Co,Q,Vs,s)
3
4 alfa = Qg / (Co * Q + Vs * s);
5
6 end
```

APÊNDICE L

```

1
2 function [l , dvldz] = integration (N_z, vg, vl , alfa , Pp, mdotg , mdotl ,
      s, d, mu_l , mu_g, rho_l , ...
3     rhog , drhogdp , da , p1 , q , step , Acc , dvldz)
4 %

5 %           Integration variables

6 %

7     l = zeros(4 , N_z);
8     l(1 , 1) = vg(1);           % Initial
      conditions
9     l(2 , 1) = vl(1);
10    l(3 , 1) = alfa(1);
11    l(4 , 1) = (101.325+Pp) * 1.e3;   % pressure [Pa]
12
13    Notfinished = 1;
14    k = 0;
15
16 %

17 %           Integration start

18 %

19
20    while Notfinished

```

```

21
22     k = k+1 ;
23
24     vg(k) = l(1,k) ;
25     vl(k) = l(2,k) ;
26     alfa(k) = l(3,k) ;           % void fraction
27     P      = l(4,k) ;           % pressure in Pa
28
29     G      = (mdotg + mdotl) ./ s(k);           % total mass
           flux
30
31     Re     = d(k) * G / (mul) ;
32
33     if k > 1
34         Acc(k) = dvldz(k-1) * step / vl(k-1) ;
35     end
36
37     [Co(k), friction_f] = Co_f_func(Re);
38
39     dpdz_fric = f_martinelli(mdotg, mdotl, rhog, rhog, mul,
           mug, ...
40     d(k) , Acc(k));
41
42 %
43 %
44 %           End point integration
45 %
46 %           at the end point the following computations are not
47 %           performed:
48 %
49 %           if k < N_z
50
51     k1     = dvdz_1_func(rhog, rhog, l(3,k), l(1,k), l(2,k),
           drhogdp, ...
52     Co(k), da(k), s(k), dpdz_fric, P);

```

```

51      % Runge Kutta with p1 = 1/2 and q = 1/6:
52
53      temp = l(:, k) + p1*step*k1 ;
54      da_t = p1 * (da(k+1)+da(k));
55      s_t   = p1 * (s(k+1)+s(k));
56
57      k2    = dvdz_1_func(rhog , rhol , temp(3) , temp(1) , temp(2) ,
58                        drhogdp , Co(k) , da_t , s_t , dpdz_fric , P);
59
60      temp = l(:, k) + (p1*step*k2);
61
62      k3    = dvdz_1_func(rhog , rhol , temp(3) , temp(1) , temp(2) ,
63                        drhogdp , Co(k) , da_t , s_t , dpdz_fric , P);
64
65      temp = l(:, k) + (step*k3);
66
67      k4    = dvdz_1_func(rhog , rhol , temp(3) , temp(1) , temp(2) ,
68                        drhogdp , Co(k) , da_t , s_t , dpdz_fric , P);
69
70      l(:, k+1) = l(:, k) + step*(q*(k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4));
71      % RK 4?ordine
72      dldz(k) = (l(2,k+1) - l(2,k)) / step ;
73
74      end
75
76      if k >= N_z
77          Notfinished = 0 ;
78      end
79 end % end of while
end

```

APÊNDICE M

1 %

2 % *PROGRAMME TO SHOW THE GRAPHIC RELATIONSHIP BETWEEN*
 3 % *PRESSURE DROP PRODUCED BY FRICTION FORCES AND STEAM*
 FRACTION.

4 %

5 % *Model by LOCKHART & MARTINELLI.*

6 %

7 %

8 %

9 % *Input Parameters :*

10 %

11 % *x:= Quality*

12 % *mx:= Liquid Mass Flow Rate*

13 % *m_{xgas}:= Gas Mass Flow Rate*

14 % *ro_l:= Liquid Mass Density*

15 % *ro_g:= Gas Mass Density*

16 % *mu_l:= Liquid Dynamic Viscosity*

17 % *mu_g:= Gas Dynamic Viscosity*

18 % *n:= Parameter of Blasius ' Equation*

19 % *D:= Diameter of the pipe*

20 %

21 %

22 **function** [f_mar]= f_martinelli(m_{xgas}, mx, ro_l, ro_g, mu_l,
 mu_g, D, Acc)

23

24

25 %

26 %

Needed parameters

27 %

28

29 $mt = mx + mx_{gas};$ % Total Mass Flow

Rate 's Array

30 $x = mx_{gas} ./ mt;$ % Qualities 's Array

31

32 $AREA = \pi * (D^2) / 4;$ % [m^2]

33

34 $G = mt ./ AREA;$ % [$kg / (m^2 * s)$]

35

36 $ReL = G * (1 - x) * D / \mu_l;$

37 $ReG = G * x * D / \mu_g;$

38

39 $absje = 1;$

40 **if** $\sim(abs(Acc) < 1.e 15)$

41 $absje = abs(Acc);$

42 **end**

43

44 %

45 %

Methods to determine c

46 %

47 $method = 1;$

48

49 **if** $method == 1;$

50 $Re_{trans1} = 3000 ;$

51 **if** $ReL < Re_{trans1}$

52 **if** $ReG < Re_{trans1}$

```

53         c=5;
54     else
55         c=12;
56     end
57 end
58 if ReL >= Re_trans1 ,
59     if ReG < Re_trans1
60         c=10;
61     else
62         c= 20;
63     end
64 end
65 end
66
67 if method == 2;
68     Re_trans1 = 13000 ;
69     Re_trans2 = 8000 ;
70     Re_trans3=20000;
71     if ReL < Re_trans1
72         if ReG < Re_trans2
73             c= 5 + (0.3/1)*(1.5   Acc/ absje)*400*abs(Acc)*ReL
              /4000;
74         else
75             c= 10+ (0.5/1)*(1.5   Acc/ absje)*400*abs(Acc)*ReL
              /4000;
76         end
77     end
78     if ReL >= Re_trans1 ,
79         if ReG < Re_trans2
80             c= 12+ (0.01/1)*(1.5   Acc/ absje)*400*abs(Acc)*ReL
              /4000;
81         else
82             c = 20 + (1/0.6)*(1.5   Acc/ absje)*400*abs(Acc)*
              ReL/4000 ;
83         end
84     end
85     if ReL >= Re_trans3 ,
86         if ReG < Re_trans2
87             c = 20 + (0.5/1)*(1.5   Acc/ absje)*400*abs(Acc)*

```

```

ReL/4000;
88     else
89         c = 20 + (1/0.425)*(1.5 Acc/absje)*400*abs(Acc)
           *ReL/4000 ;
90     end
91 end
92 end
93
94 %

95 %           Determination of fG and fL

96 %

97
98 [fL , n_mar] = f_Blasiusplus( ReL ) ;
99 [fG , n_mar] = f_Blasiusplus( ReG ) ;
100
101 %

102 %           Multiphase flow equations

103 %

104
105 gradL = (2*fL*(G^2)*(1-x)^2)/(D*ro_l) ;
106 gradG = (2*fG*(G^2)*x^2)/(D*ro_g) ;
107
108 Xkwadraat = gradL./gradG ;
109
110 phiL2= 1 + (1 ./ Xkwadraat) + (c./(Xkwadraat.^(0.5))) ;
111
112 phiG2= 1 + Xkwadraat + (c .* (Xkwadraat.^(0.5)));
113 %

```

```
114 %                               Two phase flow

115 %

116
117 if mxgas >= 0.0000001           % massflow gas is not 0
118     if Xkwadraat > 1
119         gfriction = fitfactor .* phiL2.*gradL;
120     end
121     if Xkwadraat <= 1
122         gfriction = fitfactor .* phiG2.*gradG;
123     end
124 end
125
126 %

127 f_mar = gfriction ;
```

APÉNDICE N

```

1 %plot single graphic
2 function plot_single_graphic(p_test, z, z_point, results, index
   )
3 figure ('Name', 'Best Pressure Profile')
4 plot(z, results.equation{index}(4,:) results.equation{index
   }(4,1), ...
5      'r', z_point, p_test, '+')
6 xlabel ('z [m]')
7 grid
8 ylabel ('Pressure decrease [Pa]')
9 flop = ['Qg = ', num2str(results.gas_flux(index)), ' Ql = ',
   ...
10      num2str(results.liquid_flux(index))];
11 title (flop);
12 legend ('Theoretical model ', 'Measurement points')
13 end

```

APÉNDICE O

```

1 function plot_multiple_graphics(p_test, z, z_point, results)
2 figure ('Name', 'Pressure Profiles')
3 hold on
4 for iterator = 1:length(results.equation)
5     plot_legend = ['Qg = ', num2str(results.gas_flux(iterator)),
6         ...
7         ' Ql = ', num2str(results.liquid_flux(iterator))];
8     plot(z, results.equation{iterator}(4,:) results.equation{
9         iterator}(4,1) ,...
10         'DisplayName', plot_legend)
11 end
12 plot( z_point, p_test, '+', 'DisplayName', 'Measurement points')
13 xlabel('z [m]')
14 grid
15 ylabel('Pressure decrease [Pa]')
16 title('Pressure profile in venturi: pressure drop against
17     distance')
18 hold off
19 legend show

```