

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO EM
VÁLVULAS CHOKE ATRAVÉS DE FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rafael Rigon Paveglio

Porto Alegre

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO EM VÁLVULAS CHOKE ATRAVÉS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Rafael Rigon Paveglio

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Pesquisa e Desenvolvimento de Processos.

Linha de Pesquisa: Projeto, Simulação, Modelagem, Controle e Otimização de Processos Químicos e Bioprocessos.

Orientadores:

Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler

Prof. Dr. Marcelo Farenzena

Porto Alegre

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação intitulada “Estudo de Escoamento Multifásico em Válvulas *Choke* Através de Fluidodinâmica Computacional”, elaborada por Rafael Rigon Paveglio, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Comissão Examinadora:

Dr. Fabio Cesar Diehl – Petrobras

Prof. Dr. Márcio André Fernandes Martins, PEI / UFBA

Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo, PPGEQ / UFRGS

Resumo

Em uma plataforma petrolífera, estimar ou mensurar a vazão durante todo o ciclo produtivo é essencial para o controle e otimização do processo. Entretanto, a correta medição da vazão é um dos principais desafios enfrentados nessa indústria, devido principalmente aos diferentes padrões de escoamento e à complexidade do fluido, que é uma mistura multifásica composta predominantemente por óleo, gás natural, CO₂ e água. Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é avaliar o uso de correlações simples de válvulas de controle, aplicadas em uma válvula *choke* que recebe o petróleo na plataforma (*topside*), para inferir a vazão. Como variáveis, foram utilizadas a queda de pressão a montante e a jusante da válvula, a abertura da válvula, a composição do fluido e o padrão de escoamento. A válvula *choke* foi modelada em CAD a partir de catálogos de uma válvula real e os dados de escoamento foram obtidos através de simulações em fluidodinâmica computacional (CFD) utilizando o software COMSOL Multiphysics®. As simulações foram realizadas para escoamento turbulento monofásico incompressível (água), multifásico incompressível (água e óleo) e multifásico compressível (água e ar). Para os casos multifásicos, foram utilizados escoamento homogêneo e padrão de escoamento de bolhas/gotículas dispersas. As curvas características, que relacionam a abertura da válvula com o coeficiente de vazão (C_v), foram desenvolvidas a partir dos dados obtidos através das simulações em CFD para os diferentes tipos de escoamento e apresentaram um perfil muito semelhante ao da válvula real, com Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE) de 40,25% para os valores de C_v . As correlações para os diferentes casos de escoamento incompressível resultaram em valores de C_v muito próximos (MAPE entre 1,98% e 3,46%). A correlação para o escoamento multifásico compressível apresentou, além de um perfil muito semelhante, um MAPE de 8,71%. Devido às limitações do software de CFD, para o escoamento multifásico compressível só foi possível realizar simulações com baixas frações volumétricas de ar a montante da válvula ($\approx 4,5\%$). De modo geral, as correlações empregadas são uma alternativa para inferir a vazão que passa pela válvula *choke* no *topside* de uma plataforma de petróleo, apresentando baixos erros para o coeficiente de vazão entre os escoamentos multifásicos e o monofásico.

Palavras-chave: fluidodinâmica computacional; válvula *choke*; escoamento multifásico.

Abstract

On an oil platform, estimating or measuring flow rate throughout the production cycle is essential for process control and optimization. However, accurately measuring flow rate is a significant challenge in this industry due to the diverse flow patterns and the complexity of the fluid, which is a multiphase mixture primarily containing oil, natural gas, CO₂, and water. In this context, the objective of this study is to evaluate the use of simple control valve correlations applied to a topside choke valve to infer flow rate. The variables include the upstream and downstream pressure drop, valve opening, fluid composition, and flow pattern. The choke valve was modeled in CAD using catalogs of a real valve and flow data were obtained through computational fluid dynamics (CFD) simulations using COMSOL Multiphysics® software. Simulations were conducted for incompressible single-phase flow (water), incompressible multiphase flow (water and oil), and compressible multiphase flow (water and air). For multiphase cases, homogeneous flow with dispersed bubbly flow pattern were employed. The characteristic curves, which establish the relationship between valve opening and the flow coefficient (C_v), were constructed using the CFD simulation data for the different flow scenarios and exhibited a profile similar to that of the real valve, with a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 40.25% for C_v values. The correlations for different incompressible flow cases resulted in very close C_v values (MAPE ranging from 1.98% to 3.46%). The correlation for compressible multiphase flow exhibited a similar profile but with an 8.71% MAPE. Due to CFD software limitations, simulations for compressible multiphase flow could only be performed with low volumetric fractions of air upstream of the valve ($\approx 4.5\%$). Overall, these correlations offer an alternative for inferring flow rate through the topside choke valve on an oil platform, demonstrating low errors for the flow coefficient between multiphase and single-phase flows.

Keywords: computational fluid dynamics; choke valve; multiphase flow.

“Um expert é uma pessoa que cometeu todos os erros que podem ser cometidos em um campo muito restrito”.
(Niels Bohr)

Agradecimentos

Agradeço à minha família pelo suporte em todos os momentos e pela inspiração para sempre buscar ser uma pessoa melhor em todos os aspectos.

Agradeço à minha namorada pelo apoio, cobranças, amizade e companheirismo durante toda essa jornada.

Agradeço aos professores Marcelo Farenzena e Jorge Trierweiler pela oportunidade de fazer parte do grupo GIMSCOP, por todos os ensinamentos e experiências proporcionados e por serem atenciosos e compreensivos.

Também agradeço ao suporte fornecido pela UFRGS e pelo apoio financeiro da CAPES e da Petrobras.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Objetivos do trabalho.....	3
1.2 Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	4
2.1 Sistemas de extração e produção de petróleo	4
2.2 escoamento multifásico	6
2.3 Válvula <i>choke</i>	9
2.4 Dimensionamento de válvulas de controle	12
2.4.1 escoamento monofásico incompressível	15
2.4.2 escoamento monofásico compressível	15
2.4.3 Equações para escoamento incompressível.....	17
2.4.4 Equações para escoamento compressível.....	17
2.4.5 Constantes de Conversão N.....	18
2.5 Fluidodinâmica computacional	20
Capítulo 3 – Metodologia	22
3.1 Modelagem da Válvula.....	22
3.2 Simulações em CFD	23
3.2.1 Simulações para escoamento monofásico incompressível	24
3.2.2 Simulações para escoamento multifásico incompressível	26
3.2.3 Simulações para escoamento multifásico compressível	28
3.3 Determinação da curva característica.....	29
3.3.1 Curva característica para escoamento monofásico incompressível	30
3.3.2 Curva característica para escoamento multifásico incompressível	30
3.3.3 Curva característica para escoamento multifásico compressível	31
Capítulo 4 – Resultados	33
4.1 escoamento monofásico incompressível	33
4.2 escoamento multifásico incompressível	37
4.3 escoamento multifásico compressível	40
4.4 Erro Médio Absoluto (MAE) e Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE)	42
Capítulo 5 – Considerações Finais	44
5.1 Conclusões.....	44
5.2 Perspectivas para trabalhos futuros	45
Referências	46
Apêndice 1 – Determinação das dimensões dos orifícios da válvula.....	50
Anexo 1 – Dados de catálogo da válvula <i>choke</i> Master Flo™ <i>external sleeve</i> P8	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema representativo de um sistema de extração de petróleo <i>offshore</i> . Adaptado de Di Meglio <i>et al.</i> (2012).	4
Figura 2.2: Exemplo representativo de um separador trifásico. Adaptado de Jahanshahi (2013).	6
Figura 2.3: Padrões de escoamento horizontais. Adaptado de Stuckenbruck (2021).	7
Figura 2.4: Padrões de escoamento verticais. Adaptado de Stuckenbruck (2021).	8
Figura 2.5: Válvula <i>choke</i> . Fonte: Master Flo (2020).	9
Figura 2.6: Geometria interna de uma válvula <i>choke</i> . Fonte: Master Flo (2020).	10
Figura 2.7: Diagrama de Moody (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).	14
Figura 3.1: Corpo da válvula de acordo com o catálogo.	22
Figura 3.2: Estrutura interna da válvula modelada em AutoCAD.	23
Figura 3.3: Válvula 3D utilizada nas simulações (abertura 100%).	23
Figura 3.4: Malha confeccionada para as simulações.	26
Figura 4.1: Perfil de pressão para escoamento monofásico de água na válvula <i>choke</i>	34
Figura 4.2: Vista superior do perfil de velocidade na válvula com linhas de corrente.	34
Figura 4.3: Vista lateral do perfil de velocidade na válvula com linhas de corrente.	35
Figura 4.4: Perfis de velocidade na válvula para as aberturas de (a) 10%, (b) 15%, (c) 20% e (d) 30%.	36
Figura 4.5: Comparação entre as curvas características da válvula.	36
Figura 4.6: Curva da vazão versus raiz quadrada da queda de pressão.	37
Figura 4.7: Perfil de (a) pressão e (b) velocidade na válvula <i>choke</i> para escoamento multifásico incompressível.	38
Figura 4.8: Fração volumétrica de óleo ao longo da válvula.	38
Figura 4.9: Curvas características para escoamento multifásico incompressível.	39
Figura 4.10: Perfil de (a) pressão e (b) velocidade na válvula <i>choke</i> para escoamento multifásico compressível.	40
Figura 4.11: Fração volumétrica de ar ao longo da válvula.	40
Figura 4.12: Perfil de densidade do ar ao longo da válvula.	41
Figura 4.13: Curva característica para escoamento multifásico compressível.	42
Figura A.1: Corpo da válvula Master Flo™ P8 <i>External Sleeve</i>	50
Figura A.2: Abertura circular descoberta somente na parte inferior.	51
Figura A.3: Abertura circular descoberta acima do centro do círculo.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Equações para escoamento incompressível em válvulas de controle.....	17
Tabela 2.2: Equações para escoamento compressível em válvulas de controle.....	18
Tabela 2.3: Definição das constantes N.	19
Tabela 2.4: Valores das constantes N.	19
Tabela 3.1: Velocidade média a montante para cada abertura de válvula.	25
Tabela 4.1: MAE e MAPE para escoamentos multifásicos em relação ao monofásico.	43

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

A	Área transversal
C_v	Coefficiente de vazão
f	Fator de atrito
F_k	Fator da razão dos calores específicos em relação ao ar
f_l, f_g	Fração mássica
F_p	Fator geométrico
g	Aceleração gravitacional
G	Densidade relativa
G_g	Densidade relativa para gases
h_L	Perda de carga
K	Coefficiente de perda ou Coeficiente de Resistência
k	Razão dos calores específicos
M	Massa molecular
N_i	Termos de conversão de unidades
P	Pressão
Q	Vazão volumétrica
R	Constante universal dos gases perfeitos
T	Temperatura
u	Velocidade
v	Volume específico
v_e	Volume específico efetivo
V_m	Volume molar do gás
w	Vazão mássica
x	Taxa de queda de pressão
x_T	Limite da taxa de queda de pressão
Y	Fator de expansão do gás
Z	Fator de compressibilidade do gás
ΔZ	Elevação em relação ao plano de referência
ρ	Densidade absoluta
φ	Fração volumétrica

Capítulo 1 – Introdução

A exploração e produção de petróleo e gás natural é uma atividade essencial para o desenvolvimento tecnológico do país e para garantir sua autossuficiência energética e econômica. Nos últimos anos, a produção de petróleo tem crescido de forma expressiva, impactando de forma direta a economia nacional. De acordo com dados disponibilizados no boletim da produção de petróleo e gás natural (ANP, 2021), a produção total em 2021 foi de 1,060 bilhão de barris de petróleo e 48,8 bilhões de metros cúbicos de gás natural, totalizando uma produção de 1,367 bilhão de barris de óleo equivalente, da qual a maior parte da produção (93,9%) foi proveniente da exploração *offshore*.

No Brasil, conforme estabelecido pela Lei nº 9.478/97, conhecida como Lei do Petróleo, todos os direitos de exploração e produção de petróleo e gás natural pertencem à União, cabendo à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) atuar como órgão regulador. A União, por sua vez, pode permitir que empresas estatais ou privadas realizem essas atividades mediante contratos de concessão, precedidos de licitação (OLIVEIRA, 2010). Portanto, é imprescindível a medição dos volumes produzidos pelas empresas concessionárias do setor, já que estes serão utilizados para o cálculo das compensações financeiras pagas pelas empresas à União (*royalties*), devido à exploração de um recurso natural não renovável (SANTOS, 2011).

Sob o ponto de vista operacional, estimar ou mensurar a vazão durante todo o ciclo de produção é essencial para se ter o controle do processo, desde a fase exploratória, para avaliar o potencial dos reservatórios produtores, até a entrega dos produtos refinados ao cliente final, garantindo transparência nas operações (OLIVEIRA, 2010). Entretanto, medir a vazão corretamente é um dos principais desafios enfrentados na indústria petrolífera, já que o fluido advindo dos reservatórios subterrâneos é composto por uma mistura complexa de óleo, gás natural, CO₂ e água, além de produtos secundários como areia, o que o caracteriza um escoamento multifásico (RIBEIRO, M. A., 2003).

O teste de poço é de longe a prática mais comum utilizada para estimar a produção em uma plataforma de petróleo (ZANGL, 2014). Para isso, o que é produzido em cada poço ou em conjunto com outros poços é direcionado, por um determinado período de tempo, para os separadores de teste. Esses equipamentos são vasos de pressão que separam os componentes do fluxo, possibilitando a medição da produção por meio de dispositivos de medição de vazão monofásicos para óleo, água e gás (RIBEIRO, L. F. C.; NETO, 2018). Os separadores de teste são equipamentos de alto custo, que requerem espaço adicional,

devido à área ocupada e à carga extra que conferem especialmente em plataformas *offshore* (FALCONE, G; HEWITT, 2009). A desvantagem dessa abordagem é que os poços são testados apenas esporadicamente e não se tem disponível nenhuma informação sobre as taxas de fluxo entre os testes de poços. Além disso, as medições de vazão realizadas na instalação de teste geralmente estão em diferentes condições de operação, levando a taxas de vazão não representativas (ZANGL, 2014).

Outra abordagem possível é a utilização de medidores multifásicos em substituição aos separadores de teste convencionais. Entretanto, esses medidores são equipamentos de alto custo de aquisição e manutenção, além de serem pouco precisos na faixa de corte de água de 40% a 60% ou acima de 90%. Limitações econômicas, de projeto e de escoamento proibem, na maioria dos casos, que haja um medidor de vazão multifásico por poço. Até o momento, nenhum projeto ou tecnologia de sistema de medição de vazão multifásica resolve satisfatoriamente todos os problemas simultaneamente (MERIBOUT *et al.*, 2020). Dessa forma, novas alternativas devem ser exploradas com o intuito de se estimar a vazão em uma plataforma petrolífera, como por exemplo, através do uso da válvula *choke*.

A válvula *choke*, também conhecida como válvula de estrangulamento, é um dos principais instrumentos de controle e otimização em uma plataforma de petróleo, além de ser responsável por uma brusca redução da pressão do fluido e ter a durabilidade para atuar com diferentes composições e padrões de escoamento. Agwu, Okoro e Sanni (2022) estabeleceram uma compilação crítica sobre um total de 120 correlações aplicadas à previsão da vazão de petróleo e gás através de válvulas *choke*. A partir deste estudo, os autores chegaram a conclusões de que, no geral, as correlações apresentam limitações de faixas de aplicação, além de erros elevados e, algumas, com uma complexidade tamanha que acaba prejudicando sua aplicação na prática. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o uso de correlações simples de válvulas de controle, aplicadas na válvula *choke* que recebe o petróleo na plataforma (*topside*), para a estimar a vazão.

Na literatura, existem principalmente duas abordagens para estimar a vazão de uma válvula: experimental e numérica. A categoria de estudos numéricos é composta principalmente pela Fluidodinâmica Computacional (CFD), que é uma área de pesquisa que se baseia na modelagem matemática de equações para prever comportamentos de escoamentos de fluidos. A vantagem do trabalho computacional sobre o experimental é que permite a modificação fácil e rápida da geometria da válvula, tipo de fluido, além de ser possível trabalhar em amplas faixas de pressão e velocidade e com escalas reais. No entanto, a desvantagem de uma abordagem puramente computacional é a incerteza na validade dos resultados devido a vários fatores que desempenham papel fundamental, como o refinamento de malha, a complexidade da geometria e os modelos numéricos adotados nas simulações (GABEL *et al.*, 2022).

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo geral do presente estudo é a partir de dados provenientes de simulações em CFD, avaliar o uso de correlações simples de válvulas de controle que permitam relacionar a abertura da válvula *choke* com a diferença de pressão, medida a montante e a jusante, visando a inferência da vazão em escoamentos multifásicos.

Para que o objetivo geral seja atingido, os seguintes objetivos específicos são elencados:

- Desenvolvimento e dedução detalhada das equações de dimensionamento de válvulas de controle;
- Desenvolvimento de um modelo CAD de uma válvula *choke*;
- Obtenção de dados de escoamento através de simulações em CFD;
- Comparação das simulações para diferentes tipos de escoamento com as respectivas equações deduzidas;
- Estabelecimento de uma visão crítica sobre o uso de CFD para os tipos de escoamento estudados neste trabalho.

1.2 Estrutura da dissertação

Para atingir os objetivos previamente citados, este trabalho foi dividido em 5 capítulos. Este primeiro motiva acerca do trabalho desenvolvido e apresenta os objetivos almejados.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre o funcionamento de um sistema de extração de petróleo e as características de escoamentos multifásicos. O funcionamento, características e estudos referentes à modelagem de uma válvula *choke* são apresentados. Além disso, é apresentada a dedução das equações de dimensionamento de uma válvula de controle a partir da Equação de Bernoulli e, por fim, é abordada a fluidodinâmica computacional (CFD).

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para a modelagem da válvula em CAD a partir de catálogos e as configurações utilizadas no software para as simulações em CFD para os três tipos de escoamento: monofásico incompressível, multifásico incompressível e multifásico compressível. Além disso, nesse capítulo é realizada a modificação das equações de dimensionamento de válvulas de controle para os casos de escoamento multifásico.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações, os perfis de pressão, velocidade e fração volumétrica, além das curvas características da válvula geradas para o escoamento monofásico através das expressões usuais de válvulas de controle e para o escoamento multifásico utilizando as expressões desenvolvidas no Capítulo 3. Além disso, é realizada uma discussão sobre o uso de CFD na obtenção de dados experimentais para os diferentes tipos de escoamento.

No Capítulo 5 serão apresentadas as considerações finais do presente trabalho, bem como perspectivas para trabalhos futuros decorrentes deste estudo.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Visando contextualizar esta dissertação, o presente capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre os sistemas de extração de petróleo e os tipos de escoamentos multifásicos. São apresentadas as características, funcionamento e estudos referentes à válvula *choke*, além do dimensionamento de válvulas de controle e, por fim, são abordados aspectos referentes à fluidodinâmica computacional.

2.1 Sistemas de extração e produção de petróleo

Durante o processo de produção *offshore* de petróleo, uma mistura multifásica contendo óleo, gás, água e CO₂ flui através de tubos de transporte dos reservatórios para as instalações na superfície. A estrutura completa de extração de petróleo *offshore* consiste em reservatório, poço de extração, *manifold*, *flowline*, *riser* e instalações de superfície, conforme apresentado na Figura 2.1.

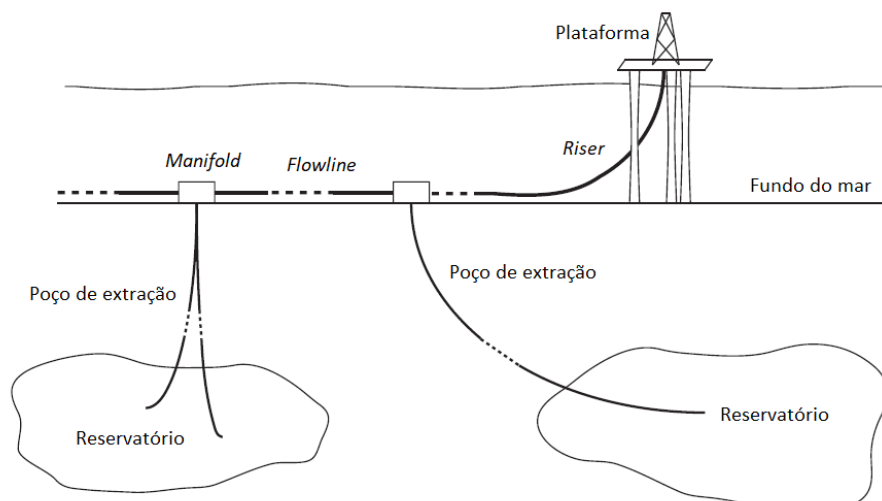


Figura 2.1: Esquema representativo de um sistema de extração de petróleo *offshore*. Adaptado de Di Meglio *et al.* (2012).

O reservatório é uma formação rochosa de origem sedimentar (com poucas exceções) contendo hidrocarbonetos líquidos e/ou gasosos. A rocha do reservatório é porosa e permeável, e a estrutura é delimitada por barreiras impermeáveis que retêm os hidrocarbonetos. O arranjo vertical dos fluidos na estrutura é governado por forças gravitacionais (JAHANSHAH, 2013). O poço é a estrutura através da qual é efetivamente realizada a extração do petróleo do reservatório, constituído por uma tubulação que liga o reservatório ao leito marinho, chamada de *tubing* (DI MEGLIO *et al.*, 2012).

O óleo, a água e o gás podem viajar do reservatório para a superfície sob sua própria pressão (impulso natural) ou por elevação artificial. A maioria dos reservatórios está inicialmente em pressões altas o suficiente para permitir que um poço flua naturalmente. O poço no qual a pressão de formação é suficiente para produzir óleo a uma taxa comercial sem a necessidade de uma bomba é chamado de poço surgente. No entanto, se as pressões do reservatório forem baixas, a elevação artificial é empregada por meio de bombas ou de sistemas de aquecimento e/ou elevação a gás (*gas-lift*) (JAHANSHAH, 2013).

Na cabeça do poço (*wellhead*), uma válvula *choke* permite abertura ou fechamento do fluxo. A produção de vários poços pode ser reunida em uma única linha de fluxo através de um conjunto de válvulas denominado *manifold* para economia de linhas de transporte. Do *manifold*, a produção segue pelo *flowline* no fundo do mar, por vários quilômetros, até ser elevada à superfície através da tubulação de elevação, denominada *riser*. Na plataforma (*topside*), novamente uma válvula *choke* pode ser utilizada para controlar o fluxo, direcionando o fluido para um *header*, que recebe as correntes de vários poços e as direciona para o processo de separação dos componentes (DI MEGLIO *et al.*, 2012).

O fluido extraído é submetido a determinados processos nas instalações de processamento, onde ocorre o tratamento para enquadramento das especificações de exportação, *offload*, descarte ou reinjeção e para separar o óleo do gás natural e da água. Para isso, são utilizados vasos horizontais, verticais ou esféricos, denominados separadores. Nos separadores, o gás é captado na parte superior e os líquidos na parte inferior. Os separadores são classificados como bifásicos se somente separarem o gás da corrente líquida total ou trifásicos se também separarem a corrente líquida em seus componentes de óleo bruto e água (Figura 2.2). O óleo separado se apresenta comumente sob forma de uma emulsão, sendo necessário tratamento adicional para remoção da água ainda presente antes que o óleo possa ser armazenado. Já o gás se apresenta na forma de gás úmido, devido à presença de vapor d'água. O processo de desidratação remove o vapor d'água, obtendo-se finalmente o gás seco. O tratamento do gás ainda envolve a remoção de dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio (RIBEIRO, M. A., 2003).

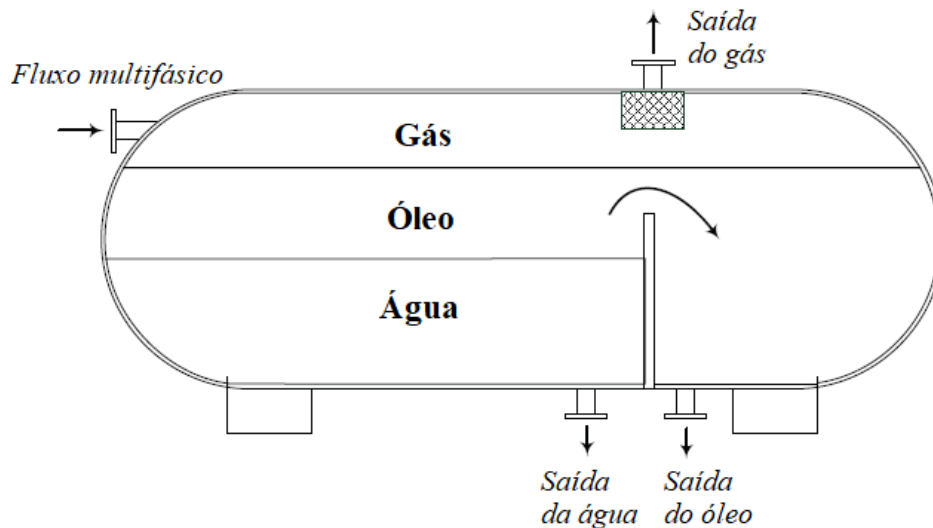


Figura 2.2: Exemplo representativo de um separador trifásico.
Adaptado de Jahanshahi (2013).

2.2 Escoamento multifásico

O petróleo é uma mistura complexa de ocorrência natural composta predominantemente de hidrocarbonetos. Também contém frequentemente quantidades significativas de nitrogênio, enxofre e oxigênio, juntamente com quantidades menores de níquel, vanádio e outros elementos. Pode ocorrer na forma gasosa, líquida ou sólida como gás natural, petróleo bruto ou sólido asfáltico, respectivamente (BARKER, 1985). Dessa forma, seu escoamento se dá por padrões multifásicos.

A representação matemática é complexa devido aos diferentes padrões de escoamento que podem se formar e suas consequências na estimação das propriedades físico-químicas dos fluidos (distribuição das frações de cada fase, propriedades termodinâmicas e de transporte, etc.). Para escoamentos de duas fases líquido-líquido ou gás-líquido, existe em uma ampla variedade de padrões, que dependem de inúmeras variáveis como vazão, propriedades físicas das fases, geometria, inclinação da tubulação e tipo de regime de escoamento (estacionário, pseudo-estacionário ou transiente) (MCQUILLAN; WHALLEY, 1985).

Para o caso de fluxo horizontal, Brennen (2005) descreve quatro padrões principais de fluxo: estratificado, intermitente, anular e bolha dispersa, conforme apresentado na Figura 2.3.

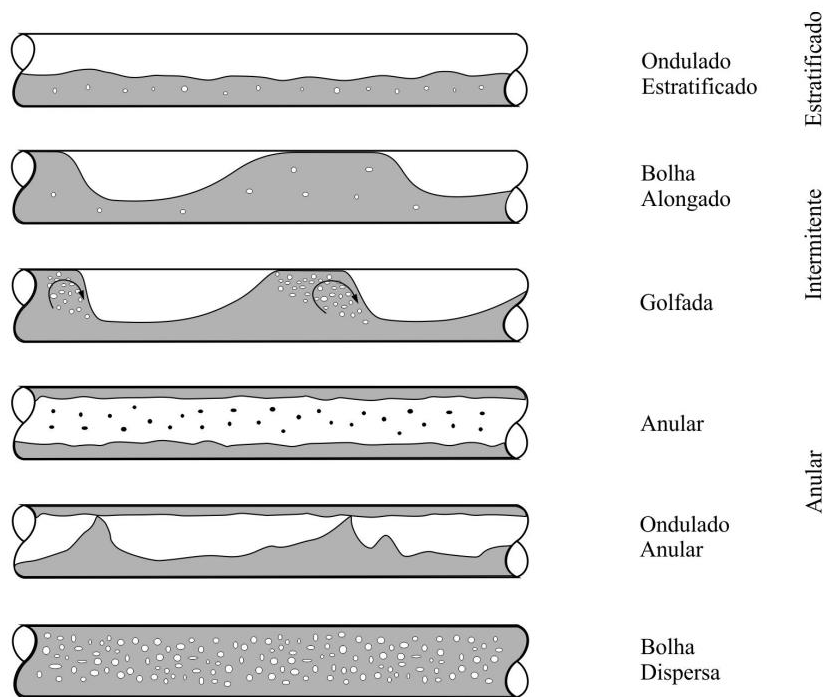


Figura 2.3: Padrões de escoamento horizontais.
Adaptado de Stuckenbruck (2021).

O escoamento estratificado ocorre para velocidades relativamente baixas de líquido e gás. As duas fases são separadas devido à ação da gravidade, ficando o líquido na parte inferior e o gás na superior. O escoamento intermitente é caracterizado pelo escoamento alternado de líquido e gás. Pistões ou golfadas de líquido que preenchem a seção do duto são separados por bolsas de gás que contêm uma camada estratificada de líquido que escoam na parte inferior do duto. O mecanismo do escoamento caracteriza-se por uma golfada de líquido deslocando-se a uma velocidade alta que sobrepuja o filme líquido.

O escoamento anular ocorre para velocidades elevadas de gás. A fase gasosa concentra-se na parte central do duto, que pode conter gotículas em suspensão. O líquido escoam num filme líquido fino na parede do duto. A interface tende a ter um perfil ondulatório que produz tensões cisalhantes elevadas. Devido ao efeito da gravidade, a espessura do filme na parte inferior tende a ser maior do que no topo, dependendo das vazões relativas de gás e de líquido. Já no escoamento de bolha dispersa, em velocidades elevadas, a fase líquida caracteriza-se como contínua contendo bolhas de gás dispersas. A transição para este arranjo é definida pela condição em que as bolhas estão em suspensão no líquido. Para velocidades elevadas de líquido, as bolhas se distribuem de forma mais uniforme na seção transversal e as duas fases tendem a se deslocar na mesma velocidade.

Para o caso particular de fluxo ascendente em tubos verticais (Figura 2.4), cinco padrões principais de fluxo podem ser distinguidos (BRENNEN, 2005).

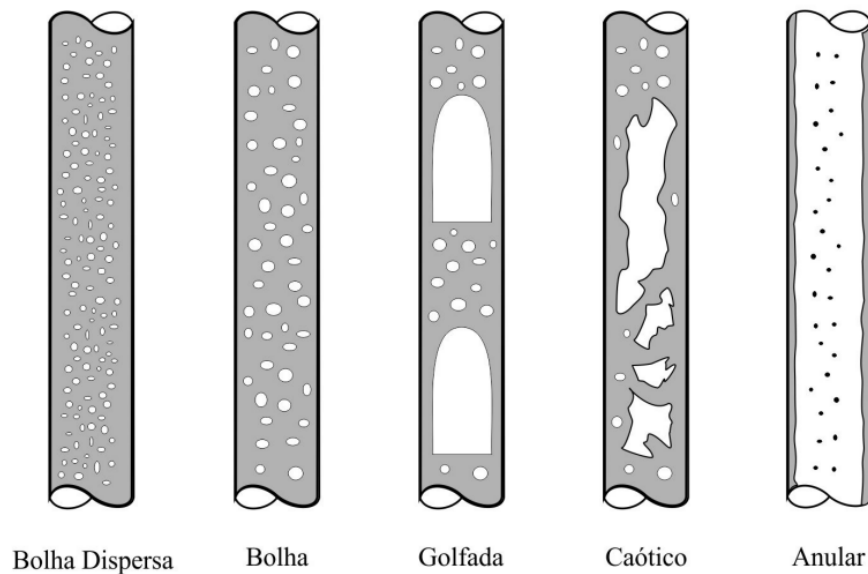


Figura 2.4: Padrões de escoamento verticais.
Adaptado de Stuckenbruck (2021).

Semelhante ao escoamento horizontal, o escoamento de bolha dispersa ocorre quando a velocidade do líquido é relativamente alta, estando a fase gasosa dispersa na fase líquida contínua. Neste caso, o líquido transporta as bolhas de gás à mesma velocidade. Portanto, o escoamento é também homogêneo, sem deslizamento. Já no escoamento em bolha, a fase gasosa encontra-se distribuída dispersamente em pequenas bolhas, deslocando-se em trajetórias em *zig-zag* na fase líquida contínua. O escoamento em bolha acontece para velocidades de líquido relativamente baixas, com baixa turbulência, caracterizando-se pelo deslizamento entre as fases gasosa e líquida, resultando em altas concentrações e frações volumétricas de líquido.

O escoamento em golfadas consiste em uma sucessão de bolhas golfadas líquidas que cobrem toda a seção transversal. O escoamento vertical ascendente é simétrico com relação ao eixo do duto. A maior parte do gás concentra-se em bolsas de gás de tamanho expressivo com diâmetro quase igual ao diâmetro do duto. O escoamento caótico se caracteriza pelo movimento oscilatório da fase líquida, sendo similar ao escoamento em golfada, exceto pelo fato de ser muito mais caótico, sem uma definição clara da interface gás-líquido. O escoamento ocorre nas velocidades mais elevadas do gás, quando as golfadas líquidas se quebram tendendo a provocar a queda do líquido, fazendo com que este se junte à golfada seguinte.

Por fim, o escoamento vertical anular, assim como ocorre no escoamento horizontal, se caracteriza por um núcleo gasoso (contendo gotículas de líquido), que se desloca à velocidade elevada, e um filme líquido escoando junto à parede do duto. A interface gás-líquido é caracterizada por uma superfície de forma ondulatória que provoca tensões cisalhantes altas. No caso vertical, a espessura do filme líquido tende a ser uniforme ao longo do perímetro do duto.

O conhecimento dos comportamentos horizontais e verticais permite estudar diversas situações de condicionantes encontradas em um escoamento real, ou seja, retratam o que de fato pode vir a acontecer durante o processo de produção de petróleo.

2.3 Válvula *choke*

A válvula *choke*, ilustrada na Figura 2.5, é uma válvula de controle utilizada para controlar o fluxo e reduzir a pressão para o processamento de fluidos. Este tipo de válvula é concebido para suportar grandes quebras de pressão, principalmente em partidas e paradas de poço. Na indústria de petróleo e gás, as válvulas *choke* estão normalmente localizadas no topo de cada poço (*wellhead*) e na plataforma (*topside*) (GUO; LYONS; GHALAMBOR, 2007).

A válvula *choke* é um dos principais instrumentos de controle e otimização em uma plataforma de petróleo. O controle preciso da abertura dessa válvula, levando em conta as características do escoamento a montante, permite otimizar a produção, garantindo a estabilidade do escoamento e gerando resultados financeiros e de segurança para as instalações (DIEHL, 2022).



Figura 2.5: Válvula *choke*.
Fonte: Master Flo (2020).

A válvula *choke* pode operar em condições severas, podendo ser utilizada para quedas de pressão de até 500 bar, desempenhando sua função com segurança e confiabilidade. Para grandes reduções de pressão, as velocidades de petróleo podem alcançar de 400 a 500 m/s na área de fluxo mínimo (*vena contracta*) (NOKLEBERG, 1995). A severa redução de pressão na válvula ocorre devido à sua geometria interna, representada na Figura 2.6, onde, para o caso da válvula *choke* do tipo *external sleeve*, parte do fluido passa diretamente ao interior da válvula no sentido do fluxo a montante e outra parte do fluido circunda o corpo da válvula e passa pela abertura no lado oposto ou pelas aberturas laterais. O choque de fluxos em sentidos opostos no interior da válvula resulta na elevada redução de pressão, que é sua principal característica.

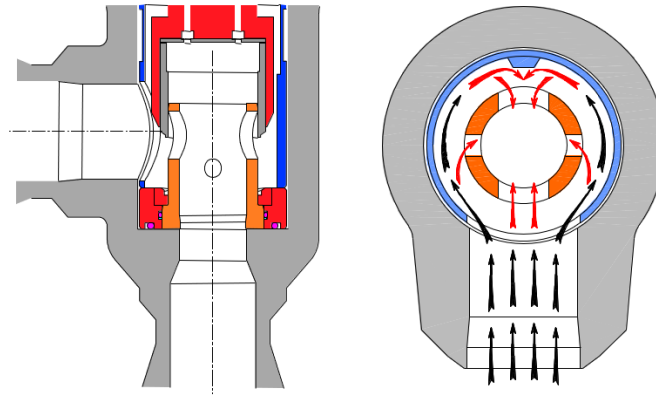


Figura 2.6: Geometria interna de uma válvula *choke*.

Fonte: Master Flo (2020).

Se a pressão na *vena contracta* cair abaixo da pressão de vapor, bolhas de vapor começarão a se formar. A conversão para vapor aumenta o volume do fluido e começa a restringir o fluxo. Se a pressão a jusante for reduzida ainda mais, o volume de vapor aumentará até o ponto em que a vazão não poderá aumentar mais, independentemente de quão baixa a pressão a jusante seja reduzida. Essa condição é chamada de fluxo crítico (BARTELS; HARMON, 2021).

Quando um gás ou misturas gás-líquido escoam através da válvula, o fluido pode ser acelerado o suficiente para atingir a velocidade sônica. Quando essa condição ocorre, o fluxo é também chamado de "crítico" e as mudanças na pressão a jusante não afetam a taxa de fluxo, já que os distúrbios de pressão não podem viajar a montante mais rápido do que a velocidade sônica. Portanto, para prever a relação vazão-queda de pressão para fluidos compressíveis fluindo através de uma válvula *choke*, deve-se primeiramente determinar se o fluxo é crítico ou subcrítico (LAK *et al.*, 2014). Não existe uma equação universal para prever o comportamento do escoamento na válvula *choke* para todos os tipos de fluidos de produção. Porém, métodos teóricos e empíricos vêm sendo desenvolvidos ao longo das últimas décadas.

Tangren, Dodge e Seifert (1949) realizaram a primeira investigação teórica do escoamento bifásico gás-líquido através de restrições. Eles apresentaram uma análise do comportamento de um sistema gás-líquido em expansão. Desde então, muitas equações empíricas foram desenvolvidas para estimar a relação entre a taxa de produção e a pressão da cabeça do poço (*wellhead choke*) para fluxo crítico de duas fases. Gilbert (1954) sugeriu uma correlação empírica para o fluxo crítico através da *choke*, que prediz a vazão de líquido em função da pressão da *wellhead choke*, razão de gás-líquido e dimensões da válvula. Baxendell (1958) revisou a equação de Gilbert para atualizar os coeficientes com base em dados incrementais. Ros (1960) publicou formas revisadas da correlação proposta por Gilbert (1954) usando parâmetros de regressão atualizados com base em outros dados de diferentes campos de petróleo.

Ashford e Pierce (1975) desenvolveram um modelo matemático relacionando o desempenho dinâmico da válvula *choke* em regimes de fluxo crítico e subcrítico. As perdas

de pressão e as capacidades foram relacionadas às propriedades relevantes do fluido e às dimensões da válvula. Correlações gráficas também foram apresentadas para prever a capacidade máxima de um orifício para qualquer conjunto conhecido de condições dinâmicas. Sua correlação envolvia fluxo de três fases e era essencialmente uma extensão da correlação de Ros (1960). Secen (1976) e Pilehvari (1981) revisaram a correlação de Gilbert e desenvolveram correlações semelhantes com diferentes constantes e expoentes. Sachdeva *et al.* (1986) elaboraram um modelo teórico para calcular a vazão através da válvula *choke*, incluindo escoamento crítico e subcrítico. Os dados foram coletados para fluxos de ar-água e ar-querosene através de cinco diâmetros de estrangulamento de 0,25 pol. (6,35 mm) a 0,5 pol. (12,7 mm). Elgibaly e Nashawi (1996) desenvolveram uma correlação para descrever o desempenho de *choke* de poços de petróleo do Oriente Médio.

Ghareeb e Shedid (2007) tentaram superar as limitações das correlações existentes para poços com fluxo artificial através do desenvolvimento de uma nova correlação capaz de calcular com precisão a produção através de uma *wellhead choke*. Sua correlação foi desenvolvida usando um conjunto de testes de produção de poços no Egito. Essa correlação desenvolvida inclui vários parâmetros como tamanho da tubulação, temperaturas da cabeça e do fundo do poço e relação gás-óleo. Alrumah e Bizanti (2007) usaram testes de produção de dados reais de poços verticais de Sabriyah Fields no Kuwait para estabelecer uma nova correlação de fluxo multifásico generalizado que prevê a vazão de líquido em função da pressão da cabeça do poço, dimensões da *choke* da superfície e razão gás-líquido.

Sadiq (2012) propôs uma nova correlação para prever a vazão de óleo através da *choke* com fluxo crítico para poços de petróleo iraquianos. Para cem testes de produção, o estudo mostrou que há uma conexão quantitativa estrita entre três fatores: pressão a montante, relação gás-óleo e tamanho da *choke*. Okon, Udoh e Appah (2015) desenvolveram correlações para prever a taxa de produção de petróleo na área do Delta do Níger, enfatizando a taxa de produção ao invés da pressão a montante. Já Choubineh *et al.* (2017) propuseram uma nova abordagem analítica híbrida envolvendo redes neurais artificiais (RNA) combinada com um algoritmo de otimização baseado em treinamento-aprendizagem (TLBO) para prever o fluxo através da válvula *choke*.

Ganat e Hrairi (2018) elaboraram uma nova correlação para prever a taxa de produção de poços de fluxo artificial, envolvendo diferentes parâmetros como temperatura da cabeça do poço, ponto de bolha, relação gás/óleo, pressão na cabeça do poço, tempo e água corte. A equação foi testada em 48 poços de petróleo localizados em campos de petróleo no norte da África. O desempenho da nova correlação mostra resultados de previsão confiáveis com cerca de $\pm 10\%$ de erro relativo entre o valor de vazão predito e o valor medido. Mais recentemente, Kargarpour (2019) desenvolveu uma equação para escoamento bifásico em válvula *choke*, envolvendo como parâmetro a queda de pressão diferencial na válvula. A equação desenvolvida foi validada utilizando um banco de dados com 399 pontos experimentais, com diferentes vazões, pressões, API e abertura de válvula.

Conforme observado, várias correlações foram elaboradas ao longo dos anos para prever a vazão de petróleo e gás através de uma válvula *choke*. Entretanto, devido a restrições dos dados, a maioria das correlações elaboradas são limitadas a uma faixa de aplicação ou só são válidas para uma localidade específica. Além disso, em alguns casos, o modelo obtido envolve muitas variáveis, o que o torna muito complexo e impossibilita sua aplicação em campo (AGWU; OKORO; SANNI, 2022). Dessa forma, surge a necessidade de

estudo de alternativas para inferir a vazão de um escoamento multifásico através de uma válvula *choke*, como o uso de equações de dimensionamento de válvulas mais simples.

2.4 Dimensionamento de válvulas de controle

Nesta seção será apresentada a equação básica utilizada no dimensionamento de válvulas de controle. A dedução da equação básica para fluidos incompressíveis será apresentada seguindo o passo-a-passo apresentado por Trierweiler (2021). A partir desse resultado se estende a expressão para fluidos compressíveis, assim como todas os fatores de conversão de unidades.

As primeiras válvulas de controle eram válvulas globo manuais. O dimensionamento era simples: uma válvula de 4 polegadas (100 mm) “pertencia” a uma linha de 4 polegadas (100 mm). Posteriormente, tornou-se óbvio que em quedas de pressão mais altas, essa válvula tinha capacidade demais para um se obter um bom controle. Assim, evoluiu-se para a próxima regra geral, de utilizar uma válvula de tamanho menor do que o da linha, embora ainda apresentasse limitações (LIPTÁK, 2006).

Esses métodos práticos ainda eram muito limitados e o próximo avanço veio após o desenvolvimento de um coeficiente de dimensionamento baseado no teorema de Bernoulli (LIPTÁK, 2006), partindo da expressão de escoamento permanente, incompressível e com perda de carga h_L , dado por Bird, Stewart e Lightfoot (2002):

$$g \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} = h_L. \quad (2.1)$$

A perda de carga para escoamentos através de válvulas e acessórios pode ser expressa em termos do coeficiente de resistência, ou coeficiente de perda (K) ou do comprimento equivalente $\left(\frac{L}{D}\right)_{eq}$ de um tubo reto e do fator de atrito (f), descrita por:

$$h_L = f \left(\frac{L}{D}\right)_{eq} \frac{u^2}{2} = K \frac{u^2}{2}. \quad (2.2)$$

Combinando (2.1) e (2.2), a equação de Bernoulli se torna:

$$g \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} = K \frac{u^2}{2}. \quad (2.3)$$

Considerando que a diferença da altura entre a entrada e a saída da válvula pode ser desconsiderada ($\Delta Z = 0$) e que as velocidades nestas duas posições são iguais ($\Delta u = 0$), a expressão é simplificada para:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = K \frac{u^2}{2}. \quad (2.4)$$

Inserindo a definição de vazão volumétrica ($Q = A u$) e isolando Q em (2.4), obtém-se a expressão:

$$Q = A \sqrt{\frac{2}{K}} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}. \quad (2.5)$$

Na sequência, multiplica-se o numerador e o denominador de (2.5) por $\sqrt{\rho_w}$, onde ρ_w é a densidade da água, e transforma-se a densidade do fluido em uma densidade relativa (G), i.e.

$$Q = A \sqrt{\frac{2}{K \rho_w}} \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}. \quad (2.6)$$

Convertendo as unidades da Equação (2.6) para o Sistema de Unidades Usuais dos Estados Unidos (USCS), no qual a vazão volumétrica Q é expressa em galões por minuto (GPM), a área da seção transversal da tubulação A é expressa em polegadas quadradas (in^2), a densidade ρ é expressa em libra-massa por pé cúbico (lbm/ft^3) e a pressão P em psi, (2.6) se torna:

$$Q = \frac{38 A}{\sqrt{K}} \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}. \quad (2.7)$$

Para a realização da conversão foram utilizados três fatores (C_1 , C_2 e C_3), além da densidade da água ρ_w , na temperatura de 60°F (15°C), onde

- $\rho_w = 62,366 \text{ lbm}/\text{ft}^3$;
- $C_1 = 0,25974 \text{ GPM}/(\text{in}^3/\text{s})$;
- $C_2 = 32,17405 \text{ lbm}/\text{slug}$;
- $C_3 = 12^4 \text{ in}^4/\text{ft}^4$.

As unidades utilizadas em (2.6) para conversão para (2.7) podem ser visualizadas abaixo:

$$Q(\text{GPM}) = C_1 A(\text{in}^2) \sqrt{\frac{2}{K(\text{adim}) \rho_w \left(\frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}\right)}} \sqrt{\frac{\Delta P \left(\frac{\text{slug ft}}{\text{in}^2 \text{ s}^2}\right)}{G(\text{adim})}} C_2 C_3.$$

A título de ilustração do comportamento para o escoamento totalmente turbulento, pode-se analisar o Diagrama de Moody (Figura 2.7) onde fator de atrito f é constante quando o escoamento se torna totalmente turbulento. Dessa forma, como o coeficiente de perda K que é equivalente ao coeficiente f no caso de tubulações, K irá apresentar comportamento análogo, ou seja, será uma constante para o caso de escoamento totalmente turbulento.

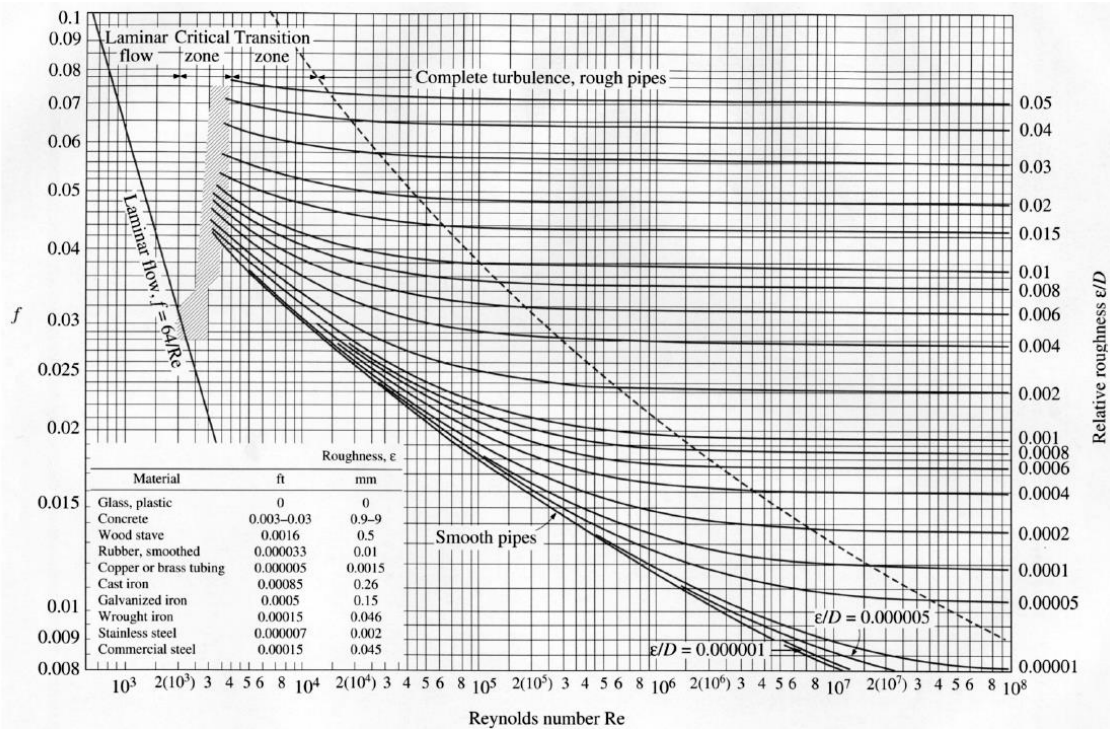


Figura 2.7: Diagrama de Moody (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

Assim, torna-se possível agrupar as constantes de (2.7) como um coeficiente de vazão C_v , chegando enfim à expressão mais conhecida para dimensionar uma válvula de controle, i.e.

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}. \quad (2.8)$$

O C_v é um coeficiente relacionado à geometria de uma válvula, para uma determinada abertura, que pode ser usado para estabelecer a capacidade de vazão. Por definição é o número de galões por minuto (GPM) de água a 60°F que fluirá através de uma válvula com uma queda de pressão de uma libra por polegada quadrada (psi) (EMERSON, 2005). Dessa forma, a unidade do C_v é igual a $\frac{GPM}{\sqrt{psi}}$.

Este modelo, desenvolvido a partir do teorema de Bernoulli, estabelece a relação entre taxa de fluxo, coeficiente de fluxo, propriedades do fluido, fatores de instalação relacionados e condições de serviço pertinentes para válvulas de controle que trabalham com fluidos incompressíveis. A Equação (2.8) pode ser usada para calcular o coeficiente de vazão necessário, a vazão volumétrica ou a diferença de pressão aplicada dadas quaisquer duas das três quantidades (ANSI/ISA 75.01.01, 2012).

2.4.1 Escoamento monofásico incompressível

Vazão Volumétrica

A vazão volumétrica para o escoamento de fluidos incompressíveis no regime de fluxo turbulento, sem ocorrência de cavitação, é calculada pela Equação (2.9). Essa expressão é obtida através da introdução de dois termos em (2.8): N_1 , que é um termo de conversão de unidades, tabelado em norma (ANSI/ISA 75.01.01, 2012) e equivale a 1 quando se utiliza GPM como unidade de vazão e psi como unidade da queda de pressão; e F_P , que leva em conta a diferença do diâmetro da tubulação para o diâmetro da válvula, sendo seu valor igual a 1 caso os diâmetros sejam os mesmos.

$$Q = C_v N_1 F_P \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}. \quad (2.9)$$

Vazão Mássica

Inserindo as definições de densidade relativa, $G = \frac{\rho}{\rho_w}$, e de vazão mássica, $w = Q \rho$, em (2.9), chega-se à:

$$w = N_1 \sqrt{\rho_w} F_P \sqrt{\Delta P \rho}. \quad (2.10)$$

Verifica-se que em (2.10) há a multiplicação de duas constantes: N_1 e $\sqrt{\rho_w}$. Agrupando-as, obtém-se uma nova constante N_6 .

Dessa forma, a vazão mássica para fluidos incompressíveis no regime de fluxo turbulento, sem ocorrência de cavitação, é calculada por:

$$w = C_v N_6 F_P \sqrt{\Delta P \rho}. \quad (2.11)$$

2.4.2 Escoamento monofásico compressível

A equação básica do C_v também pode ser aplicada para gases e vapores. A diferença é que, para o caso de escoamento compressível, a densidade do gás varia com a queda de pressão ΔP e, como este é um processo gradual, a relação entre $\sqrt{\Delta P}$ e a vazão não é mais linear, mas sim uma curva (BAUMANN, 2009).

Dessa forma, foi introduzido um fator de expansão Y , responsável por contabilizar a variação da densidade do gás durante o escoamento através da válvula. Esse fator de expansão é definido por:

$$Y = 1 - \frac{x}{3 F_k x_T} \quad (2.12)$$

onde, x e F_k são definidos por $x = \frac{\Delta P}{P_1}$ e $F_k = \frac{k}{1,4}$. O termo k é a razão entre os calores específicos do gás, P_1 é a pressão do gás na entrada da válvula e x_T é um fator de queda de pressão e é determinado pelo fabricante através de testes laboratoriais.

Vazão Mássica

Uma das formas de calcular a vazão mássica para o escoamento subsônico de fluidos compressíveis no regime de fluxo turbulento é pela Equação (2.13). Essa expressão é obtida através da introdução do fator de expansão Y em (2.11), além da modificação da massa específica para o seu valor na entrada, não sendo mais uma densidade constante.

$$w = C_v N_6 F_P Y \sqrt{\Delta P \rho_1}. \quad (2.13)$$

A densidade de um gás real pode ser expressa da seguinte forma:

$$\rho_1 = \frac{P_1 M}{Z R T_1} \quad (2.14)$$

onde Z é o fator de compressibilidade, R é a constante universal dos gases perfeitos, T_1 é a temperatura do gás na entrada da válvula e M é a massa molecular do gás.

Substituindo (2.14) em (2.13) e utilizando a relação $\Delta P = x P_1$, chega-se à:

$$w = C_v N_6 F_P Y P_1 \sqrt{\frac{x M}{Z R T_1}}. \quad (2.15)$$

Agrupando as constantes N_6 e \sqrt{R} , cria-se uma nova constante N_8 . Dessa forma chega-se à segunda expressão utilizada para o cálculo da vazão mássica para escoamento compressível em válvulas de controle, i.e.

$$w = C_v N_8 F_P Y P_1 \sqrt{\frac{x M}{Z T_1}}. \quad (2.16)$$

Vazão Volumétrica

Para calcular a vazão volumétrica para o escoamento subsônico de fluidos compressíveis no regime de fluxo turbulento, inicialmente deve-se realizar a conversão de vazão mássica para volumétrica utilizando a seguinte definição:

$$w = \frac{Q M}{V_m} \quad (2.17)$$

onde V_m é o volume molar de um gás ideal na temperatura de 60°F e pressão de 1 atm.

Substituindo (2.17) em (2.16), obtém-se:

$$Q = C_v N_8 V_m F_P Y P_1 \sqrt{\frac{x}{M Z T_1}}. \quad (2.18)$$

Agrupando as constantes N_8 e V_m , cria-se uma nova constante N_9 . Dessa forma, obtém-se a primeira expressão para o cálculo da vazão volumétrica para escoamento compressível em válvulas de controle, i.e.

$$Q = C_v N_9 F_P Y P_1 \sqrt{\frac{x}{M Z T_1}}. \quad (2.19)$$

Uma alternativa, caso seja mais conveniente, é converter a massa molecular M em densidade relativa do gás G_g , através da sua definição, i.e.

$$G_g = \frac{M}{M_{ar}}. \quad (2.20)$$

Dessa forma, multiplica-se o numerador e o denominador (2.19) por $\sqrt{M_{ar}}$, onde M_{ar} é a massa molecular do ar (valor de referência), obtendo-se:

$$Q = C_v \frac{N_9}{\sqrt{M_{ar}}} F_P Y P_1 \sqrt{\frac{x}{\frac{M}{M_{ar}} Z T_1}}. \quad (2.21)$$

Agrupando as constantes N_9 e $\sqrt{M_{ar}}$, cria-se uma nova constante N_7 . Dessa forma, obtém-se a segunda expressão para o cálculo da vazão volumétrica para escoamento compressível em válvulas de controle, i.e.

$$Q = C_v N_7 F_P Y P_1 \sqrt{\frac{x}{G_g Z T_1}}. \quad (2.22)$$

2.4.3 Equações para escoamento incompressível

A Tabela 2.1 agrupa as equações utilizadas para o cálculo da vazão volumétrica e mássica para escoamento incompressível em válvulas de controle. Além disso, contém as expressões rearranjadas para o cálculo do C_v , chamadas de (2.9b) e (2.11b).

Tabela 2.1: Equações para escoamento incompressível em válvulas de controle.

Vazão Volumétrica	
$Q = C_v N_1 F_P \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}$ (2.9)	$C_v = \frac{Q}{N_1 F_P} \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}$ (2.9b)
Vazão Mássica	
$w = C_v N_6 F_P \sqrt{\Delta P \rho}$ (2.11)	$C_v = \frac{w}{N_6 F_P \sqrt{\Delta P \rho}}$ (2.11b)

2.4.4 Equações para escoamento compressível

A Tabela 2.2 agrupa as equações utilizadas para o cálculo da vazão volumétrica e mássica para escoamento compressível em válvulas de controle. Além disso, contém as respectivas expressões rearranjadas para o cálculo do C_v , chamadas de (2.13b), (2.16b), (2.19b) e (2.22b).

Tabela 2.2: Equações para escoamento compressível em válvulas de controle.

Vazão Volumétrica	
$Q = C_v N_9 F_P Y P_1 \sqrt{\frac{x}{M Z T_1}}$ (2.19)	$C_v = \frac{Q}{N_9 F_P Y P_1} \sqrt{\frac{M Z T_1}{x}}$ (2.19b)
$Q = C_v N_7 F_P Y P_1 \sqrt{\frac{x}{G_g Z T_1}}$ (2.22)	$C_v = \frac{Q}{N_7 F_P Y P_1} \sqrt{\frac{G_g Z T_1}{x}}$ (2.22b)
Vazão Mássica	
$w = C_v N_6 F_P Y \sqrt{\Delta P \rho}$ (2.13)	$C_v = \frac{w}{N_6 F_P Y \sqrt{\Delta P \rho}}$ (2.13b)
$w = C_v N_8 F_P Y P_1 \sqrt{\frac{x M}{Z T_1}}$ (2.16)	$C_v = \frac{w}{N_8 F_P Y P_1} \sqrt{\frac{Z T_1}{x M}}$ (2.16b)

2.4.5 Constantes de Conversão N

Os dois sistemas mais utilizados para dimensionamento de válvulas de controle são o Sistema Internacional de Unidades (SI) e o Sistema de Unidades Usuais dos Estados Unidos (USCS).

No USCS a constante N_1 é adimensional e tem valor unitário. Porém, para o cálculo das demais constantes é necessária a utilização de mais um fator de conversão, denominado C_f e que equivale ao seguinte valor $C_f = 8,020833 \frac{ft^3}{h GPM}$.

No SI a unidade da constante N_1 pode ser $\frac{m^3}{h GPM} \sqrt{\frac{psi}{bar}}$ ou $\frac{m^3}{h GPM} \sqrt{\frac{psi}{kPa}}$, dependendo da unidade de pressão utilizada.

As demais constantes N citadas anteriormente neste estudo são o resultado do agrupamento de outras constantes. Dessa forma, a Tabela 2.3 mostra a definição de cada constante N , com as constantes incorporadas na sua formação, de acordo com o sistema de unidades de medida utilizado.

Tabela 2.3: Definição das constantes N.

<i>N</i>	SI	USCS
N_6	$N_6 = N_1 \sqrt{\rho_w}$	$N_6 = C_f \sqrt{\rho_w}$
N_7	$N_7 = \frac{N_1 V_m \sqrt{\rho_w}}{\sqrt{R M_{ar}}}$	$N_7 = \frac{C_f V_m \sqrt{\rho_w}}{\sqrt{R M_{ar}}}$
N_8	$N_8 = \frac{N_1 \sqrt{\rho_w}}{\sqrt{R}}$	$N_8 = \frac{C_f \sqrt{\rho_w}}{\sqrt{R}}$
N_9	$N_9 = \frac{N_1 V_m \sqrt{\rho_w}}{\sqrt{R}}$	$N_9 = \frac{C_f V_m \sqrt{\rho_w}}{\sqrt{R}}$

Além disso, as constantes *N* têm seus valores tabelados em norma (ANSI/ISA 75.01.01, 2012) de acordo com o sistema de unidades de medida utilizado. Esses valores estão representados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Valores das constantes N.

Constante <i>N</i>		Unidades Usadas nas Equações				
		<i>w</i>	<i>Q</i>	<i>P, ΔP</i>	ρ	T_1
N_1	0,0865	-	m ³ /h	kPa	-	-
	0,865	-	m ³ /h	Bar	-	-
	1,0	-	GPM	psia	-	-
N_6	2,73	kg/h	-	kPa	kg/m ³	-
	27,3	kg/h	-	Bar	kg/m ³	-
	63,3	lbm/h	-	psia	lbm/ft ³	-
N_7	4,17	-	m ³ /h	kPa	-	K
	417,0	-	m ³ /h	Bar	-	K
	1360,0	-	scfh	psia	-	°R
N_8	0,948	kg/h	-	kPa	-	K
	94,8	kg/h	-	Bar	-	K
	19,3	lbm/h	-	psia	-	°R
N_9	22,5	-	m ³ /h	kPa	-	K
	2250,0	-	m ³ /h	Bar	-	K
	7320,0	-	scfh	psia	-	°R

Fonte: ANSI/ISA 75.01.01 (2012)

2.5 Fluidodinâmica computacional

As equações de Navier-Stokes, que governam o movimento de um fluido viscoso newtoniano, foram formuladas há mais de um século e são o método mais direto de abordar qualquer problema da dinâmica dos fluidos, no qual essas equações são resolvidas para condições de contorno apropriadas. Uma abordagem muito utilizada para a resolução desses problemas de dinâmica dos fluidos, devido ao aumento dos recursos computacionais nas últimas décadas, é a fluidodinâmica computacional (CFD), sendo possível fazer análises mais detalhadas da dinâmica de escoamentos com transferência de calor e massa, inclusive para fluxos multifásicos (HADIA, 2018).

O CFD é uma ferramenta de simulação que utiliza computadores com alta capacidade de processamento e aplica modelos matemáticos para a simulação numérica desses problemas, possibilitando prever perfis de velocidade, temperatura, pressão, dentre outros parâmetros específicos do sistema estudado. Além disso, *softwares* de CFD podem simular o transporte de espécies químicas, reações químicas, combustão, evaporação, condensação, cristalização, entre outros fenômenos (BARTON; READER-HARRIS; GIBSON, 2004).

Baixo custo, precisão satisfatória e rapidez nas simulações tornam o uso do CFD mais interessante do que a construção de protótipos físicos. Deve-se reconhecer que tanto a dinâmica dos fluidos experimental quanto a computacional requerem recursos. O custo dos experimentos em alguns casos pode ser proibitivo como, por exemplo, com testes de voo extensivos de aviões, testes em escala real de uma turbina a gás ou testes destrutivos de componentes caros. Nesses casos, pode ser possível reduzir o número de testes experimentais usando CFD, uma vez que apenas um número relativamente pequeno de experimentos é necessário para verificar a precisão dos resultados numéricos (CEBECI *et al.*, 2005).

Obviamente, o custo de obtenção de soluções numéricas precisas de equações diferenciais também pode ser alto para um fluxo complexo, mas ainda assim é geralmente muito menor do que o custo dos experimentos adicionais que seriam necessários. Na realidade, a abordagem mais econômica para resolver um problema de dinâmica de fluidos provavelmente será uma combinação de medições e cálculos. Ambos estão sujeitos a incertezas, mas a combinação dessas duas abordagens pode resultar em um projeto mais econômico e confiável do que usar apenas uma abordagem ou outra (CEBECI *et al.*, 2005).

No CFD, o fluxo laminar monofásico simples pode ser simulado com muita precisão e, para a maioria dos fluxos turbulentos monofásicos, as simulações são confiáveis. No entanto, para sistemas complexos envolvendo fluxo multifásico ou de reações muito rápidas, as simulações não são muito precisas. Para esses sistemas, os modelos tradicionais usando equações de projeto comprovadas e verificadas ao longo de muitos anos são mais adequadas do que as melhores simulações de CFD. No entanto, as equações de projeto estão disponíveis apenas para poucos equipamentos existentes e para uma gama limitada de condições de processo, e assim as simulações CFD podem ser muito úteis, mesmo quando não são possíveis previsões precisas (HADIA, 2018).

Além disso, como acontece com qualquer dado derivado de simulação, os resultados do CFD devem ser analisados adequadamente, pois podem ser imprecisos se as simulações forem mal definidas. A precisão da solução depende principalmente do refinamento da malha, ou seja, da resolução da célula em locais específicos e do alinhamento das células com o fluxo. Se poucas células forem usadas, mudanças bruscas no fluxo não serão bem capturadas (GABEL *et al.*, 2022).

Imprecisões significativas também podem estar associadas ao uso de um modelo de turbulência inadequado. Uma vasta gama de modelos de turbulência foi desenvolvida, embora o mais popular para o trabalho geral de CFD seja o modelo $k-\epsilon$, que foi desenvolvido no início da década de 1970. Outros modelos de turbulência populares incluem o modelo RNG $k-\epsilon$, o modelo $k-\epsilon$ realizável (ambos derivados do modelo $k-\epsilon$ original), o modelo $k-\omega$ e vários tipos de *Reynolds Stress Model* (RSM). Todos esses modelos têm vantagens e desvantagens. O modelo $k-\epsilon$ como é bem compreendido e geralmente converge com mais facilidade, é uma boa escolha para muitas aplicações gerais, já que não há nenhum modelo de turbulência que seja altamente preciso ou estável em todas as circunstâncias (BARTON; READER-HARRIS; GIBSON, 2004).

Dessa forma, é muito importante ter um bom entendimento do processo que está sendo simulado, bem como suas condições e características, para minimizar as incertezas do resultado final obtido por CFD.

Lisowski (2016) analisa as características de fluxo de uma válvula de controle proporcional por meio de CFD e propõe melhorias através de modificações geométricas na válvula, visando aumentar a faixa operacional proporcional em aproximadamente 40%. Sami e Turzo (2020) realizaram simulações em CFD para investigar o impacto da pressão interna, velocidade e distribuição de temperatura dentro de uma válvula de *gas-lift*, além de avaliar uma equação para o cálculo do coeficiente de descarga da válvula. Hadia (2018) simulou escoamento de uma mistura água-ar com padrão golfante em um tubo horizontal e em um tubo anular através de CFD, validando as simulações com dados experimentais da literatura. Recentemente, Gabel (2022) e Mitra (2022) conduziram estudos para escoamentos através de válvula *choke*. Enquanto o primeiro estudou o comportamento de escoamento incompressível, o segundo estudou escoamento compressível. Em seus experimentos, ambos realizaram comparações entre resultados de CFD e resultados experimentais, analisando a formação de vórtices no interior da válvula e suas implicações.

Capítulo 3 – Metodologia

3.1 Modelagem da Válvula

A válvula *choke* foi modelada em 3D no software AutoCAD, a partir de dados e imagens de catálogos de uma válvula *choke* P8 *External Sleeve* da fabricante Master Flo™ (MASTER FLO, 2020), conforme representado na Figura 3.1.

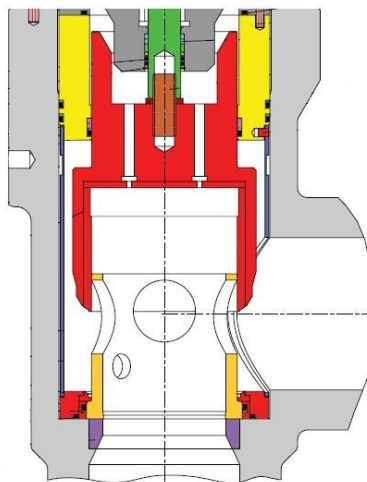


Figura 3.1: Corpo da válvula de acordo com o catálogo.

Adaptado de Master Flo™ (2020).

Dos dados catalogados foram obtidas a curva característica da válvula e a relação entre o movimento da haste e a porcentagem de área aberta, conforme Anexo 1, tornando possível o dimensionamento, descrito no Apêndice 1, dos três pares de aberturas circulares do corpo da válvula. A Figura 3.2 representa o corpo fixo da válvula, modelado em 3D, com as aberturas circulares que apresentam os diâmetros de 0,625, 1,538 e 1,858 polegadas, conforme dimensionamento.

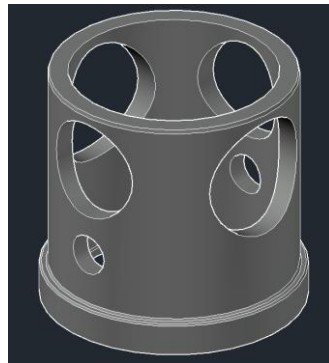


Figura 3.2: Estrutura interna da válvula modelada em AutoCAD.

Posteriormente, foi realizado o restante da modelagem em 3D da válvula, com diâmetro interno de 8 polegadas para a entrada e a saída. A válvula utilizada no software de simulação foi modelada de forma que a parte sólida fosse o caminho do fluido, conforme representado na Figura 3.3. Além disso, a entrada e a saída da válvula foram alongadas, em 7,5 vezes o raio a montante e 14 vezes o raio a jusante, para que fosse obtido um escoamento próximo ao totalmente desenvolvido nas condições de contorno. A válvula foi cortada ao meio para a utilização da condição de simetria nas simulações, diminuindo a carga computacional necessária.

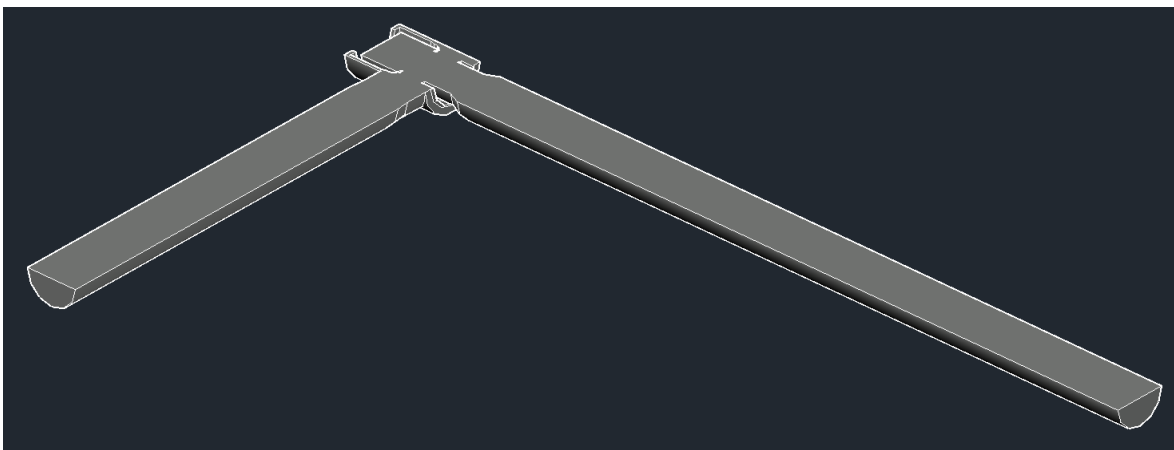


Figura 3.3: Válvula 3D utilizada nas simulações (abertura 100%).

3.2 Simulações em CFD

As simulações em Fluidodinâmica Computacional (CFD) foram realizadas no *software* *COMSOL Multiphysics*. Este é um *software* de análise de elementos finitos, *solver* e simulação multifísica, que apresenta uma interface gráfica intuitiva e de fácil utilização, além de módulos para variadas aplicações, como elétricas, mecânicas, acústicas, químicas e de escoamento de fluidos (COMSOL, 2020).

Para iniciar o processo de configuração da simulação, ao iniciar o *software* foi selecionado o assistente de modelo (*model wizard*) e a dimensão 3D para todas as simulações, além do estudo em estado estacionário. O módulo físico utilizado foi o de escoamento de fluido (*fluid flow*) e os modelos foram determinados de acordo com as características de cada tipo de escoamento.

Quanto à geometria, para poder variar a abertura da válvula nas simulações, fez-se necessário criar e salvar de forma individual um modelo CAD de válvula para cada abertura. Foram criados modelos da válvula com as seguintes aberturas: 1%, 5%, 7%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 95% e 100%. Essas porcentagens representam a área aberta dos orifícios do interior da válvula, conforme o movimento da haste. As geometrias foram importadas de arquivos gerados pelo AutoCAD e editadas no *software* de simulação COMSOL *Multiphysics* através da utilização de operações virtuais, a fim de simplificar e suavizar a topologia, facilitando a geração de uma malha de melhor qualidade.

No *software* de CFD foram realizados três tipos de simulações: escoamento monofásico incompressível, escoamento multifásico incompressível e escoamento multifásico compressível. As simulações contemplam escoamentos totalmente turbulentos, subcríticos e isotérmicos.

3.2.1 Simulações para escoamento monofásico incompressível

Inicialmente foram realizadas simulações de escoamento turbulento monofásico de água, com o intuito de confeccionar a curva característica da válvula por CFD e compará-la a curva característica da válvula determinada experimentalmente pelo fabricante, através da passagem de água a 60°F (15°C) e variando-se a abertura da válvula.

Para estas simulações foi utilizado o modelo de escoamento monofásico turbulento (*Single-Phase Flow - Turbulent Flow*). Água líquida foi selecionada na biblioteca de materiais e utilizou-se o modelo de turbulência $k-\epsilon$.

As equações de escoamento de fluidos são baseadas nas equações de Navier-Stokes, descrevendo a conservação de massa, momento e energia. Vale ressaltar que, nas simulações, o escoamento foi considerado isotérmico. Para escoamentos monofásicos as equações utilizadas no *software* são da forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (3.1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{F}, \quad (3.2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau} : \mathbf{S} - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \Big|_p \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \rho \right) + \mathbf{Q}. \quad (3.3)$$

A Equação (3.1) é a equação da continuidade e representa a conservação de massa, já (3.2) representa a conservação de momento e (3.3) representa a conservação de energia.

Nos modelos monofásicos, as variáveis dependentes são a velocidade (\mathbf{u}) e a pressão (p). Além dessas variáveis, no caso da utilização de um modelo de turbulência, como o modelo $k-\epsilon$, também serão variáveis dependentes a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação (ϵ) dessa energia, conforme as equações a seguir (COMSOL, 2018):

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon, \quad (3.5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3.6)$$

$$P_k = \mu_T \left(\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u}. \quad (3.7)$$

A Equação (3.4) representa a viscosidade turbulenta, já (3.5) e (3.6) representam as equações de transporte para k e ε , respectivamente, e (3.7) representa o termo de produção P_k .

A pressão a montante de 40 bar e a pressão a jusante de 20 bar foram inicialmente utilizadas como condições de contorno. Porém, simulações posteriores para os casos multifásicos indicaram que a convergência era atingida com maior facilidade com o uso de condição de contorno de velocidade normal a montante, ao invés de pressão. Dessa forma a condição de contorno a montante foi escolhida de acordo com a Tabela 3.1, que apresenta as velocidades normais predefinidas para cada abertura de válvula, de forma que a queda de pressão na válvula fique em torno de 20 bar. A pressão estática manométrica igual a 20 bar foi utilizada como condição de contorno a jusante. Os valores de pressão escolhidos estão no mesmo patamar dos observados em plataformas reais.

Tabela 3.1: Velocidade média a montante para cada abertura de válvula.

Abertura	Velocidade (m/s)	Abertura	Velocidade (m/s)
1%	0,6	50%	15,0
5%	1,8	60%	17,0
7%	3,0	70%	19,0
10%	3,9	80%	21,0
15%	6,2	90%	22,5
20%	8,0	95%	23,0
30%	10,5	100%	23,5
40%	13,0		

Com as condições de contorno definidas, foram adicionadas à simulação a aceleração da gravidade, condição de simetria à geometria e temperatura do fluido igual a 15°C, a qual o software utiliza para determinar as propriedades dos fluidos.

Após a configuração do modelo, foi gerada a malha na geometria. A malha foi confeccionada automaticamente pelo software e como o objetivo de diminuir custo computacional utilizou-se uma malha grosseira (*coarse*) para o interior da válvula e fina (*fine*) para as paredes, conforme representa a Figura 3.4. O número de elementos variou dependendo da abertura da válvula, ficando entre 150 mil e 200 mil elementos. A qualidade média desses elementos, na qual 1 representa perfeita qualidade, ficou em torno de 0,65, devido à alta complexidade da geometria no corpo da válvula.

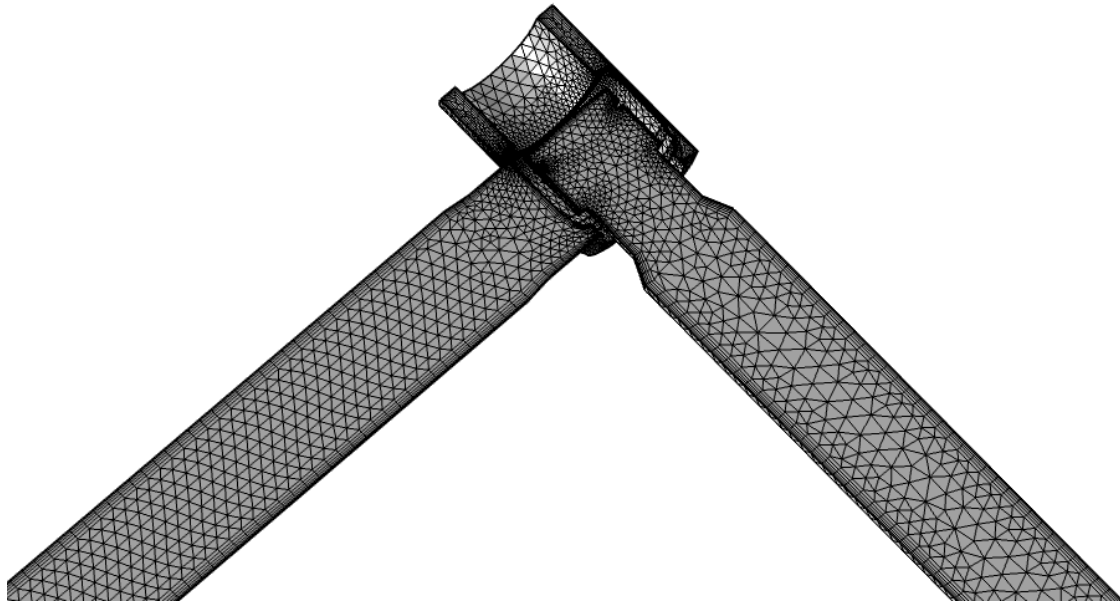


Figura 3.4: Malha confeccionada para as simulações.

Para a solução do problema de CFD foi utilizada a configuração padrão de *solvers* do *software* para o modelo monofásico turbulento. As variáveis de turbulência foram determinadas utilizando um *solver* direto (PARDISO) e as variáveis de escoamento, velocidade e pressão, foram determinadas utilizando um *solver* iterativo (GMRES). Os dados foram posteriormente utilizados para construir a curva característica da válvula, comparando-a com a disponibilizada pelo fabricante. Também foi feita a verificação da relação linear entre a vazão e a raiz quadrada da queda de pressão pela válvula e a confecção de gráficos dos perfis de velocidade e pressão, para melhor visualização da fluidodinâmica do escoamento monofásico incompressível através da válvula *choke*.

3.2.2 Simulações para escoamento multifásico incompressível

Em sequência às simulações de escoamento monofásico de água pura, foram realizadas simulações de escoamento multifásico incompressível da mistura entre água e óleo. Como óleo, foi utilizado óleo de transformador presente na biblioteca do *software*. Para isto, foi utilizado o Modelo de Mistura (*Mixture Model*).

O Modelo de Mistura é usado para modelar o fluxo em altos números de Reynolds de líquidos contendo uma fase dispersa para escoamento incompressível. A fase dispersa pode ser bolhas, gotículas de líquido ou partículas sólidas, com a consideração de que seu deslocamento seja sempre com sua velocidade terminal (COMSOL, 2018), dessa forma foi utilizado como padrão de escoamento o padrão de bolhas/gotículas dispersas.

Nos modelos multifásicos, as frações volumétricas φ também se tornam variáveis dependentes, dessa forma, modelos multifásicos devem encontrar soluções para a velocidade (\mathbf{j}), pressão (p), variáveis de turbulência (k e ε) e frações volumétricas (φ). As

equações utilizadas dependem do modelo multifásico, que, por sua vez, depende do padrão de escoamento escolhido (COMSOL, 2018).

O Modelo de Mistura tem como equação de quantidade de movimento a ser resolvida a Equação (3.8):

$$\begin{aligned} \rho \mathbf{j}_t + \rho (\mathbf{j} \cdot \nabla) \mathbf{j} + \rho_c \varepsilon (\mathbf{j}_{slip} \cdot \nabla) \mathbf{j} = -\nabla p - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{Gm} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \\ - \nabla \cdot [\rho_c (1 - \varphi_c \varepsilon) \mathbf{u}_{slip} \mathbf{j}_{slip}^T] - \rho_c \varepsilon \left[(\mathbf{j} \cdot \nabla) \mathbf{j}_{slip} + \left(\nabla \cdot (D_{md} \nabla \varphi_d) - \frac{m_{dc}}{\rho_d} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

onde os índices c e d representam a fase contínua e a fase dispersa respectivamente, \mathbf{j} é o vetor velocidade da mistura, ρ é a densidade, ε é a diferença de densidade reduzida, \mathbf{u}_{slip} é o vetor velocidade de escorregamento entre as duas fases, \mathbf{j}_{slip} é o fluxo volumétrico de escorregamento entre as duas fases, $\boldsymbol{\tau}_{Gm}$ é a soma de tensões viscosas e turbulentas, D_{md} é o coeficiente de dispersão turbulenta, m_{dc} é a taxa de transferência de massa da fase dispersa para a fase contínua, \mathbf{g} é o vetor aceleração da gravidade e \mathbf{F} representa forças adicionais.

A equação da continuidade neste modelo é simplificada para o caso em que as densidades das fases contínua e dispersa sejam constantes, i.e.

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0. \quad (3.9)$$

A variável \mathbf{j} , utilizada no Modelo de Mistura e definida por (3.10), é a velocidade média da mistura levando em conta o volume das partículas, enquanto a variável \mathbf{u} , utilizada no modelo monofásico, é a velocidade média da mistura levando em conta a massa das partículas.

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_d + \mathbf{j}_c = \varphi_d \mathbf{u}_d + \varphi_c \mathbf{u}_c. \quad (3.10)$$

A fração volumétrica da fase dispersa (φ_d) é determinada a partir da resolução de uma equação de transporte, conforme:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi_d) + \mathbf{j} \cdot \nabla \varphi_d + \nabla \cdot (\mathbf{j}_{slip}) = \nabla \cdot (D_{md} \nabla \varphi_d) - \frac{m_{dc}}{\rho_d}. \quad (3.11)$$

Os efeitos de turbulência são modelados usando o modelo padrão k- ε , definidos conforme as Equações (3.4) até (3.7).

A velocidade entre as duas fases pode ser descrita por três modelos de escorregamento, que partem da expressão base (3.12) e definindo o coeficiente de arraste (C_d) de maneiras diferentes.

$$\frac{3}{4} \frac{C_d}{d_d} \rho |\mathbf{u}_{slip}| \mathbf{u}_{slip} = -\frac{(\rho - \rho_d)}{\rho_c} \left(-\mathbf{j}_t - (\mathbf{j} \cdot \nabla) \mathbf{j} + \mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}}{\rho} \right). \quad (3.12)$$

Neste trabalho o modelo de escorregamento selecionado foi o modelo Schiller-Naumann, que utiliza (3.13) para o cálculo do C_d .

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) & Re_p < 1000 \\ 0,44 & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (3.13)$$

onde d_d é o diâmetro das bolhas/gotículas e o número de Reynolds da partícula é dado por (3.14).

$$Re_p = \frac{d_d \rho_c |u_{slip}|}{\mu} \quad (3.14)$$

Para as simulações multifásicas da mistura água-óleo, foram utilizadas as mesmas condições de contorno do caso monofásico, com as velocidades a montante conforme a Tabela 3.1 e pressão estática manométrica a jusante de 20 bar, além da adição de uma nova condição de contorno de fração volumétrica de água a montante. Neste estudo foram estudadas frações volumétricas de água de 10%, 30% e 70% em relação ao óleo. Além disso, foi utilizado 1 milímetro como diâmetro das gotículas da fase dispersa.

Com as condições de contorno definidas, foram configurados os valores iniciais, sendo utilizadas a velocidade a montante, conforme a abertura da válvula (Tabela 3.1), e a pressão a jusante. Também foi adicionada à simulação a aceleração da gravidade, condição de simetria à geometria e temperatura do fluido igual a 15°C.

Para a solução do problema de CFD foi utilizada a configuração padrão de *solvers* do *software* para o modelo multifásico turbulento. As variáveis de turbulência, as frações volumétricas e as variáveis de escoamento, velocidade e pressão, foram determinadas utilizando um *solver* iterativo (GMRES). Os dados foram posteriormente utilizados para construir uma curva a ser comparada com a curva característica da válvula, além da confecção de gráficos dos perfis de velocidade, pressão e fração volumétrica para melhor visualização da fluidodinâmica do escoamento multifásico incompressível através da válvula *choke*.

3.2.3 Simulações para escoamento multifásico compressível

Por fim, foram realizadas simulações de escoamento multifásico compressível da mistura entre água e ar. Para isto, foi utilizado o modelo de bolha dispersa (*Bubbly Flow*) disponível no *software* COMSOL.

Neste modelo, assume-se que as bolhas ocupem apenas uma pequena fração de volume e que sempre viajam com sua velocidade terminal. Assim é possível resolver apenas um conjunto de equações de Navier-Stokes para a fase líquida e deixar a velocidade das bolhas ser guiada por um modelo de escorregamento. A expressão para a quantidade de movimento é representada em (3.15).

$$\begin{aligned} & \varphi_l \rho_l \frac{\partial \mathbf{u}_l}{\partial t} + \varphi_l \rho_l \mathbf{u}_l \cdot \nabla \mathbf{u}_l = \\ & = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\varphi_l (\mu_l + \mu_T) \left(\nabla \mathbf{u}_l + \nabla \mathbf{u}_l^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}_l) \mathbf{I} \right) \right] + \varphi_l \rho_l \mathbf{g} + \mathbf{F} \end{aligned} \quad (3.15)$$

onde \mathbf{u}_l é o vetor velocidade, p é a pressão, φ é a fração volumétrica da fase, ρ é a densidade, \mathbf{g} é o vetor aceleração da gravidade, \mathbf{F} são forças adicionais no volume de

controle, μ_l é a viscosidade dinâmica do líquido e μ_T é a viscosidade turbulenta. Os índices l e g denotam grandezas relacionadas com a fase líquida e gasosa, respectivamente.

A equação da continuidade é expressa por (3.16).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \varphi_l + \rho_g \varphi_g) + \nabla \cdot (\rho_l \varphi_l \mathbf{u}_l + \rho_g \varphi_g \mathbf{u}_g) = 0. \quad (3.16)$$

A fração de volume das bolhas é rastreada resolvendo uma equação de transporte para a densidade efetiva do gás ($\rho_g \varphi_g$), conforme (3.17), em que há a introdução do termo m_{gl} que representa a taxa de transferência de massa da fase gasosa para a fase líquida.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varphi_g) + \nabla \cdot (\rho_g \varphi_g \mathbf{u}_g) = -m_{gl}. \quad (3.17)$$

Quanto aos modelos de escorregamento, optou-se por simular escoamento homogêneo, assumindo que as bolhas sempre seguem a fase líquida, dessa forma, a velocidade de escorregamento entre as duas fases é nula. Sendo assim, o escoamento homogêneo não leva em conta a turbulência extra causada pelo movimento das bolhas no líquido e os efeitos de turbulência são modelados usando o modelo padrão k- ϵ dos itens anteriores.

Para as simulações multifásicas da mistura água-ar, foram utilizadas as mesmas condições de contorno do caso monofásico, com as velocidades a montante conforme a Tabela 3.1 e pressão estática manométrica a jusante de 20 bar, além da adição de uma nova condição de contorno de fração volumétrica de ar a montante. Neste estudo foram aplicadas frações volumétricas de ar de aproximadamente 4,5% em relação à água, devido ao modelo garantir boa convergência somente para baixas frações de gás. Além disso, foi utilizado o diâmetro das bolhas de 1 milímetro.

Com as condições de contorno definidas, foram configurados os valores iniciais, sendo utilizadas a velocidade a montante, conforme a abertura da válvula (Tabela 3.1), e a pressão a jusante. Também foi adicionada à simulação a aceleração da gravidade, condição de simetria à geometria e temperatura do fluido igual a 15°C.

Para a solução do problema de CFD foi utilizada a configuração padrão de *solvers* do *software* para o modelo multifásico turbulento. As variáveis de turbulência, a densidade efetiva do gás e as variáveis de escoamento, velocidade e pressão, foram determinadas utilizando um *solver* direto (PARDISO). Os dados foram posteriormente utilizados para construir uma curva a ser comparada com a curva característica da válvula, além da confecção de gráficos dos perfis de velocidade, pressão e fração volumétrica para melhor visualização da fluidodinâmica do escoamento multifásico compressível através da válvula *choke*.

3.3 Determinação da curva característica

Para a confecção da curva característica da válvula *choke* a partir dos dados provenientes de CFD é necessária a determinação do valor do coeficiente de vazão (C_v)

para cada abertura. Conforme relatado no Capítulo 2 deste estudo, o C_v para escoamento monofásico incompressível é calculado a partir da vazão e da queda de pressão na válvula.

Para a obtenção da pressão a montante e a jusante resultantes das simulações, foi utilizado o operador de média “*surface average*” na entrada e na saída da válvula para a variável de pressão P .

Para a obtenção da vazão volumétrica Q , foi utilizado o operador “*surface integration*” disponível no *software* para a variável velocidade, realizando a integração do perfil de velocidade na área da tubulação. O valor encontrado foi então multiplicado por 2, visto que nas simulações foi utilizada uma geometria da válvula cortada ao meio.

3.3.1 Curva característica para escoamento monofásico incompressível

A curva característica para o escoamento monofásico incompressível foi confeccionada a partir de (2.9b), i.e. a equação de dimensionamento de válvulas de controle para escoamento monofásico.

$$C_v = \frac{Q}{N_1 F_p} \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}. \quad (2.9b)$$

Ao utilizar a vazão em galões por minuto (GPM) e a pressão em psi, o termo de conversão de unidades N_1 se torna 1. Além disso, o fator geométrico F_p para a válvula estudada é igual a 1 e a densidade relativa do fluido G , por se tratar de escoamento monofásico de água, equivale a 1. Aplicando as simplificações, (2.9b) se torna:

$$C_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P}}. \quad (3.18)$$

Para validação, a curva característica gerada foi então comparada à fornecida em catálogo pelo fabricante da válvula.

3.3.2 Curva característica para escoamento multifásico incompressível

Nesta seção será deduzida a equação para escoamento em válvulas de controle envolvendo escoamento multifásico. Embora essas equações estejam disponíveis na sua forma final, não foi possível encontrar a sua dedução na literatura. Sendo assim, optou-se por fazer um passo-a-passo da dedução, o que pode ser visto como uma das contribuições desta dissertação.

A curva característica para o escoamento multifásico incompressível também foi confeccionada a partir da equação de dimensionamento de válvulas de controle para escoamento monofásico, Equação (2.9b), porém assumindo que a densidade da mistura é determinada a partir da ponderação das densidades dos fluidos com suas respectivas frações volumétricas (φ), conforme representado em (3.19), ou seja, se está assumindo

que as duas fases sejam totalmente imiscíveis. Aqui se utilizam os índices c e d para representar a fase contínua e a fase dispersa, respectivamente.

$$\rho = \rho_c \varphi_c + \rho_d \varphi_d. \quad (3.19)$$

Dessa forma, ao substituir (3.19) em (2.9b), chega-se à expressão utilizada neste estudo para a determinação da curva característica para o escoamento multifásico incompressível, i.e.

$$C_v = \frac{Q}{N_1 F_P} \sqrt{\frac{\rho_c \varphi_c + \rho_d \varphi_d}{\rho_w \Delta P}}. \quad (3.20)$$

As curvas características foram geradas para as três combinações de frações volumétricas (10%, 30% e 70% de água) e foram então comparadas à curva gerada para as simulações de escoamento monofásico.

3.3.3 Curva característica para escoamento multifásico compressível

De acordo com Hutchison (1976), para um escoamento subcrítico, em regime turbulento de uma mistura homogênea de um líquido com um gás não-condensável, pode-se aplicar uma combinação linear entre o volume específico do líquido e do gás, este último ajustado pelo fator de expansão Y . Dessa forma, (3.21) representa o volume específico da mistura, o qual o autor chama de volume específico efetivo (v_e).

$$v_e = f_l v_l + \frac{f_g v_g}{Y^2} \quad (3.21)$$

onde v é o volume específico, os índices g e l representam a fase gás e líquida respectivamente, f corresponde à fração mássica do componente e Y é o fator de expansão do gás, definido no Capítulo 2 por:

$$Y = 1 - \frac{x}{3 F_k x_T} \quad (2.12)$$

Transformando o volume específico efetivo (v_e) em densidade efetiva (ρ_e) a partir da definição $\rho = \frac{1}{v}$, obtém-se:

$$\frac{1}{\rho_e} = \frac{f_l}{\rho_l} + \frac{f_g}{\rho_g Y^2} \quad (3.22)$$

Substituindo (3.22) na Equação (2.11b), chega-se à expressão para o coeficiente de vazão de uma mistura bifásica gás-líquido, em função da vazão mássica w .

$$C_v = \frac{w}{N_6 F_P} \sqrt{\frac{f_l}{\rho_l \Delta P_l} + \frac{f_g}{\rho_g \Delta P_g Y^2}} \quad (3.23)$$

Esta expressão foi validada para escoamento em regime turbulento de uma mistura de água e ar através de válvulas globo convencionais de pequeno porte em linhas horizontais e que, para caso similares, o erro não deve exceder 10% (HUTCHISON, 1976). Além disso, o autor cita que para escoamentos em linhas verticais, caso o escoamento seja homogêneo, a expressão é teoricamente válida.

A partir de (3.23) foram confeccionadas as curvas características com os dados provenientes das simulações para frações volumétricas de aproximadamente 4,5% de ar e foram então comparadas à curva gerada para as simulações de escoamento monofásico, permitindo avaliar se há diferença significativa entre os valores de C_v das curvas geradas pelos dados de CFD.

Capítulo 4 – Resultados

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos das simulações em Fluidodinâmica Computacional (CFD) para escoamento em uma válvula *choke* modelada a partir de catálogos.

Três tipos de escoamento são abordados em ordem crescente de complexidade:

- Escoamento monofásico incompressível;
- Escoamento multifásico incompressível;
- Escoamento multifásico compressível.

De acordo com os objetivos definidos no Capítulo 1, este capítulo visa também avaliar a utilização de expressões de dimensionamento de válvulas de controle para estimar a vazão para os tipos de escoamento citados.

4.1 Escoamento monofásico incompressível

A primeira etapa de validação da válvula a partir das simulações de CFD no *software COMSOL Multiphysics* se deu pela verificação da sua principal característica, a de proporcionar uma grande queda de pressão na linha. O perfil de pressão para escoamento monofásico de água na válvula com abertura de 20% pode ser verificado na Figura 4.1. Observa-se que, ao entrar no corpo da válvula, a corrente a montante (pressão de aproximadamente 40 bar e velocidade igual a 8 m/s) diminui bruscamente sua pressão para 20 bar, devido ao choque de correntes de sentidos opostos no centro da válvula.

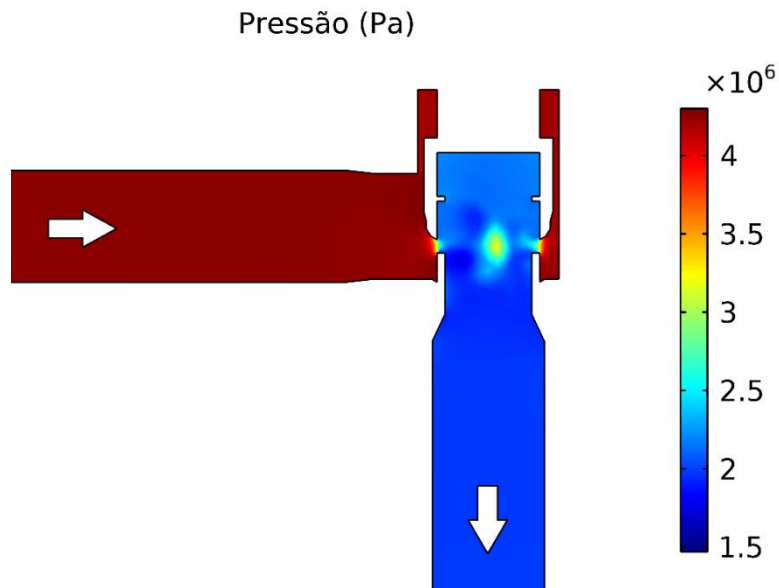


Figura 4.1: Perfil de pressão para escoamento monofásico de água na válvula *choke*.

O perfil de velocidade para o escoamento monofásico incompressível na válvula com abertura de 20% pode ser observado na Figura 4.2 (vista superior) e também na Figura 4.3 (vista lateral). Em ambas ilustrações é possível a visualização das áreas de maior velocidade, em vermelho, que ocorrem durante a passagem do fluido pela *vena contracta* da válvula. Enquanto a velocidade média do fluido na tubulação para este caso é igual a 8 m/s, a velocidade máxima do fluido no corpo da válvula é superior a 67 m/s. Além disso, também é possível observar o caminho do fluido através de linhas de corrente, com uma parte do fluido passando diretamente para a câmara interna da válvula e outra parte circundando e entrando por outros orifícios em sentidos opostos, gerando uma colisão de correntes em sentidos opostos e formando vórtices na câmara interna da válvula.

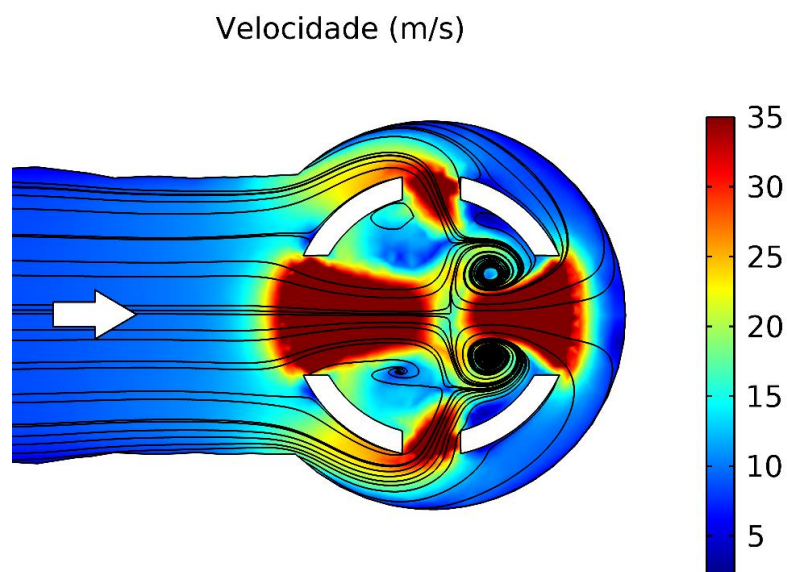


Figura 4.2: Vista superior do perfil de velocidade na válvula com linhas de corrente.

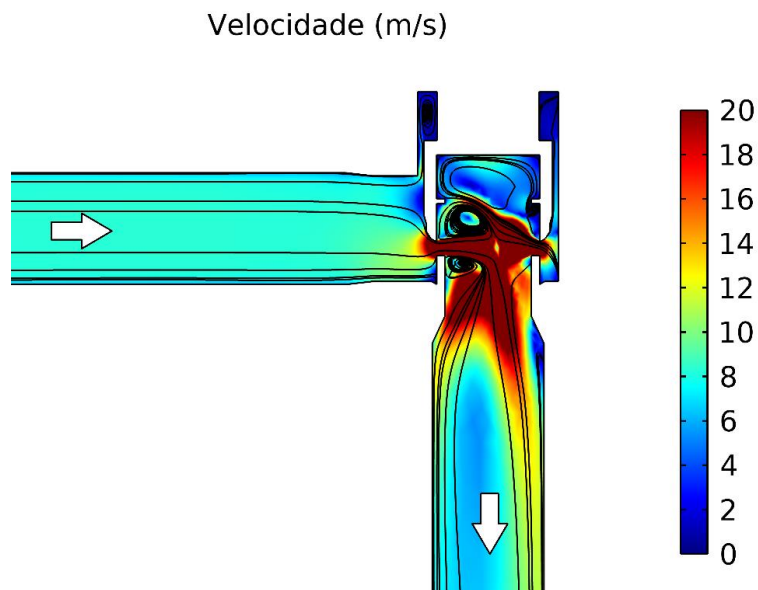


Figura 4.3: Vista lateral do perfil de velocidade na válvula com linhas de corrente.

Além disso, é possível verificar que, para aberturas de válvula entre 10% e 30%, obtém-se outro perfil de velocidade na saída da válvula (Figura 4.4). Esse fato ocorre, pois é nessa faixa de abertura que os orifícios de diâmetro médio e grande começam a estar descobertos e a vazão de fluido por cada orifício é diferente. O perfil para aberturas inferiores a 10% se assemelha ao da abertura de 10%, pois somente os orifícios laterais de menor diâmetro estão descobertos. O perfil para aberturas superiores a 30% se assemelha ao perfil da abertura de 30%, pois parte significativa do orifício de maior diâmetro está descoberta no sentido direto do fluxo. Dessa forma, a velocidade tende a ser maior em um dos lados da tubulação a jusante e precisa de um longo comprimento de tubulação até se tornar uniforme.

Com os perfis de velocidade e pressão resultantes das simulações, foram obtidas a pressão média a montante e a jusante da válvula e a vazão volumétrica. Dados esses utilizados para o cálculo do coeficiente de vazão C_v para cada abertura de válvula, através da Equação (2.8).

Então, com os valores de C_v foi possível confeccionar a curva característica da válvula através das simulações e compará-la com os valores reais catalogados pelo fabricante (MASTER FLO, 2020) (Figura 4.5).

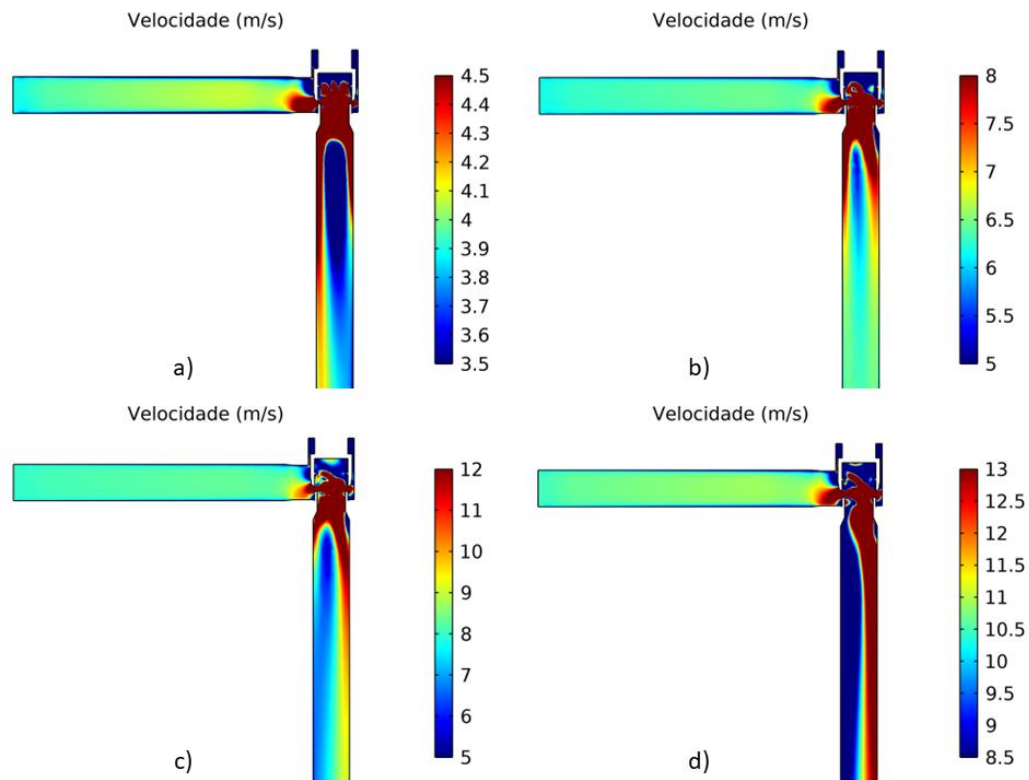


Figura 4.4: Perfis de velocidade na válvula para as aberturas de (a) 10%, (b) 15%, (c) 20% e (d) 30%.

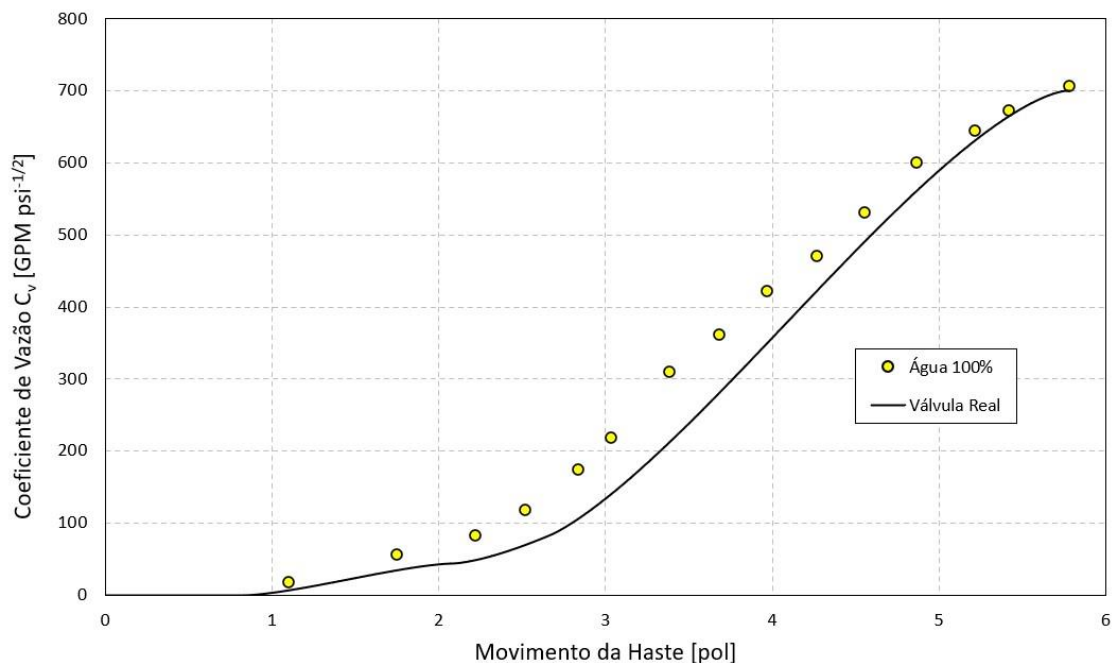


Figura 4.5: Comparação entre as curvas características da válvula.

A partir da Figura 4.5, pode-se verificar que a válvula *choke* modelada em AutoCAD, a partir de dados e figuras de catálogos, apresentou o mesmo perfil de C_v da válvula original, apesar de os valores serem um pouco superiores. Essa diferença, expressa como Erro

Médio Absoluto (MAE) foi de $44,68 \frac{GPM}{\sqrt{psi}}$, e em termos de Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE), foi de 40,25%.

A discrepância nos valores pode ser atribuída, em parte, ao fato de que, embora os diâmetros dos orifícios e da tubulação exatos da válvula real (Apêndice 1) tenham sido utilizados na válvula modelada em CAD, as imagens ilustrativas (MASTER FLO, 2020) das quais o restante da válvula foi modelado, não representam precisamente as medidas reais, resultando em alterações nas características da sua geometria.

Após a confecção da curva característica, foi confeccionado o gráfico da relação entre vazão volumétrica (Q) e raiz quadrada da queda de pressão ($\sqrt{\Delta P}$), para verificar o comportamento do coeficiente angular relacionado ao C_v , para o caso incompressível, conforme representado na Figura 4.6, no qual pode-se verificar o comportamento linear esperado.

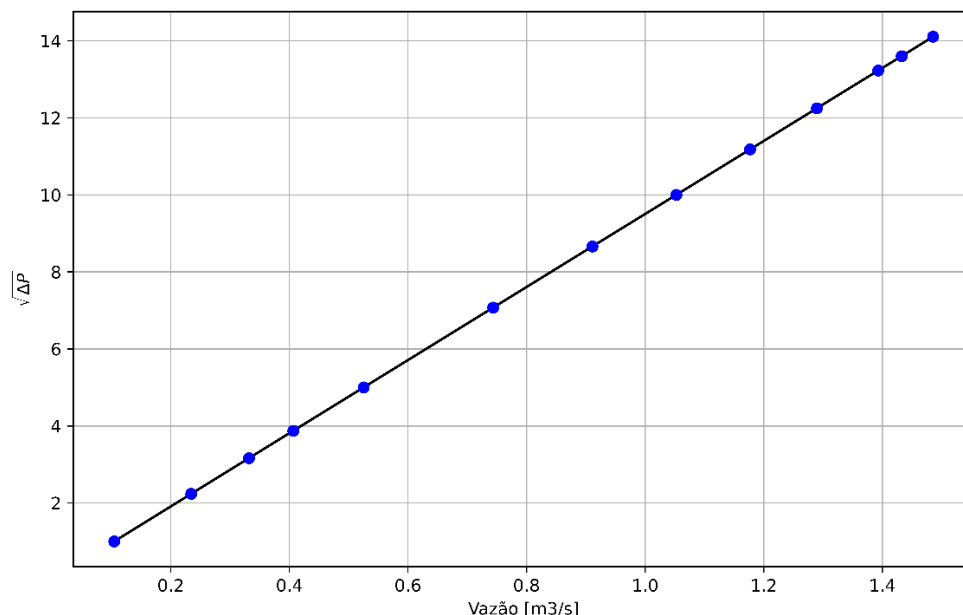


Figura 4.6: Curva da vazão versus raiz quadrada da queda de pressão.

4.2 Escoamento multifásico incompressível

Para as simulações multifásicas da mistura de água e óleo de transformador, em frações volumétricas de 10%, 30% e 70% de água em relação ao óleo, os perfis de pressão e de velocidade, representados na Figura 4.7 para abertura de válvula de 20%, foram semelhantes ao monofásico.

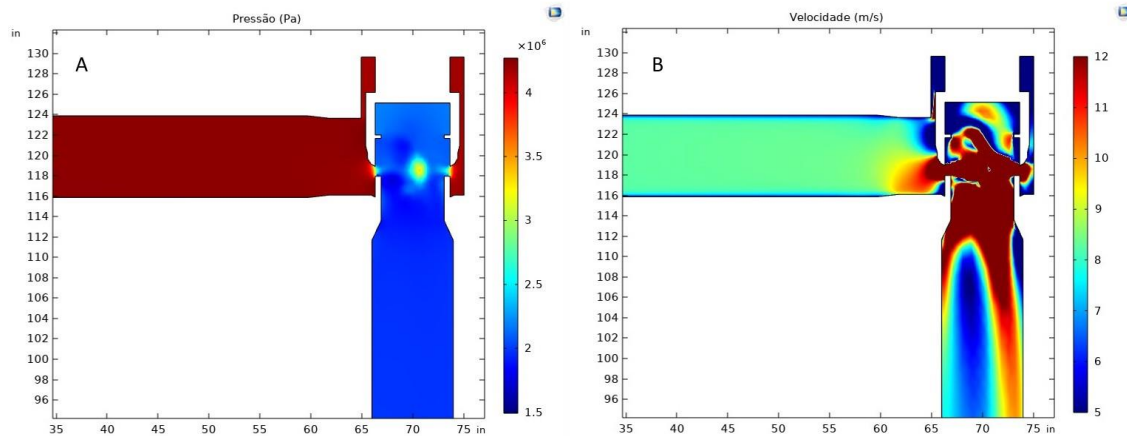


Figura 4.7: Perfil de (a) pressão e (b) velocidade na válvula *choke* para escoamento multifásico incompressível.

No caso de escoamento multifásico, as simulações apresentam soluções para três variáveis: velocidade, pressão e fração volumétrica. A Figura 4.8 representa o perfil da fração volumétrica de óleo ao longo da válvula, em uma abertura de válvula de 20%.

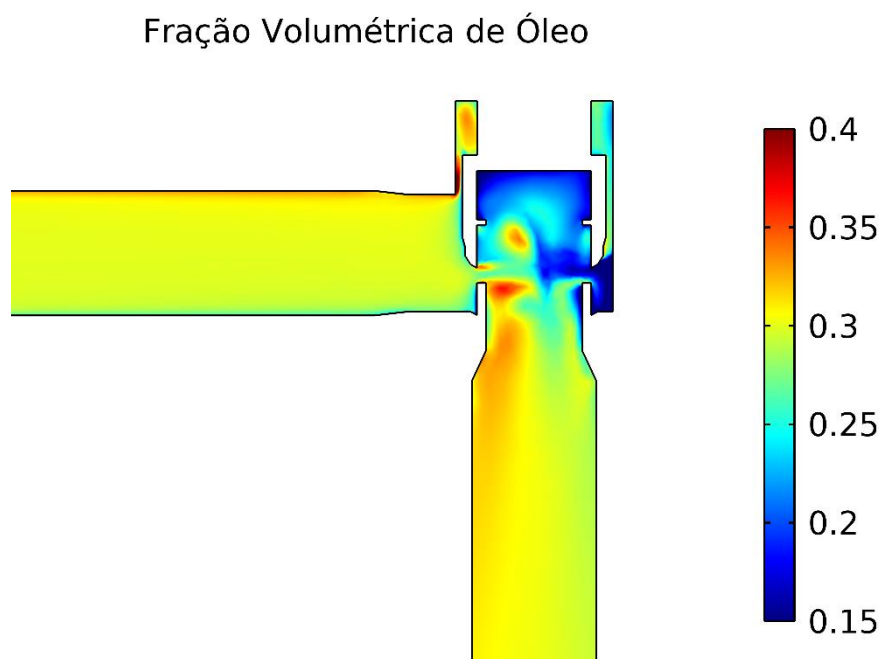


Figura 4.8: Fração volumétrica de óleo ao longo da válvula.

Com os perfis de velocidade e pressão resultantes das simulações, foram obtidas a pressão média na entrada e saída da válvula e a vazão volumétrica. Dados esses, utilizados para o cálculo do coeficiente de vazão (C_v) para determinada abertura de válvula através da Equação (3.20), que utiliza como densidade da mistura uma média das densidades ponderada com as frações volumétricas dos componentes.

$$C_v = \frac{Q}{N_1 F_P} \sqrt{\frac{\rho_c \phi_c + \rho_d \phi_d}{\rho_w} \frac{\Delta P}{\Delta P}} \quad (3.20)$$

Com os valores de C_v para o escoamento multifásico incompressível foi possível realizar a comparação com a curva característica obtida através das simulações monofásicas, conforme observado na Figura 4.9.

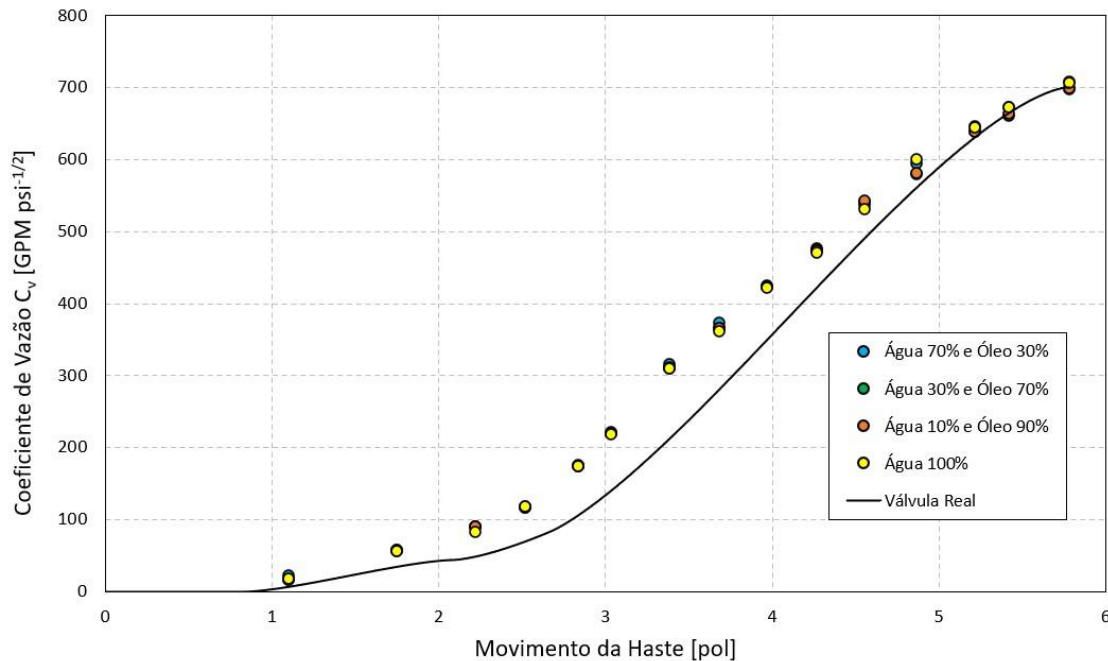


Figura 4.9: Curvas características para escoamento multifásico incompressível.

A partir da Figura 4.9, é possível verificar que o escoamento multifásico incompressível apresentou comportamento semelhante ao monofásico, com valores de coeficiente de vazão muito próximos. Isso reitera que a válvula modelada possui algumas características geométricas diferentes da válvula real, que impactam na obtenção dos valores reais de C_v , porém, a essência do escoamento através de uma válvula *choke* é captada perfeitamente. Além disso, comprova-se que a densidade da mistura, obtida a partir de uma média das densidades dos componentes ponderada com as frações volumétricas, pode ser utilizada nesse caso.

Dessa forma, ao rearranjar a Equação (3.20), é possível estimar a vazão volumétrica de fluido através da válvula *choke* para escoamentos multifásicos sem a presença de gás, utilizando a Equação (4.1). Podem ser utilizados nessa expressão os valores de C_v disponibilizados para escoamento monofásico, fornecidos pela fabricante da válvula.

$$Q = C_v N_1 F_P \sqrt{\frac{\Delta P}{\frac{\rho_c \phi_c + \rho_d \phi_d}{\rho_w}}} \quad (4.1)$$

4.3 Escoamento multifásico compressível

Para as simulações multifásicas da mistura de água e ar, com fração volumétrica de aproximadamente 4,5% de ar, os perfis de pressão e de velocidade, representados na Figura 4.10 para abertura de válvula de 20%, foram semelhantes aos perfis das simulações anteriores.

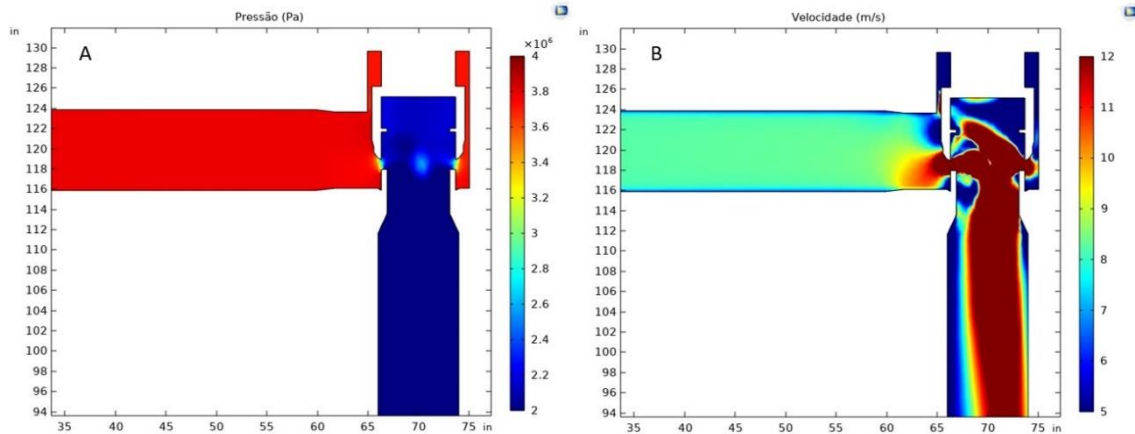


Figura 4.10: Perfil de (a) pressão e (b) velocidade na válvula *choke* para escoamento multifásico compressível.

A Figura 4.11 representa o perfil da fração volumétrica de ar ao longo da geometria, para uma abertura de válvula de 20%.

Fração Volumétrica de Ar

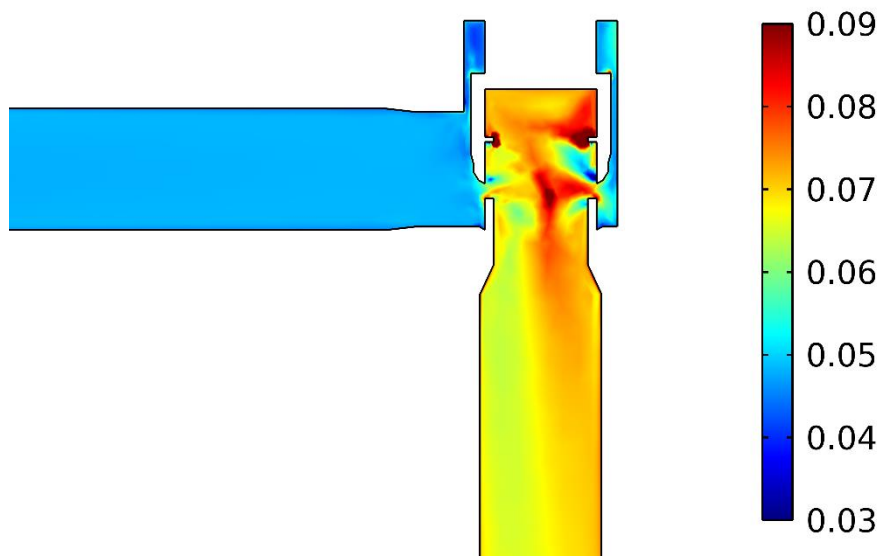


Figura 4.11: Fração volumétrica de ar ao longo da válvula.

Outro perfil importante de se analisar para este tipo de escoamento é o da densidade do ar (Figura 4.12). Na Figura 4.10 é possível observar a diminuição da pressão durante o escoamento do fluido através do corpo da válvula (de 40 bar para 20 bar), gerando expansão da fase gasosa. Essa expansão aumenta sua fração volumétrica (Figura 4.11) para $\approx 7\%$ e diminui sua densidade (Figura 4.12) para $\approx 43 \text{ kg/m}^3$ em relação às condições a montante ($\approx 4,5\%$ e $\approx 63 \text{ kg/m}^3$, respectivamente).

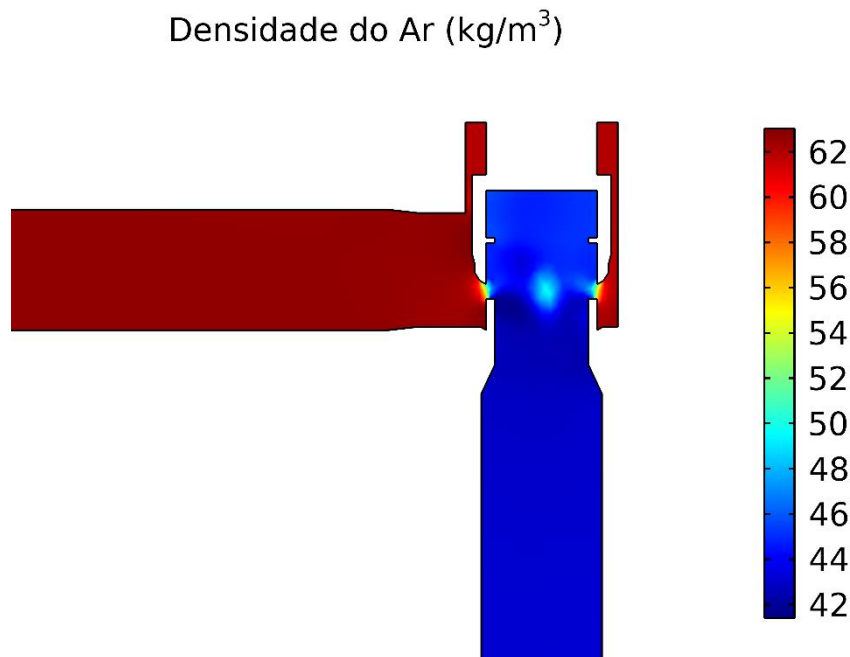


Figura 4.12: Perfil de densidade do ar ao longo da válvula.

Com os perfis de velocidade e pressão resultantes das simulações, foram obtidas a pressão média na entrada e saída da válvula e a vazão volumétrica. Dados esses, utilizados para o cálculo do coeficiente de vazão (C_v) para determinada abertura de válvula através da Equação (3.23), que são uma combinação linear das expressões para escoamento monofásico de gases e líquidos.

$$C_v = \frac{w}{N_6 F_P} \sqrt{\frac{f_l}{\rho_l \Delta P_l} + \frac{f_g}{\rho_g \Delta P_g Y^2}} \quad (3.23)$$

Com os valores de C_v para o escoamento multifásico compressível, foi possível realizar a comparação com a curva característica obtida através das simulações monofásicas de água, conforme a Figura 4.13.

Bem como para o escoamento multifásico incompressível, é possível verificar que os valores de coeficiente de vazão para o escoamento multifásico compressível ficaram muito próximos aos do escoamento monofásico. Como o modelo *bubbly flow* do *software* de CFD apresenta algumas limitações, principalmente quanto à fração volumétrica de gás, o seu maior valor possível na condição de contorno a montante foi de aproximadamente 4,5%. Além disso, o único perfil de escoamento capaz de ser simulado foi o escoamento homogêneo de bolhas dispersas. Apesar disso, o uso da Equação (3.23) para as condições de baixa concentração de gás se mostrou viável.

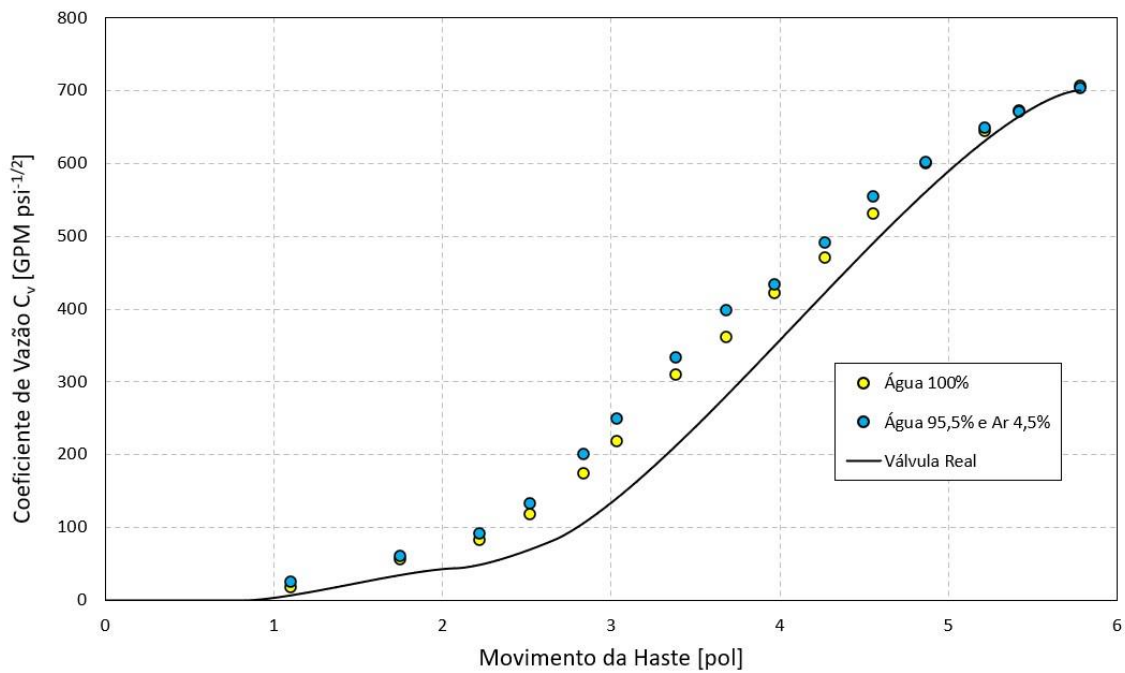


Figura 4.13: Curva característica para escoamento multifásico compressível.

Ao rearranjar a Equação (3.23), é possível estimar a vazão volumétrica de fluido através da válvula *choke* para escoamentos multifásicos com a presença de gás, utilizando a Equação (4.2). Para isso, podem ser utilizados nessa expressão os valores de C_v disponibilizados para escoamento monofásico, fornecidos pela fabricante da válvula.

$$w = \frac{C_v N_6 F_P}{\sqrt{\frac{f_l}{\rho_l \Delta P_l} + \frac{f_g}{\rho_g \Delta P_g Y^2}}} \quad (4.2)$$

4.4 Erro Médio Absoluto (MAE) e Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE)

As métricas utilizadas para comparar os valores de C_v obtidos para os casos multifásicos (água-óleo e água-ar) com o caso monofásico foram o Erro Médio Absoluto (MAE), em unidades de $C_v \left(\frac{GPM}{\sqrt{psi}} \right)$, e o Erro Absoluto Percentual Médio (MAPE). A Tabela 4.1 apresenta os valores das diferenças obtidas.

Tabela 4.1: MAE e MAPE para escoamentos multifásicos em relação ao monofásico.

	Água-Óleo		Água-Ar	
Fração volumétrica de água	70%	30%	10%	≈95,5%
MAE $\left(\frac{GPM}{\sqrt{psi}}\right)$	3,97	5,45	5,24	14,52
MAPE (%)	3,46	2,02	1,98	8,71

Os valores das diferenças obtidas reafirmam o que foi demonstrado nas curvas características da válvula, mostrando que os resultados para escoamentos multifásicos calculados a partir das equações deduzidas neste trabalho ficaram muito próximos dos valores obtidos para o caso monofásico.

Capítulo 5 – Considerações Finais

5.1 Conclusões

Neste trabalho foi realizada a avaliação do uso de expressões de válvulas de controle para inferir a vazão através de uma válvula *choke* em uma plataforma de petróleo. O objeto de estudo foi uma válvula *choke* modelada em CAD a partir de dados e imagens de uma válvula real, de 8 polegadas de diâmetro e modelo *external sleeve* produzida pela fabricante Master Flo™. Os dados de escoamento foram obtidos através de simulações em CFD através do *software Comsol Multiphysics*.

As principais contribuições desse estudo são a dedução das equações que governam o dimensionamento de válvulas de controle e a validação, através de dados provenientes de CFD, de equações para o cálculo da vazão, em uma válvula *choke*, a partir da sua abertura e da sua queda de pressão, para três tipos de escoamento: monofásico incompressível (água), multifásico incompressível (água e óleo de transformador) e multifásico compressível (água e ar). O escoamento estudado foi do tipo turbulento, subcrítico e isotérmico e, para os casos multifásicos, escoamento homogêneo com padrão de escoamento de bolhas/gotas dispersas.

Os resultados mostraram uma boa proximidade entre os dados das curvas características das válvulas simulada e real, visto que é complexa a modelagem da válvula apenas por imagens e dados de catálogos. O perfil do comportamento da vazão e da diferença de pressão em função da abertura da válvula para todos os tipos de escoamento foi muito semelhante ao da válvula real. Os valores do coeficiente de vazão obtidos através das simulações de escoamento multifásico, utilizando suas respectivas equações, foram muito próximos dos coeficientes obtidos para o caso monofásico, o que indica que, nas condições de escoamento abordadas neste estudo, as expressões mostraram-se válidas.

Devido às limitações do modelo de CFD *bubbly flow* do *software*, complexidade da geometria e dificuldades de convergência, o maior valor possível para fração volumétrica de ar na condição de contorno a montante foi de aproximadamente 4,5%. Além disso, o único perfil de escoamento capaz de ser simulado foi o escoamento homogêneo de bolhas dispersas. Isso limita a validação da Equação (3.23) para o estudo do escoamento multifásico com presença de gás para condições de baixa concentração.

De modo geral, as correlações empregadas nesse estudo representam uma nova abordagem e alternativa interessante para estimar a vazão em uma plataforma petrolífera.

5.2 Perspectivas para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos, é possível elencar as seguintes perspectivas para trabalhos futuros:

- avaliação de misturas de hidrocarbonetos encontradas em plataformas de petróleo;
- avaliação dos efeitos térmicos da expansão do gás na válvula. Pelo efeito Joule-Thomson, sabe-se que, ao passar por uma válvula, o gás se expande, gerando seu resfriamento, o que pode ocasionar problemas nas plataformas de petróleo;
- utilização dos dados provenientes de simulações em CFD para avaliar diferentes correlações empíricas derivadas de Gilbert (1954) que buscam descrever o comportamento da válvula *choke*;
- aplicação de dados obtidos por uma válvula construída em escala laboratorial nas expressões avaliadas nesse trabalho. Esse método, apesar de apresentar limitações experimentais, permite estudar maiores frações volumétricas e outros tipos de padrões de escoamento que não foram avaliados no presente estudo;
- aplicação de dados reais de plataformas de petróleo nas expressões avaliadas nesse trabalho.

Referências

ALRUMAH, M.; BIZANTI, M. New Choke Correlations for Sabryiah Field, Kuwait. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Bahrain, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/105103-MS>

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL, ANP, 2021. Boletim da produção de petróleo e gás natural. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br>>.

ASHFORD, F. E.; PIERCE, P. E. Determining Multiphase Pressure Drops and Flow Capacities in Down-Hole Safety Valves. *Vegetatio*, v. 27, n. 3, p. 1145–1152, 1975.

BARKER, Colin. Origin, Composition and Properties of Petroleum. *Developments in Petroleum Science*, v. 17, p. 11–45, 1985. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0376-7361\(08\)70564-8](https://doi.org/10.1016/S0376-7361(08)70564-8)

BARTELS, K; HARMON, A. Choked Flow in Control Valves. *International Society of Automation*, 2021. Disponível em: < <https://www.isa.org/intech-home/2021/august-2021/departments/choked-flow-in-control-valves>>. Acesso em: 1 de junho de 2022.

BARTON, Neil; READER-HARRIS, Michael; GIBSON, Jeff. Overview of CFD Modelling of Orifice Plate Flowmeters. *North Sea Flow Measurement Workshop*, p. 14, 2004.

BAUMANN, Hans D. *Control Valve Primer - A User's Guide*. 4th. ed., 2009.

BAXENDELL, P.B. Producing Wells on Casing Flow - An Analysis of Flowing Pressure Gradients. *Transactions of the AIME*, v. 213, n. 01, p. 202–206, 1958. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/983-g>

BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E.; LIGHTFOOT, Edwin N. *Transport phenomena*. 2nd. ed. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

BRASIL. Lei nº 9478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 16925, 7 ago. 1997.

BRENNEN, Christopher Earls. Flow Patterns. *In: FUNDAMENTALS OF MULTIPHASE FLOW*. 2005. p. 402.

CEBECI, Tuncer *et al.* Computational Fluid Dynamics for Engineers: From Panel to Navier-Stokes Methods with Computer Programs. Horizons Publishing, 2005.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações. 2012. ISSN 1259696537.v. 53

CHOUBINEH, Abouzar *et al.* Improved predictions of wellhead choke liquid critical-flow rates: Modelling based on hybrid neural network training learning based optimization. *Fuel*, v. 207, p. 547–560, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.131>

COMSOL. CFD Module User's Guide. 2018. p. 710.

COMSOL. Disponível em: < <https://www.comsol.com/>>. Acesso em: 5 de abril de 2020.

DI MEGLIO, Florent *et al.* Stabilization of slugging in oil production facilities with or without upstream pressure sensors. *Journal of Process Control*, v. 22, n. 4, p. 809–822, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2012.02.014>

DIEHL, Fabio Cesar. Controle Ativo de Golfadas em Poços de Petróleo Offshore. 127 f. 2022, 2022.

ELGIBALY, A. A. M.; NASHAWI, I. S. Prediction of two-phase flow through chokes for Middle-East oil wells. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. OnePetro, 1996.

EMERSON. Control Valve Handbook. 5th. ed., 2005.

FALCONE, G. Multiphase flow fundamentals. *In: FALCONE, G; HEWITT, G. F; ALIMONTI, C.* (ed.). Multiphase flow metering: principles and applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. chapter 1, p. 1-18. (Developments in Petroleum Science, 54).

MASTER FLO. P8 Choke Valve. Disponível em:

<<https://www.masterflo.com/en/products/choke-valves/p8-choke-valve/>>. Acesso em: 27 de março de 2020.

GABEL, Trevor *et al.* Incompressible flow through choke valve: An experimental and computational investigation. *In: JOURNAL OF FLUIDS AND STRUCTURES*. Elsevier Inc., 2022. v. 113, p. 29. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2022.103669>

GANAT, Tarek A; HRAIRI, Meftah. A new choke correlation to predict flow rate of artificially flowing wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 171, n. August, p. 1378–1389, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.004>

GHAREEB, Mohamed; SHEDID, Shedid A. A new correlation for calculating wellhead production considering influences of temperature, GOR, and water-cut for artificially lifted wells. International Petroleum Technology Conference 2007, IPTC 2007, v. 1, p. 68–77, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.147.iptc11101>

GILBERT, W. E. Flowing and gas-lift well performance. Drilling and production practice.

OnePetro, 1954.

GUO, Boyun.; LYONS, William C.; GHALAMBOR, Ali. Choke Performance. *In: PETROLEUM PRODUCTION ENGINEERING*. Elsevier, 2007. p. 60–67. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8270-1.X5000-2>

HADIA, Hassn. Computational Fluid Dynamics (CFD) To Simulate Slug Flow in Horizontal Pipeline and Annular Pipe. 60 f. 2018. - Memorial University of Newfoundland, 2018.

HUTCHISON, James W. ISA Handbook of Control Valves. 2nd. ed., 1976.

JAHANSHAH, Esmail. Control Solutions for Multiphase Flow- Linear and nonlinear approaches to anti-slug control. 196 f. 2013. - Norwegian University of Science and Technology, 2013.

KARGARPOUR, Mohammad Ali. Oil and gas well rate estimation by choke formula: semi-analytical approach. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, v. 9, n. 3, p. 2375–2386, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0629-6>

LAK, Ahmad *et al.* Choke modeling and flow splitting in a gas-condensate offshore platform. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 21, p. 1163–1170, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.07.020>

LIPTÁK, Béla. Process Control and Optimization. 4th. ed., 2006. ISSN 00325929.v. 2

MCQUILLAN, K.W.; WHALLEY, P.B. Flow patterns in vertical two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 11, n. 2, p. 161–175, 1985. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(85\)90043-6](https://doi.org/10.1016/0301-9322(85)90043-6)

MERIBOUT, Mahmoud *et al.* An Ultrasonic-based Multiphase Flow Composition Meter. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation*, v. 165, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108111>

MITRA, Harsa *et al.* Computational study of compressible flow through choke valve. *Journal of Fluids and Structures*, v. 113, p. 103670, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2022.103670>

NØKLEBERG, L; SONTVEDT, T. Erosion in choke valves—oil and gas industry applications. *Wear*, v. 186–187, p. 401–412, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)07138-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)07138-5)

OKON, Anietie N.; UDOH, Francis D.; APPAH, Dulu. Empirical wellhead pressure-production rate correlations for Niger delta oil wells. Society of Petroleum Engineers - SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, NAICE 2015, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/178303-ms>

OLIVEIRA, Thiago Barra Vidal de. Avaliação metrológica do desempenho do medidor tipo v-cone para medição de vazão de gás úmido. 166 f. 2010. - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.

PILEHVARI, A. A. Experimental study of critical two-phase flow through wellhead chokes. University of Tulsa, 1981.

RIBEIRO, Luiz Filipe Costa; NETO, Moisés Afonso de Oliveira. Medição multifásica de vazão na indústria do petróleo. 64 f. 2018. - Universidade Federal Fluminense, 2018.

RIBEIRO, Marco Antonio. Medição de Petróleo e Gás Natural. 2. ed. Salvador: 2003.

ROS, N. C. J. An analysis of critical simultaneous gas/liquid flow through a restriction and its application to flowmetering. Applied Scientific Research, v.9, p. 374, 1960. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00382215>

SACHDEVA, R.; SCHMIDT, Z.; BRILL, J. P.; BLAIS, R. M. Two-Phase Flow Through Chokes. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/15657-MS>

SADIQ, Dhefaj J. Predication of Oil Flow Rate through Choke at Critical Flow for Iraqi Oil Wells. Journal of Petroleum Research and Studies, p. 28, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.52716/jprs.v3i2.75>

SANTOS, Vanessa de Castro Maciel dos. A medição fiscal dos volumes de petróleo - Medidores ultrassônicos. 123 f. 2011. - Universidade Federal Fluminense, 2011.

SECEN, J. A. Surface choke measurement equation improved by field testing analysis. Oil and Gas Journal, v. 30, n. 8, p. 65-68, 1976.

STUCKENBRUCK, S. Padrões de Escoamento. 2021. Disponível em: <http://multifasico.usuarios.rdc.puc-rio.br/>.

TANGREN, R. F.; DODGE, C. H.; SEIFERT, H. S. Compressibility effects in two-phase flow. Journal of Applied Physics, v. 20, n. 7, p. 637-645, 1949. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1698449>

TRIERWEILER, Jorge Otávio. Válvulas de Controle Parte II. YouTube, 21 de setembro de 2021. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=D1p18UFTm-s> >. Acesso em: 22 de setembro de 2021.

ZANGL, Georg; HERMANN, Roland; SCHWEIGER, Christian. Comparison of methods for stochastic multiphase flow rate estimation. Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, v. 5, p. 3840-3854, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.2118/170866-ms>

Apêndice 1 – Determinação das dimensões dos orifícios da válvula

Visando determinar a dimensão das aberturas circulares da válvula necessárias para se poder fazer as simulações de fluidodinâmica computacional, se utilizou como referência imagens de catálogos da válvula Master Flo™ P8 do tipo *external sleeve*, conforme representado na Figura A.1, primeiramente foram determinadas a quantidade e a posição das aberturas.

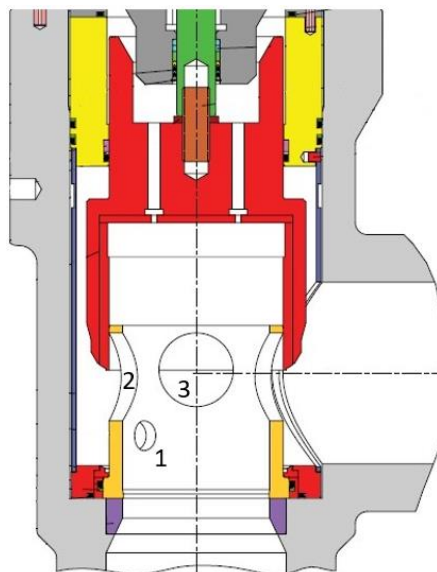


Figura A.1: Corpo da válvula Master Flo™ P8 *External Sleeve*.

Adaptado de Master Flo (2020).

A partir das imagens, verifica-se que essa válvula é composta por três pares de aberturas de diâmetros distintos. Além disso, quanto à posição é possível observar que o par de maior diâmetro (2) e o de menor diâmetro (1) estão alinhados no sentido de que ao abrir a válvula, quando o par de menor diâmetro é totalmente descoberto, o par de maior diâmetro começa a ser descoberto imediatamente. Já o par de diâmetro intermediário (3)

tem sua parte superior alinhada com a parte superior do par de maior diâmetro. Para dimensionar os diâmetros dos três pares de orifícios da válvula, foram utilizados dados de uma válvula real, que estão dispostos no Anexo 1, os quais apresentam as relações de movimento vertical da haste, a porcentagem de área aberta, área aberta em polegadas quadradas e o coeficiente de vazão. Destes, a relação entre movimento vertical da haste e porcentagem de área aberta foi utilizada para o dimensionamento.

Ao iniciar o dimensionamento, foi necessário o estabelecimento de expressões para o cálculo da área descoberta, de acordo com o movimento da haste. Para este caso, foram utilizadas duas expressões. A primeira expressão é para o caso em que somente a parte inferior da abertura circular está descoberta (parte hachurada), conforme a Figura A.2.

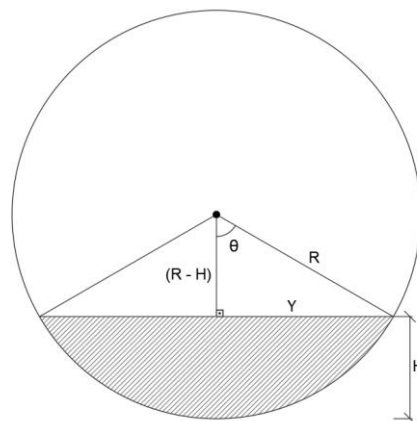


Figura A.2: Abertura circular descoberta somente na parte inferior.

Nesse caso, o cálculo da área descoberta se dá pela subtração da área do triângulo de base $2Y$ e altura $(R - H)$, onde R é o raio do círculo e H é a altura do deslocamento da haste, da área da seção circular de raio R e ângulo 2θ , em radianos.

A área da seção circular (A_s) é expressa da forma:

$$A_s = \frac{\hat{\text{Ângulo}} \cdot \pi \cdot r^2}{2\pi} = \frac{2\theta \cdot \pi \cdot R^2}{2\pi}$$

$$A_s = \theta \cdot R^2 \quad (\text{A.1})$$

A partir da relação trigonométrica do cosseno de um ângulo em um triângulo retângulo, pode-se determinar θ , i.e.

$$\text{Cos}(\theta) = \frac{\text{Cateto Adjacente}}{\text{Hipotenusa}}$$

$$\text{Cos}(\theta) = \frac{R - H}{R}$$

$$\theta = \text{Acos}\left(\frac{R-H}{R}\right). \quad (\text{A.2})$$

A área do triângulo (A_t) é expressa da forma:

$$A_t = \frac{\text{base} \cdot \text{altura}}{2} = \frac{2Y \cdot (R - H)}{2}$$

$$A_t = Y \cdot (R - H) \quad (\text{A.3})$$

Onde Y é determinado através do Teorema de Pitágoras:

$$Y = \sqrt{R^2 - (R - H)^2} \quad (\text{A.4})$$

Dessa forma, através da Equação (A.5), é calculada a área da seção hachurada (A).

$$A = A_s - A_t = A \cos\left(\frac{R-H}{R}\right) \cdot R^2 - Y \cdot (R - H) \quad (\text{A.5})$$

A segunda expressão é para o caso em que a área descoberta (parte hachurada) está acima do centro do círculo, conforme a Figura A.3.

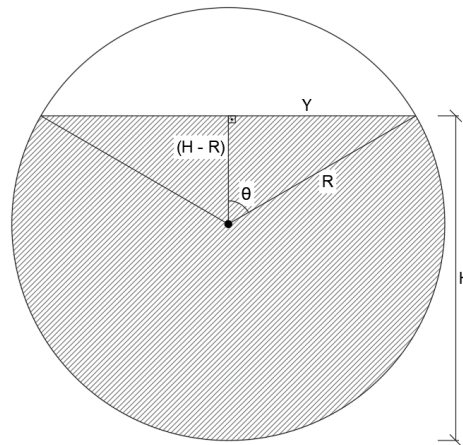


Figura A.3: Abertura circular descoberta acima do centro do círculo.

Nesse caso, o cálculo da área descoberta se dá pela subtração da área da seção circular, de raio R e ângulo 2θ , da área do círculo (A_c) de raio R e, por fim, é realizada a adição a esse resultado da área do triângulo, de base $2Y$ e altura $(R - H)$, onde R é o raio do círculo e H é a altura do deslocamento da haste.

A área da seção circular (A_s) se dá pela mesma expressão do caso anterior, (A.1). Já o cálculo do ângulo θ é expresso da forma:

$$\theta = A \cos\left(\frac{H-R}{R}\right) \quad (\text{A.6})$$

A área do triângulo (A_t) é obtida através da seguinte expressão:

$$A_t = Y \cdot (H - R) \quad (\text{A.7})$$

Onde Y é determinado através Teorema de Pitágoras, agora da forma:

$$Y = \sqrt{R^2 - (H - R)^2} \quad (\text{A.8})$$

Sendo assim, a área total da seção hachurada (A) é expressa por:

$$A = A_c - A_s + A_t = \pi \cdot R^2 - A \cos\left(\frac{H-R}{R}\right) \cdot R^2 + Y \cdot (H - R) \quad (\text{A.9})$$

Após definidas as expressões para os casos das duas diferentes posições nas quais as aberturas possam estar descobertas, (A.5) e (A.9), foi realizada uma otimização em *Python* através da função *curve_fit* do módulo *Scipy.optimize*, que utiliza o método dos mínimos quadrados não linear para ajustar a função (A.5 ou A.9 dependendo da relação entre R e H), através do algoritmo de Levenberg–Marquardt, aos dados catalogados da válvula dispostos no Anexo 1, determinando-se assim, os valores dos três raios:

- Raio do orifício menor: 0,620 polegadas;
- Raio do orifício de tamanho intermediário: 1,530 polegadas;
- Raio do orifício maior: 1,858 polegadas.

Anexo 1 – Dados de catálogo da válvula *choke* Master Flo™ *external sleeve* P8

Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol ²)	Área Aberta (%)	Cv	Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol ²)	Área Aberta (%)	Cv
0	0	0	0	0.417	0	0	0
0.017	0	0	0	0.433	0	0	0
0.033	0	0	0	0.45	0	0	0
0.05	0	0	0	0.467	0	0	0
0.067	0	0	0	0.483	0	0	0
0.083	0	0	0	0.5	0	0	0
0.1	0	0	0	0.517	0	0	0
0.117	0	0	0	0.533	0	0	0
0.133	0	0	0	0.55	0	0	0
0.15	0	0	0	0.567	0	0	0
0.167	0	0	0	0.583	0	0	0
0.183	0	0	0	0.6	0	0	0
0.2	0	0	0	0.617	0	0	0
0.217	0	0	0	0.633	0	0	0
0.233	0	0	0	0.65	0	0	0
0.25	0	0	0	0.667	0	0	0
0.267	0	0	0	0.683	0	0	0
0.283	0	0	0	0.7	0	0	0
0.3	0	0	0	0.717	0	0	0
0.317	0	0	0	0.733	0	0	0
0.333	0	0	0	0.75	0	0	0
0.35	0	0	0	0.767	0	0	0
0.367	0	0	0	0.783	0	0	0
0.383	0	0	0	0.8	0	0	0
0.4	0	0	0	0.817	0	0	0

Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol²)	Área Aberta (%)	Cv	Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol²)	Área Aberta (%)	Cv
0.833	0	0	0	1.55	1.46	3.8	26.3
0.85	0.01	0	0.1	1.567	1.5	3.9	27.1
0.867	0.02	0.1	0.4	1.583	1.54	4	27.8
0.883	0.04	0.1	0.6	1.6	1.58	4.1	28.5
0.9	0.05	0.1	1	1.617	1.62	4.2	29.3
0.917	0.07	0.2	1.3	1.633	1.66	4.3	30
0.933	0.1	0.2	1.7	1.65	1.7	4.4	30.7
0.95	0.12	0.3	2.1	1.667	1.74	4.5	31.4
0.967	0.14	0.4	2.6	1.683	1.78	4.6	32.1
0.983	0.17	0.4	3.1	1.7	1.82	4.7	32.8
1	0.2	0.5	3.6	1.717	1.86	4.8	33.5
1.017	0.23	0.6	4.1	1.733	1.9	4.9	34.2
1.033	0.26	0.7	4.6	1.75	1.93	5	34.8
1.05	0.29	0.7	5.2	1.767	1.97	5.1	35.5
1.067	0.32	0.8	5.8	1.783	2.01	5.2	36.2
1.083	0.35	0.9	6.4	1.8	2.04	5.3	36.8
1.1	0.39	1	7	1.817	2.08	5.3	37.4
1.117	0.42	1.1	7.6	1.833	2.11	5.4	38
1.133	0.46	1.2	8.3	1.85	2.14	5.5	38.6
1.15	0.49	1.3	8.9	1.867	2.17	5.6	39.2
1.167	0.53	1.4	9.6	1.883	2.21	5.7	39.7
1.183	0.57	1.5	10.2	1.9	2.24	5.8	40.3
1.2	0.61	1.6	10.9	1.917	2.26	5.8	40.8
1.217	0.64	1.7	11.6	1.933	2.29	5.9	41.3
1.233	0.68	1.8	12.3	1.95	2.32	6	41.8
1.25	0.72	1.9	13	1.967	2.34	6	42.2
1.267	0.76	2	13.7	1.983	2.37	6.1	42.6
1.283	0.8	2.1	14.4	2	2.39	6.1	43
1.3	0.84	2.2	15.2	2.017	2.41	6.2	43.4
1.317	0.88	2.3	15.9	2.033	2.42	6.2	43.7
1.333	0.92	2.4	16.6	2.05	2.44	6.3	43.9
1.35	0.96	2.5	17.4	2.067	2.45	6.3	44.1
1.367	1	2.6	18.1	2.083	2.46	6.3	44.2
1.383	1.05	2.7	18.8	2.1	2.47	6.4	44.5
1.4	1.09	2.8	19.6	2.117	2.49	6.4	44.8
1.417	1.13	2.9	20.3	2.133	2.52	6.5	45.3
1.433	1.17	3	21.1	2.15	2.55	6.6	45.9
1.45	1.21	3.1	21.8	2.167	2.58	6.7	46.5
1.467	1.25	3.2	22.6	2.183	2.62	6.8	47.2
1.483	1.3	3.3	23.3	2.2	2.67	6.9	48
1.5	1.34	3.4	24.1	2.217	2.71	7	48.8
1.517	1.38	3.5	24.8	2.233	2.76	7.1	49.6
1.533	1.42	3.7	25.6	2.25	2.81	7.2	50.5

Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol²)	Área Aberta (%)	Cv	Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol²)	Área Aberta (%)	Cv
2.267	2.86	7.4	51.5	2.933	6.79	17.5	122.4
2.283	2.92	7.5	52.5	2.95	6.95	17.9	125.3
2.3	2.97	7.7	53.5	2.967	7.12	18.3	128.3
2.317	3.03	7.8	54.6	2.983	7.28	18.8	131.3
2.333	3.09	8	55.7	3	7.45	19.2	134.3
2.35	3.16	8.1	56.8	3.017	7.62	19.6	137.4
2.367	3.22	8.3	58	3.033	7.8	20.1	140.5
2.383	3.29	8.5	59.2	3.05	7.97	20.5	143.6
2.4	3.36	8.6	60.4	3.067	8.15	21	146.8
2.417	3.43	8.8	61.7	3.083	8.32	21.4	150
2.433	3.5	9	63	3.1	8.5	21.9	153.3
2.45	3.57	9.2	64.3	3.117	8.69	22.4	156.5
2.467	3.65	9.4	65.6	3.133	8.87	22.8	159.8
2.483	3.72	9.6	67	3.15	9.05	23.3	163.2
2.5	3.8	9.8	68.4	3.167	9.24	23.8	166.5
2.517	3.88	10	69.8	3.183	9.43	24.3	169.9
2.533	3.96	10.2	71.2	3.2	9.62	24.8	173.4
2.55	4.04	10.4	72.7	3.217	9.81	25.3	176.8
2.567	4.12	10.6	74.2	3.233	10	25.8	180.3
2.583	4.21	10.8	75.7	3.25	10.2	26.3	183.8
2.6	4.29	11	77.2	3.267	10.39	26.8	187.3
2.617	4.38	11.3	78.8	3.283	10.59	27.3	190.8
2.633	4.47	11.5	80.3	3.3	10.79	27.8	194.4
2.65	4.55	11.7	81.9	3.317	10.98	28.3	198
2.667	4.64	12	83.6	3.333	11.19	28.8	201.6
2.683	4.74	12.2	85.2	3.35	11.39	29.3	205.2
2.7	4.84	12.5	87.2	3.367	11.59	29.8	208.9
2.717	4.95	12.8	89.2	3.383	11.79	30.4	212.5
2.733	5.07	13.1	91.4	3.4	12	30.9	216.2
2.75	5.2	13.4	93.6	3.417	12.2	31.4	219.9
2.767	5.33	13.7	95.9	3.433	12.41	31.9	223.6
2.783	5.46	14.1	98.3	3.45	12.62	32.5	227.4
2.8	5.59	14.4	100.8	3.467	12.83	33	231.2
2.817	5.73	14.8	103.3	3.483	13.03	33.6	234.9
2.833	5.88	15.1	105.8	3.5	13.25	34.1	238.7
2.85	6.02	15.5	108.5	3.517	13.46	34.6	242.5
2.867	6.17	15.9	111.2	3.533	13.67	35.2	246.3
2.883	6.32	16.3	113.9	3.55	13.88	35.7	250.2
2.9	6.48	16.7	116.7	3.567	14.09	36.3	254
2.917	6.63	17.1	119.5	3.583	14.31	36.8	257.9

Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol²)	Área Aberta (%)	Cv	Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol²)	Área Aberta (%)	Cv
3.6	14.52	37.4	261.8	4.317	24.1	62.1	434.4
3.617	14.74	37.9	265.7	4.333	24.32	62.6	438.4
3.633	14.96	38.5	269.6	4.35	24.55	63.2	442.4
3.65	15.17	39.1	273.5	4.367	24.77	63.8	446.4
3.667	15.39	39.6	277.4	4.383	24.99	64.3	450.4
3.683	15.61	40.2	281.3	4.4	25.21	64.9	454.4
3.7	15.83	40.8	285.3	4.417	25.43	65.5	458.4
3.717	16.05	41.3	289.2	4.433	25.65	66	462.4
3.733	16.27	41.9	293.2	4.45	25.87	66.6	466.3
3.75	16.49	42.4	297.1	4.467	26.09	67.2	470.3
3.767	16.71	43	301.1	4.483	26.31	67.7	474.2
3.783	16.93	43.6	305.1	4.5	26.53	68.3	478.2
3.8	17.15	44.2	309.1	4.517	26.75	68.9	482.1
3.817	17.37	44.7	313.1	4.533	26.97	69.4	486
3.833	17.59	45.3	317.1	4.55	27.18	70	489.9
3.85	17.82	45.9	321.1	4.567	27.4	70.5	493.8
3.867	18.04	46.4	325.2	4.583	27.61	71.1	497.7
3.883	18.26	47	329.2	4.6	27.83	71.6	501.6
3.9	18.49	47.6	333.2	4.617	28.04	72.2	505.4
3.917	18.71	48.2	337.2	4.633	28.26	72.7	509.3
3.933	18.94	48.8	341.3	4.65	28.47	73.3	513.1
3.95	19.16	49.3	345.3	4.667	28.68	73.8	516.9
3.967	19.38	49.9	349.4	4.683	28.89	74.4	520.7
3.983	19.61	50.5	353.4	4.7	29.1	74.9	524.5
4	19.83	51.1	357.5	4.717	29.31	75.5	528.3
4.017	20.06	51.6	361.5	4.733	29.52	76	532
4.033	20.28	52.2	365.6	4.75	29.72	76.5	535.7
4.05	20.51	52.8	369.6	4.767	29.93	77.1	539.5
4.067	20.73	53.4	373.7	4.783	30.14	77.6	543.2
4.083	20.96	54	377.7	4.8	30.34	78.1	546.8
4.1	21.18	54.5	381.8	4.817	30.54	78.6	550.5
4.117	21.41	55.1	385.9	4.833	30.75	79.2	554.2
4.133	21.63	55.7	389.9	4.85	30.95	79.7	557.8
4.15	21.86	56.3	394	4.867	31.15	80.2	561.4
4.167	22.08	56.9	398	4.883	31.35	80.7	565
4.183	22.31	57.4	402.1	4.9	31.54	81.2	568.5
4.2	22.53	58	406.1	4.917	31.74	81.7	572.1
4.217	22.76	58.6	410.2	4.933	31.94	82.2	575.6
4.233	22.98	59.2	414.2	4.95	32.13	82.7	579.1
4.25	23.21	59.7	418.3	4.967	32.32	83.2	582.5
4.267	23.43	60.3	422.3	4.983	32.51	83.7	586
4.283	23.65	60.9	426.3	5	32.7	84.2	589.4
4.3	23.88	61.5	430.4	5.017	32.89	84.7	592.8

Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol²)	Área Aberta (%)	Cv	Movimento da Haste (pol)	Área Aberta (pol²)	Área Aberta (%)	Cv
5.033	33.08	85.2	596.2	5.417	36.86	94.9	664.3
5.05	33.26	85.6	599.5	5.433	36.99	95.2	666.8
5.067	33.45	86.1	602.8	5.45	37.13	95.6	669.2
5.083	33.63	86.6	606.1	5.467	37.26	95.9	671.5
5.1	33.81	87	609.3	5.483	37.38	96.3	673.8
5.117	33.99	87.5	612.6	5.5	37.51	96.6	676
5.133	34.16	88	615.8	5.517	37.63	96.9	678.2
5.15	34.34	88.4	618.9	5.533	37.75	97.2	680.3
5.167	34.51	88.9	622	5.55	37.86	97.5	682.4
5.183	34.68	89.3	625.1	5.567	37.97	97.8	684.3
5.2	34.85	89.7	628.2	5.583	38.07	98	686.2
5.217	35.02	90.2	631.2	5.6	38.18	98.3	688
5.233	35.19	90.6	634.2	5.617	38.28	98.5	689.7
5.25	35.35	91	637.2	5.633	38.37	98.8	691.4
5.267	35.51	91.4	640.1	5.65	38.46	99	692.9
5.283	35.67	91.8	642.9	5.667	38.54	99.2	694.4
5.3	35.83	92.2	645.8	5.683	38.61	99.4	695.7
5.317	35.98	92.6	648.5	5.7	38.68	99.5	696.9
5.333	36.14	93	651.3	5.717	38.74	99.7	698
5.35	36.29	93.4	654	5.733	38.79	99.8	698.9
5.367	36.43	93.8	656.6	5.75	38.83	99.9	699.7
5.383	36.58	94.2	659.3	5.767	38.86	99.9	699.9
5.4	36.72	94.5	661.8	5.783	38.86	100.0	700.0