

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Bruno Novais Fuzeto de Oliveira

**Desenvolvimento de um Programa para Dimensionamento de Válvulas de
Controle**

São Carlos

2025

Bruno Novais Fuzeto de Oliveira

Desenvolvimento de um Programa para Dimensionamento de Válvulas de Controle

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

Orientador: Prof. Dr. Luben Cabezas Gómez

São Carlos

2025

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

048d Oliveira, Bruno Novais Fuzeto de
 Desenvolvimento de um Programa para Dimensionamento
 de Válvulas de Controle / Bruno Novais Fuzeto de
 Oliveira; orientador Luben Cabezas Gomes. São Carlos,
 2025.

 Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2025.

 1. Válvulas de Controle. 2. Dimensionamento de
 Válvulas. 3. Software de Dimensionamento. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Bruno Novais Fuzeto de Oliveira

Título: Desenvolvimento de um Programa para Dimensionamento de Válvulas de Controle

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luben Cabezas Gómez,
SEM, EESC-USP (orientador)

Nota atribuída: 8,5 (Oito pontos e meio)

MSc. Edilson Guimarães de Souza,
SEM, EESC-USP

Nota atribuída: 8,5 (Oito pontos e meio)

Dr. Alex Roger Almeida Colmanetti,
SEM, EESC-USP

Nota atribuída: 8,5 (Oito pontos e meio)

Média: 8,5 (Oito pontos e meio)

Resultado: Aprovado

Data: 30/09/2025.

Luben Cabezas Gómez

Assinatura do Presidente da Banca

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

SIM ☒ NÃO ☐ Visto do orientador: Luben Cabezas Gómez

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, dedico este agradecimento aos meus pais Vanderlei e Solange. O apoio de vocês foi a base sólida que me permitiu trilhar este caminho. A confiança, a paciência e os incontáveis sacrifícios que fizeram para que eu pudesse me dedicar aos estudos foram fundamentais. Vocês me ensinaram o valor da persistência e me deram a força para seguir em frente, mesmo diante dos desafios mais difíceis. Esta conquista é tanto minha quanto de vocês.

Ao meu irmão Lucas, agradeço por cada momento de alegria e por cada risada compartilhada. Sua presença e o companheirismo ao longo de toda a minha vida foram um alívio e uma fonte de inspiração, servindo como o contraponto perfeito à seriedade do percurso acadêmico.

Por fim, agradeço imensamente ao professor Luben, meu orientador. Sua orientação foi crucial para a realização deste trabalho. Sua paciência, sua colaboração e a constante disponibilidade para me auxiliar, especialmente nos momentos de maior dificuldade, foram essenciais. Sua experiência e dedicação foram faróis que me guiaram para a conclusão deste projeto. Por isso, sinto uma profunda gratidão.

“A simplicidade é o último grau de sofisticação.”
(Leonardo da Vinci)

RESUMO

OLIVEIRA, B. P. **Desenvolvimento de um Programa para Dimensionamento de Válvulas de Controle**. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

O dimensionamento de válvulas de controle é um aspecto de muita importância para plantas industriais, a sua correta seleção é essencial para o funcionamento da malha de controle de processo para alcançar produtos de maior qualidade, reduzindo custos operacionais. Este trabalho tem como objetivo a elaboração de um programa de dimensionamento de válvulas de controle baseado em um procedimento normativo para o cálculo do coeficiente de vazão. O trabalho contextualiza as principais válvulas utilizadas na indústria, em especial as válvulas de controle, abordando seus principais componentes e tipos encontrados no mercado. O trabalho também explora as diferentes características de fluxo, que refletem o comportamento da vazão de acordo com o curso de fechamento e abertura da válvula, e uma contextualização teórica quanto ao desenvolvimento do coeficiente de vazão, tanto para fluidos incompressíveis quanto para os compressíveis, analisando os diferentes comportamentos que podem ocorrer com o fluxo no interior da válvula. A metodologia de desenvolvimento seguiu o procedimento normativo, utilizando as diferentes equações necessárias para o cálculo dos coeficientes físicos e operacionais, e o comportamento do fluido nas condições analisadas, resultando no coeficiente de vazão do processo. O programa, elaborado na linguagem Python, inclui as equações da norma e os coeficientes necessários para os cálculos baseados no tipo de válvula escolhida, além de uma biblioteca de cálculo de propriedades termodinâmicas, que auxiliam em um resultado mais rápido e preciso. A comprovação dos resultados foi realizada analisando exemplos de cálculos presentes na norma, a fim de verificar se o procedimento adotado foi corretamente inserido na programação. A análise dos resultados comprovou a precisão da metodologia e a utilização do programa para dimensionamento de válvulas de controle, mesmo que não apresente uma solução exata, devido às limitações de considerar coeficientes aproximados para os cálculos.

Palavras-chave: Válvulas de Controle. Dimensionamento de Válvulas. Software de Dimensionamento.

ABSTRACT

OLIVEIRA, B. **Development of a Program for Sizing Control Valves**. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

The sizing of control valves is an important aspect for industrial plants, as their correct selection is essential for the proper functioning of the process control loop to achieve higher quality products, reducing operational costs. This work aims to develop a control valve sizing program based on a normative procedure for calculating the flow coefficient. The work contextualizes the main valves used in the industry, especially control valves, addressing their main components and types found in the market. The work also explores the different flow characteristics, which reflect the behavior of the flow according to the closing and opening stroke of the valve, and a theoretical contextualization regarding the development of the flow coefficient, both for incompressible and compressible fluids, analyzing the different behaviors that can occur with the flow inside the valve. The development methodology followed a normative procedure, using the different equations necessary for calculating the physical and operational coefficients, and the fluid behavior under the analyzed conditions, resulting in the process flow coefficient. The program, developed in the Python language, includes the standard's equations and the necessary coefficients for the calculations based on the chosen valve type, in addition to a library for calculating thermodynamic properties, which assists in a faster and more accurate result. The proof of the results was carried out by analyzing calculation examples present in the standard, in order to verify whether the adopted procedure was correctly inserted in the programming. The analysis of the results proved the accuracy of the methodology and the usability of the program for sizing control valves, even if it does not present an exact solution, due to the limitations of considering approximate coefficients for the calculations.

Keywords: Control Valve. Valve Sizing. Sizing software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Válvula Gaveta.....	21
Figura 2 – Válvula de retenção de Portinhola.....	22
Figura 3 – Válvula de Segurança e Alívio.....	23
Figura 4 – Válvula Globo Manual.....	24
Figura 5 – Componentes de uma Válvula de Controle.....	25
Figura 6 – Válvulas Globo sede simples e sede dupla contorno.....	26
Figura 7 – Válvulas Esfera e Borboleta.....	26
Figura 8 – Características de Fluxo.....	27
Figura 9 – Escoamento interno através de um bocal.....	29
Figura 10 – Constantes numéricas para o dimensionamento.....	44
Figura 11 – Fatores em função da válvula escolhida.....	45
Figura 12 – Cálculo do Fator do número de Reynolds.....	45
Figura 13 – Cálculo dos Fatores F_p , FLP e x_{TP}	46
Figura 14 – Função para o cálculo de fluidos incompressíveis.....	47
Figura 15 – Função para o cálculo de fluidos compressíveis.....	48
Figura 16 – Resultados do programa exemplo 1, cálculo coeficiente de vazão.....	50
Figura 17 – Resultados do programa exemplo 2, cálculo coeficiente de vazão.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores em função do tipo de válvulas.....	33
Tabela 2 – Constantes numéricas para as equações de dimensionamento.....	34
Tabela 3 – Propriedades para o dimensionamento de fluidos incompressíveis.....	35
Tabela 4 – Propriedades para o dimensionamento de fluidos compressíveis.....	41
Tabela 5 – Exemplo 1, cálculo coeficiente de vazão.....	49
Tabela 6 – Exemplo 2, cálculo coeficiente de vazão.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ISA	International Society of Automation
IEC	International Electrotechnical Commission
ASME	American Society of Mechanical Engineers
IDE	Integrated Development Environment

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Coeficiente de vazão genérico
C_i	Coeficiente de vazão genérico calculado da iteração
C_v	Coeficiente de vazão em unidades inglesas
K_v	Coeficiente de vazão em unidades métricas
A_v	Coeficiente de vazão em unidades do sistema internacional
C_d	Coeficiente de descarga
A_t	Área da tubulação do medidor de vazão
d	Diâmetro da válvula
D_1	Diâmetro da tubulação de entrada da válvula
D_2	Diâmetro da tubulação de saída da válvula
β	Razão de diâmetros medidor de vazão
ξ	Coeficiente de perda de carga da tubulação
γ	Razão dos calores específicos
ρ	Densidade do fluido
ρ_1	Densidade do fluido na entrada da válvula
ν	Viscosidade cinemática
G	Densidade relativa à água
M	Massa molecular do fluido
P_1	Pressão estática na entrada da válvula
P_2	Pressão estática na saída da válvula
P_c	Pressão crítica do fluido

P_v	Pressão de vaporização do líquido
ΔP	Diferencial de pressão
Q	Vazão volumétrica
Q_{real}	Vazão volumétrica real
T_1	Temperatura na entrada da válvula
Y	Fator de expansão do gás
Z	Fator de compressibilidade
Re_v	Número de Reynolds da válvula
F_d	Fator modificador de estilo da válvula
F_F	Fator da razão crítica de pressão do líquido
F_p	Fator de geometria da tubulação
F_L	Fator de recuperação de pressão do líquido
F_{LP}	Fator de recuperação com conexões acopladas
F_R	Fator do número de Reynolds
F_γ	Fator da razão calores específicos
x	Razão do diferencial de pressão com a pressão de entrada
x_T	Razão diferencial de pressão do curso nominal da válvula
x_{TP}	Razão diferencial de pressão do curso nominal com conexões acopladas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1. Objetivos.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Tipos de Válvulas Industriais.....	21
2.1.1 Válvula de Bloqueio.....	21
2.1.2 Válvula de Retenção.....	22
2.1.3 Válvulas de Alívio de Pressão.....	22
2.1.4 Válvulas de Regulagem.....	23
2.2 Válvula de Controle.....	24
2.3 Características de Fluxo.....	26
2.4 Escoamento de fluidos incompressíveis.....	28
2.5 Escoamento de fluidos compressíveis.....	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 Procedimento de cálculo do coeficiente de vazão.....	32
3.1.1 Equações de dimensionamento para fluidos incompressíveis.....	35
3.1.2 Equações de dimensionamento para fluidos compressíveis.....	41
3.2 Programa de Dimensionamento.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:.....	49
5. CONCLUSÃO.....	52

1. INTRODUÇÃO

As plantas industriais modernas buscam cada vez mais aprimorar o desempenho de sistemas para se obter um produto final de melhor qualidade, reduzindo também o custo de operação. Por este motivo, os sistemas de malhas de controle ganham cada vez mais espaço dentro da indústria, tanto por automatizar processos, quanto para controlar as condições necessárias para se alcançar um ideal de operação, ajustando as variáveis de controle durante o funcionamento do processo.

Muitas destas malhas de controle envolvem o controle de dosagem de processos químicos, a disponibilidade de vapor para fornecimento de trocadores, o controle de níveis reservatórios, entre outros. Em todos os tipos de malha de controle citados acima, geralmente o elemento final é uma válvula de controle, que possibilita a regulação do fluido que passa por ela, e assim, modificando as variáveis de processo relacionadas ao fluido controlado (MATHIAS, 2008).

As válvulas são um dos equipamentos mais importantes para a tubulação, o custo da compra de válvulas representa aproximadamente 5% do custo total de uma indústria química (RIBEIRO, 1999). As válvulas de controle se destacam por serem capazes de realizar um controle contínuo do processo, funcionando em conjunto com os componentes restantes de uma malha de controle.

A correta seleção de uma válvula de controle está diretamente relacionada em uma melhor estabilidade e repetibilidade do processo, por isso, deve-se ter muito cuidado na seleção destas válvulas. Selecionar uma válvula superdimensionada, aumenta os custos de compra além de comprometer a estabilidade de controle, uma válvula subdimensionada, pode não suportar as condições de fluxo que passa por ela, impossibilitando assim qualquer controle do processo.

1.1. Objetivos

Diante disso, este trabalho tem como objetivo apresentar uma solução para o dimensionamento de válvulas de controle, por meio da elaboração de um programa de computador. A elaboração do programa baseou-se em um procedimento normativo, que calcula o coeficiente de vazão do processo, que é uma das variáveis principais para a seleção da válvula de controle.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

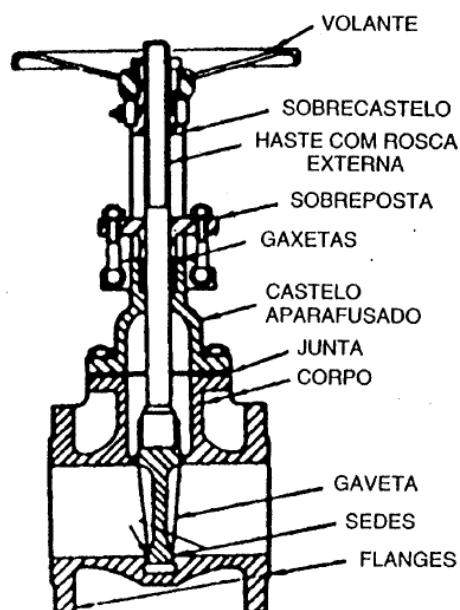
2.1 Tipos de Válvulas Industriais

Válvulas são componentes de tubulações que têm o objetivo de controlar o fluxo de fluido que passa por elas, podendo apenas bloquear ou liberar a passagem, e até regular a quantidade de passagem dele. (SILVA TELLES, 2001). As válvulas podem ser destinadas a diversas aplicações e funções, como as principais sendo para bloqueio, retenção, regulação de fluxo e alívio de pressão. Neste trabalho, será feita uma ênfase maior em válvulas de controle, porém neste espaço será feito um breve resumo das principais funcionalidades de válvulas industriais.

2.1.1 Válvula de Bloqueio

As válvulas que desempenham a função de bloqueio tem como finalidade apenas permitir ou não a passagem de fluidos, influenciando o mínimo possível das condições físicas dele. Um dos requisitos mais importantes destas válvulas é ter uma capacidade elevada, ou seja, ter a menor perda de carga quando aberta (FLUID CONTROLS 2024). Os principais tipos de válvulas utilizadas para a finalidade de bloqueio são a válvula gaveta, a válvula macho, a válvula de esfera e a válvula borboleta.

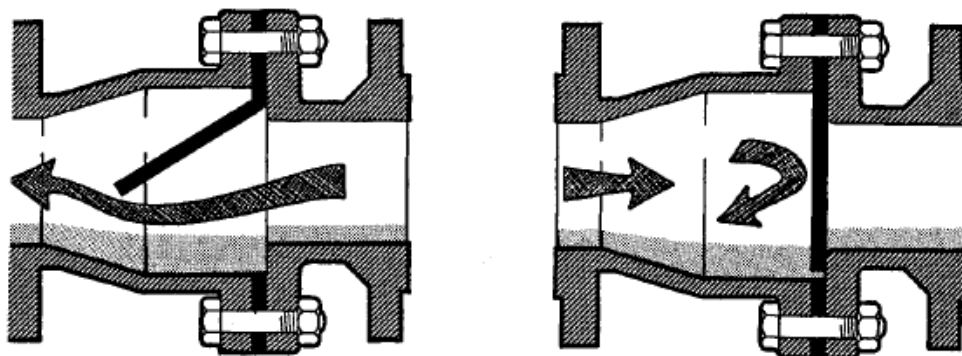
Figura 1 – Válvula Gaveta



Fonte: SILVA TELLES, 2001

2.1.2 Válvula de Retenção

Figura 2 – Válvula de retenção de Portinhola



Fonte: SMITH; ZAPPE, 2004

Válvulas de retenção tem como finalidade proteger os outros componentes do sistema contra o retorno indesejável de fluido, alguns equipamentos como bombas e compressores podem sofrer muito com a reversão de fluxo por conta da disposição de seus componentes internos. Esta funcionalidade é muito importante para reduzir os custos de manutenção de equipamentos e da tubulação em geral (SMITH; ZAPPE, 2004). Os principais tipos de válvulas de retenção são as válvulas de retenção de portinhola, de pistão, de esfera e válvulas pé.

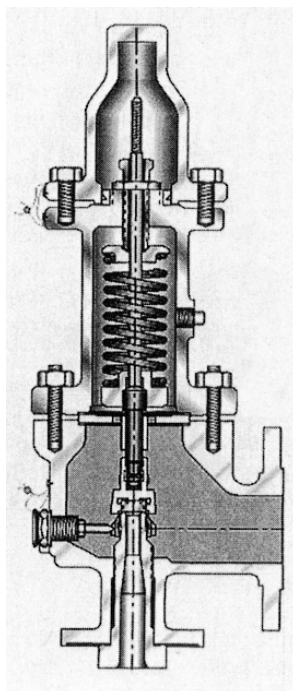
2.1.3 Válvulas de Alívio de Pressão

Válvulas de alívio de pressão possuem a finalidade de abrir quando a pressão interna do fluido for igual a uma pressão ajustada, e continuarem abertas até que seja alcançado um valor de pressão aceitável para o sistema. Esta funcionalidade também se enquadra para válvulas de segurança, que para a aplicação de gases, são obrigatórias para uso em vasos de pressão e em caldeiras de vapor, sendo por muitos casos o último meio de segurança destes sistemas contra uma falha catastrófica (EMERSON, 2012). O projeto de válvulas de segurança e alívio deve cumprir os requisitos normativos dos equipamentos nos quais elas serão instaladas, para vasos de pressão a válvula deve seguir a ASME VIII, e para caldeiras de vapor a ASME I.

Existem três tipos principais de válvulas de alívio de pressão. A válvula de segurança é caracterizada por uma abertura e fechamento rápido (pop), sendo normalmente utilizada

para fluidos compressíveis. A válvula de alívio possui uma abertura e fechamento mais gradual de acordo com o aumento da sobrepressão, sendo utilizadas para fluidos incompressíveis. E por fim existe a válvula de segurança e alívio, que pode desempenhar um papel tanto de alívio quanto de segurança.

Figura 3 – Válvula de Segurança e Alívio



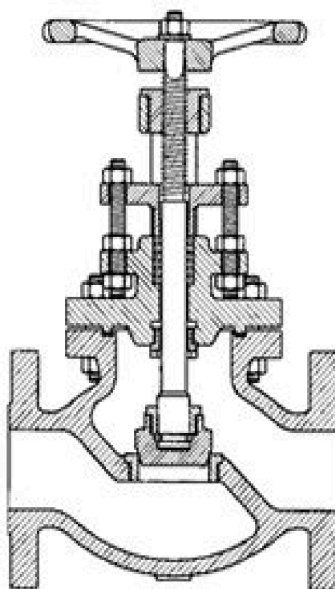
Fonte: SMITH; ZAPPE, 2004

2.1.4 Válvulas de Regulagem

As válvulas que desempenham o papel de regulagem são projetadas para trabalhar causando uma restrição controlada do fluido, isto é, causando uma perda de carga intencional, que altera a passagem de fluido por ela (FLUID CONTROLS, 2024). Estas válvulas podem ser definidas a partir do seu acionamento, podendo ter um acionamento manual, utilizando a própria energia do fluido, como as válvulas auto atuadas, e com um acionamento externo, a última normalmente é referenciada como válvula de controle.

Como uma válvula de controle pode ser considerada uma válvula de regulagem, as equações de vazão se aplicam igualmente a uma válvula manual por exemplo, porém existem enfoques diferentes no projeto das duas válvulas (RIBEIRO, 1999). Os principais tipos de válvulas utilizadas para regulagem são a válvula globo, a válvula esfera e a válvula borboleta.

Figura 4 – Válvula Globo Manual



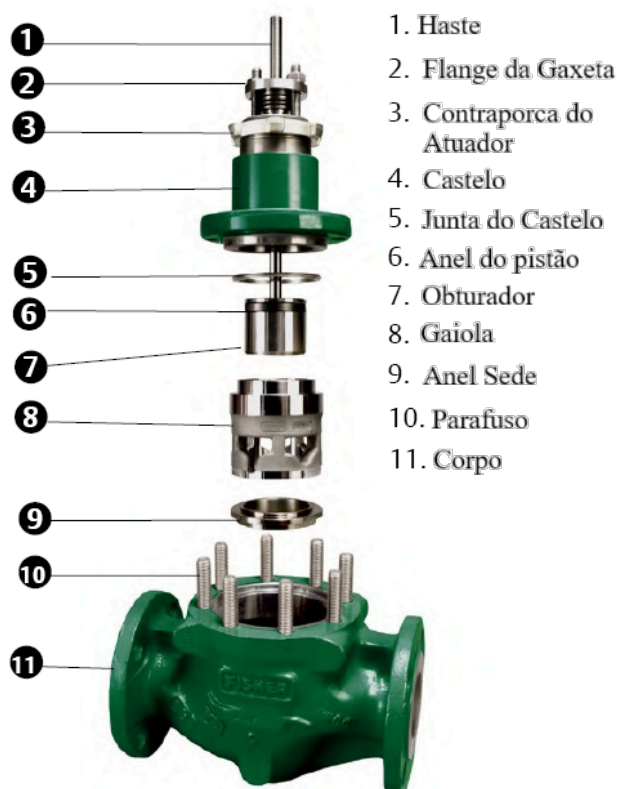
Fonte: FLUID CONTROLS, 2024

2.2 Válvula de Controle

A válvula de controle é uma válvula cujo seu papel é ser, por muitas vezes, o elemento final de uma malha de controle, podendo assim atuar de forma direta no processo para manter a variável de controle regulada, com o valor mais perto do nível ideal de ajuste (EMERSON, 2023). Em uma operação contínua, em que a válvula trabalha com uma posição intermediária, ela precisa ter estabilidade, pouca histerese, além de ser capaz de absorver instabilidades geradas pelo próprio fluido a partir de alterações da variável de controle (RIBEIRO, 1999).

Na figura abaixo é possível analisar as principais partes de uma válvula de controle, dentre elas, podemos destacar alguns elementos. A sede, ou no caso da figura o anel sede, é a superfície de contato do obturador que possibilita o fechamento da válvula. O obturador ou plug, é o elemento utilizado para fazer o fechamento da válvula. A haste é o elemento que conecta o atuador da válvula ao obturador, fazendo o movimento de abertura e fechamento da válvula. O corpo é o elemento que suporta o fluido, além de permitir que a válvula se conecte na tubulação. Estes elementos combinados modificam o comportamento do fluido que passa pela válvula, a combinação destes componentes recebe o nome de trim (EMERSON, 2023).

Figura 5 – Componentes de uma Válvula de Controle

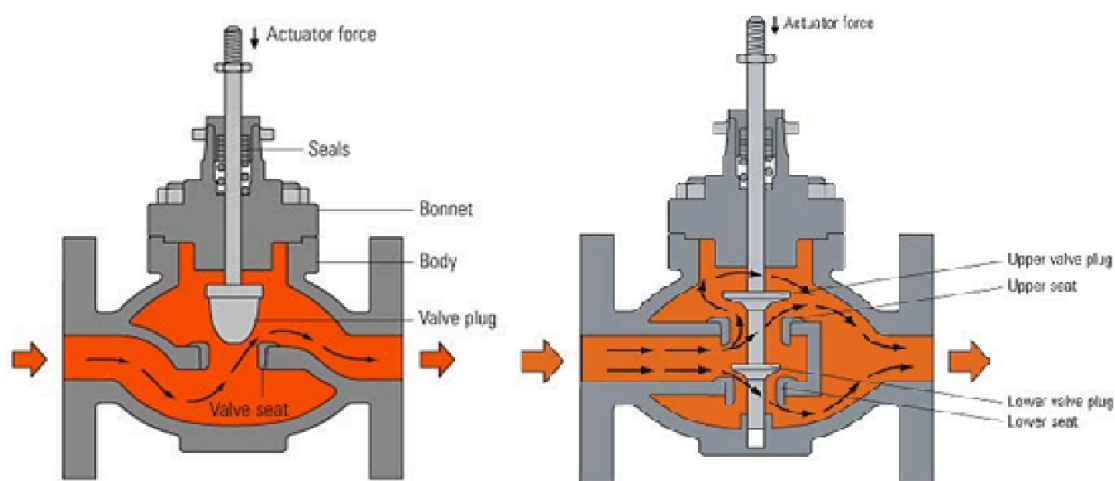


Fonte: Adaptado de EMERSON, 2023

As válvulas de controle podem ser separadas a partir do movimento do seu obturador, podendo ser do tipo linear ou rotativo. As principais válvulas de movimento linear são as válvulas globo sede simples com contorno, em V ou gaiola; globo sede dupla contorno ou em V e a globo angular (MATHIAS, 2008). Estas válvulas apresentam menores valores de coeficiente de vazão em comparação com as válvulas de movimento rotativo quando totalmente abertas, mas esta característica é muito procurada quando é necessário um controle de processo mais refinado e preciso.

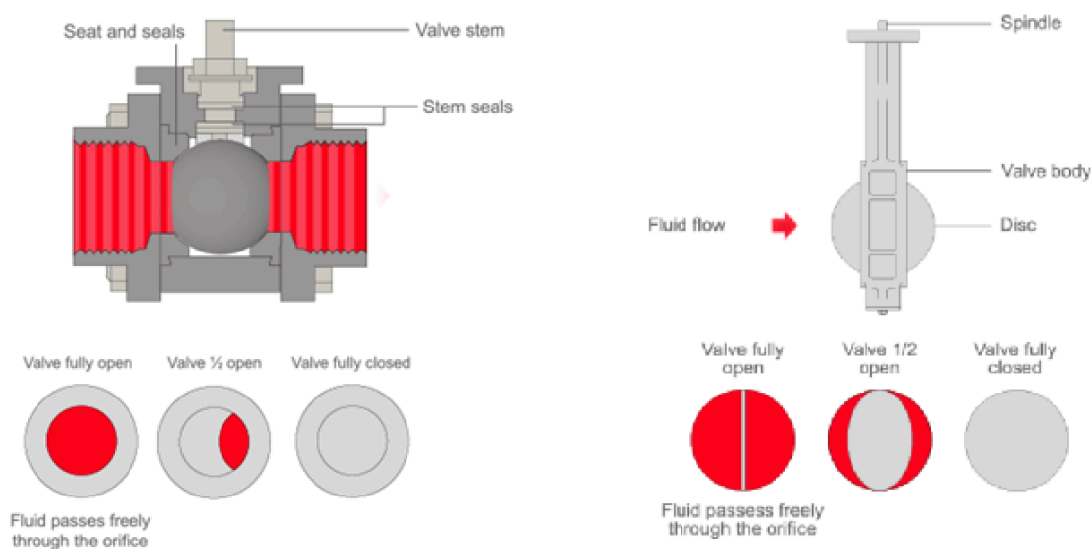
As principais válvulas de obturador rotativo são as válvulas de esfera e a borboleta, elas são conhecidas por mudar sua posição de aberta para fechada, com um movimento de apenas um quarto de volta de seu atuador (MATHIAS, 2008). A válvula esfera recebe este nome por conta do formato esférico de seu obturador, no qual o fluxo passa em seu interior quando a válvula se encontra na posição aberta. A válvula borboleta possui um corpo muito compacto, e um obturador em formato de disco, que pode ter um eixo de rotação no seu centro, sendo do tipo central, ou com o eixo deslocado da posição central, sendo do tipo excêntrico.

Figura 6 – Válvulas Globo sede simples e sede dupla contorno



Fonte: Adaptado de CLASSIFICATION, 2022

Figura 7 – Válvulas Esfera e Borboleta



Fonte: Adaptado de SPIRAX SARCO, 2025

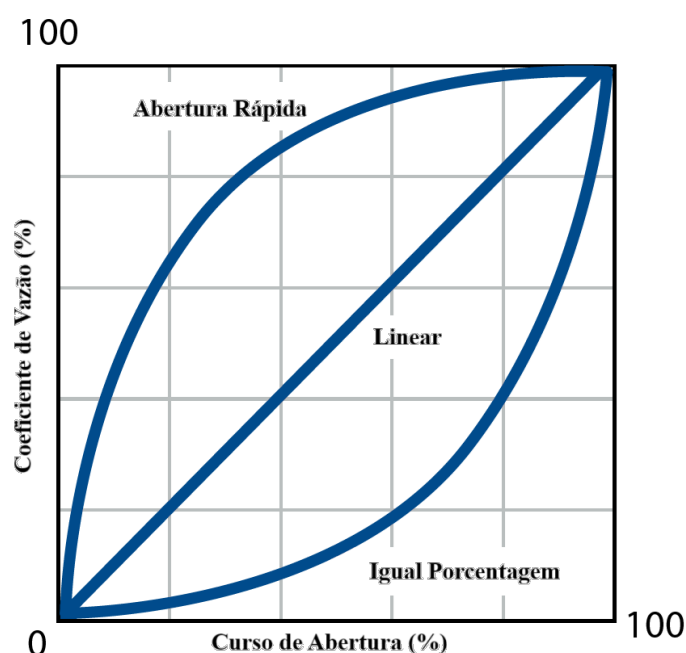
2.3 Características de Fluxo

Os diferentes formatos dos corpos das válvulas, e as diferentes combinações de fechamento entre o obturador e a sede, modificam como a válvula controla o fluxo de fluido que passa por ela. Uma simples modificação da geometria do obturador da válvula globo, pode favorecê-la para algumas aplicações onde é preciso um controle mais preciso ou mais

rápido do processo. Por isso, na escolha de uma válvula de controle é necessário prestar atenção em sua característica de fluxo.

A característica de fluxo de uma válvula de controle é a relação entre o curso de abertura da válvula com a vazão que passa por ela, ou também, na modificação do seu coeficiente de vazão. Existem dois tipos de características de fluxo, a inerente e a instalada (EMERSON, 2023). A característica inerente é a característica que pode ser observada quando a queda de pressão permanece constante na válvula, a característica instalada é observada nas condições de funcionamento da válvula durante o processo. As principais características de vazão inerente são a abertura rápida, linear e igual porcentagem, mostradas na figura 8.

Figura 8 – Características de Fluxo



Fonte: Adaptado de EMERSON, 2023

A característica de abertura rápida produz uma grande vazão logo em pequenas taxas de abertura, tendo uma curva quase linear no início do curso de abertura do obturador. Esta abertura é ideal para controle de processos do tipo liga e desliga, controle sequencial ou por batelada, mas não é recomendada para processos de controle contínuo (RIBEIRO, 1999).

A característica de tipo linear é aquela que a vazão que passa pela válvula é proporcional ao seu curso de abertura em toda a sua faixa. Esta característica é normalmente recomendada para o controle de nível de líquido e para aplicações de controle que exigem um ganho constante da válvula (EMERSON, 2023).

A característica do tipo igual porcentagem determina que mudanças absolutas iguais do curso do obturador provocam alterações de igual porcentagem relativas à vazão existente, esta variação é guiada pela sua rangebilidade. Esta característica é recomendada para aplicações que absorvem grande parte da queda de pressão, ou quando ela é variada, além de processos com variações no consumo de fluido (MATHIAS, 2008). Esta característica é a mais comum para válvulas de controle.

Para resumir a escolha das características de fluxo, para que a válvula desempenhe um controle mais preciso, é necessário selecionar uma característica de fluxo instalada do tipo linear, realizando uma análise completa da dinâmica do processo e da malha de controle (EMERSON, 2023).

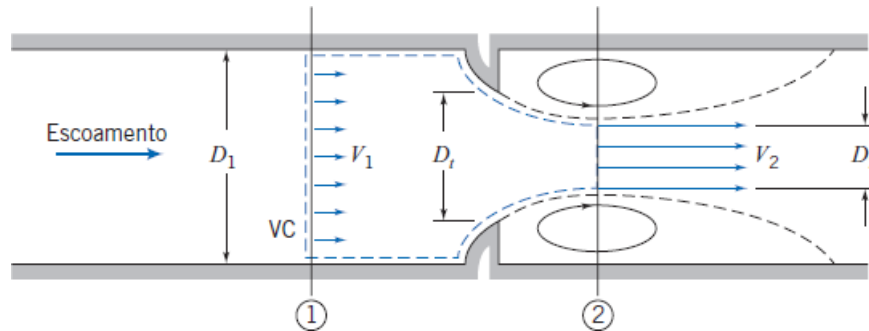
Introduzindo o conceito de coeficiente de vazão, ou coeficiente de fluxo, ele pode ser explicado como um número que reflete a capacidade de uma válvula, quanto maior o seu valor, maior é a quantidade de fluido que a válvula consegue fornecer com uma queda de pressão constante. Para o dimensionamento de uma válvula de controle, é calculado o coeficiente de fluxo necessário para a válvula entregar a vazão requerida de acordo com as condições de processo (MATHIAS, 2008). No tópico a seguir, será desenvolvido com mais detalhes o equacionamento do coeficiente de vazão.

2.4 Escoamento de fluidos incompressíveis.

A modelagem mais convencional aplicada para fluidos incompressíveis, é a equação de Bernoulli, considerando o movimento do fluido seguindo uma linha de corrente, e aplicando as hipóteses de um fluido invíscido e incompressível. As mudanças naturais de direção que acontecem no interior das válvulas, por conta de sua geometria, podem gerar perdas da energia presente no fluxo, devido a separação do escoamento (HIBBELER, 2016).

O mesmo caso acontece para medidores de vazão de restrição no escoamento, mostrado na figura 9. Seguindo a linha de corrente, o fluxo passa por uma redução de área que causa um aumento de sua velocidade, até uma região de área mínima no qual o bocal se abre formando uma área ainda menor de escoamento, conhecida como *vena contracta* (FOX et al., 2014). Após a passagem pelo bocal, existe muita recirculação do fluido devido a separação do escoamento, mas este comportamento é intencional, porque a diferença de pressão causada pela perda de carga é utilizada para calcular a vazão ou a velocidade do escoamento.

Figura 9 – Escoamento interno através de um bocal



Fonte: FOX et al., 2014

Para encontrar a vazão volumétrica do escoamento de um medidor de vazão, é utilizado o coeficiente de descarga, mostrado na equação (1). Sendo β a razão dos diâmetros do ponto 1 e do ponto 2 da figura 9, C_d o coeficiente de descarga, A_t a área da tubulação, ρ a densidade do líquido, P_1 a pressão no ponto 1, P_2 a pressão no ponto 2 e Q_{real} a vazão volumétrica do líquido. O valor do coeficiente de descarga é a razão da vazão teórica, calculada pela equação de Bernoulli sem perda de carga, com a vazão real do fluxo.

$$Q_{real} = C_d A_t \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)/\rho}{1 - \beta^4}} \quad (1)$$

Para o caso do dimensionamento de válvulas de controle, o coeficiente de descarga não é tão utilizado quanto o coeficiente de vazão, isto se dá pela padronização de dimensionamento incorporada pelas associações normativas, como a ISA e IEC (SMITH; ZAPPE, 2004). O mesmo não se aplica para o dimensionamento de válvulas de segurança, que seguem utilizando o coeficiente de descarga para o dimensionamento da área de descarga necessária.

O coeficiente de vazão, ou coeficiente de fluxo, foi desenvolvido no século XX, e desde então vem sendo utilizado para o dimensionamento de válvulas de controle, calculando o coeficiente de vazão requerido pelo processo e assim escolhendo a válvula adequada pelo seu coeficiente fornecido pelo fabricante (MATHIAS, 2008). Diferente do coeficiente de descarga, o coeficiente de vazão não é um adimensional, ele é definido dependendo das condições de fluxo.

Os três coeficientes de vazão mais conhecidos são o C_v , o K_v e o A_v . O C_v é definido como sendo a vazão de água a 60°F com um diferencial de pressão de 1, sendo as unidades de vazão em galões por minuto e de pressão em psi. O K_v , que seria a versão do coeficiente de vazão europeia, é definido da mesma forma, porém com as unidades em m³/h e em bar como referência. Já o A_v seria a versão em coerência com as unidades do SI (SMITH; ZAPPE,

2004). As equações (2), (3) e (4) mostram o cálculo destes coeficientes, sendo G a densidade relativa, Q a vazão volumétrica e ΔP o diferencial de pressão.

$$C_v = Q[gpm] \sqrt{\frac{G}{\Delta P[psi]}} \quad (2)$$

$$K_v = Q[m^3/h] \sqrt{\frac{G}{\Delta P[bar]}} \quad (3)$$

$$A_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (4)$$

Os coeficientes de vazão são definidos para o regime de escoamento turbulento, que é caracterizado pelo domínio de forças inerciais em comparação com as forças viscosas do líquido. Para escoamento turbulento, o fator de atrito, utilizado para calcular a perda de carga, se torna aproximadamente constante (ÇENGEL; BOLES, 2013). Por este motivo, quando se calcula o coeficiente de vazão do processo sobre uma válvula, não é preciso corrigir o valor calculado quando o número de Reynolds é elevado.

Se a queda de pressão através de uma válvula for maior do que um valor crítico, pode ocorrer os fenômenos de cavitação ou *flashing*, que acontecem quando a pressão no interior da válvula está próxima do valor da pressão de vaporização do líquido, gerando sua ebulição, formando de bolhas (HIBBELER, 2016). Se na recuperação de pressão da válvula, a pressão retornar a um valor maior do que a pressão de vaporização, as bolhas criadas se colapsam, causando o fenômeno de cavitação. Porém, se a recuperação de pressão não for o suficiente para elevar a pressão para um valor superior à pressão de vaporização do líquido, uma parte das bolhas permaneceram no sistema, este segundo fenômeno é conhecido como *flashing* (EMERSON, 2023).

Quando estes fenômenos acontecem no interior da válvula, a velocidade do líquido é limitada, a eficiência de operação diminui, é produzido ruído e vibração, e pode danificar os componentes internos da válvula ou de equipamentos a jusante (RIBEIRO, 1999). Por isso é recomendável evitar este regime de operação.

2.5 Escoamento de fluidos compressíveis.

O dimensionamento padronizado de válvulas de controle para fluidos compressíveis é baseado na formulação de fluidos incompressíveis, adotando coeficientes para adequar o comportamento do escoamento e para a utilização da vazão volumétrica normalizada ou a vazão mássica (MATHIAS, 2008). A vazão volumétrica normalizada pode ser calculada utilizando as condições da temperatura e pressão e de normalização, assim é feito o cálculo simplificado considerando a mesma massa de fluido que escoar nas condições do processo.

As normas apresentam diferentes equações para o cálculo do coeficiente de vazão do processo, muitas destas equações são apenas adequações de unidades utilizando o fator de compressibilidade em substituição da densidade do gás, ou utilizando a densidade relativa ao ar nas condições normais definidas.

Um dos fatores que devem ser utilizados para a equação de fluidos compressíveis, é o fator de expansão Y , este fator tem a finalidade de introduzir o comportamento da mudança de densidade que o fluido sofre enquanto ele percorre o interior da válvula, além também da mudança de área da *vena contracta* ao passo que a queda de pressão muda (DRESSER INDUSTRIES, 2000). Este fator é aproximado para quedas de pressão moderadas, por uma relação linear, considerando a razão de queda de pressão, a razão dos calores específicos e a geometria da válvula utilizada.

Um outro comportamento de fluidos compressíveis que precisa ser ponderado é o caso de fluxo bloqueado, este fenômeno acontece quando a velocidade do som é alcançada na secção de menor área no interior de uma válvula, limitando assim a sua vazão independente da diminuição da pressão a jusante da válvula. O mesmo caso acontece para bocais convergentes, onde a velocidade máxima alcançada na garganta é a velocidade do som (ÇENGEL; BOLES, 2013). Para adequar este comportamento no dimensionamento de fluidos compressíveis, é utilizado o fator da razão de calores específicos, ponderado por um fator de geometria da válvula.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho foi a criação de um programa de computador escrito na linguagem de programação Python, o programa tem o objetivo de possibilitar um cálculo rápido e preciso do coeficiente de vazão do processo, de acordo com um procedimento normalizado e padrão de mercado. Para facilitar o uso, foi adotada a biblioteca COOLPROP, para o cálculo de propriedades de fluidos comumente utilizados. Será também uma interface gráfica para facilitar e melhorar a experiência do usuário que venha a querer utilizar o programa.

Para a criação do programa foi necessário estabelecer um procedimento de cálculo que fosse padrão no mercado, utilizado pela maioria dos fabricantes. Foi escolhido o procedimento de dimensionamento descrito na norma ISA 75.01.01-2007. A norma adota um procedimento baseado no cálculo do coeficiente de fluxo que é requerido pelo processo. Com o cálculo deste coeficiente, é possível analisar se a válvula selecionada consegue entregar o coeficiente calculado, e assim confirmar o correto dimensionamento da válvula.

É preciso informar que, a escolha da característica de fluxo correta para a válvula depende de muito estudo e cálculos que envolvem a malha de controle, então a escolha da característica de vazão não será feita pelo programa.

No tópico 3.1 é mostrado procedimento utilizado para o cálculo do coeficiente de vazão tanto para fluidos compressíveis quanto para incompressíveis. Já no tópico 3.2 é mostrado o procedimento de criação do programa.

3.1 Procedimento de cálculo do coeficiente de vazão

Para o cálculo do coeficiente de vazão requerido para o processo, utilizou-se as equações e o procedimento presentes na norma ISA-75.01.01-2007 (ISA, 2007), estas equações apresentam fatores físicos, da geometria e da configuração dos componentes internos da válvula, além de fatores de instalação, que afetam o fluxo que passa através da válvula. Com esta norma se pode calcular o coeficiente de vazão do processo, e assim, poder escolher a válvula adequada baseado no valor calculado.

O primeiro passo para iniciar o dimensionamento é escolher o tipo de válvula, o seu diâmetro (d), o tipo de trim, além da direção que o fluxo passa através da válvula. Estas variáveis serão necessárias para determinar os fatores utilizados para o dimensionamento, o

modificador do estilo da válvula (F_d), o fator de recuperação de pressão do líquido (F_L) e o fator da razão diferencial de pressão do curso nominal total (x_T). Os valores típicos destes fatores podem ser determinados pela tabela abaixo. A válvula tipo globo trim agulha cônica afilada de fluxo reduzido, não foi colocada na tabela por conta de seu fator modificador do estilo, depender do diâmetro de seu orifício.

Tabela 1 – Fatores em função do tipo de válvulas

Tipo da Válvula	Tipo de Trim	Direção do Fluxo	F_L	x_T	F_d
Globo sede simples	Obturador em V de 3 vias	Abre ou fecha	0,9	0,70	0,48
	Obturador em V de 4 vias	Abre ou fecha	0,9	0,70	0,41
	Obturador em V de 6 vias	Abre ou Fecha	0,9	0,70	0,30
	Obturador contornado (Linear e igual porcentagem)	Abre Fecha	0,9 0,8	0,72 0,55	0,46 1,00
	Gaiola perfurada, 60 furos de diâmetros iguais	Para fora da gaiola ou para dentro da gaiola	0,9	0,68	0,13
	Gaiola perfurada, 120 furos de diâmetros iguais	Para fora da gaiola ou para dentro da gaiola	0,9	0,68	0,09
	Gaiola caracterizada de 4 portas	Para fora da gaiola Para dentro da gaiola	0,9 0,85	0,75 0,70	0,41 0,41
Globo sede dupla	Obturador perfurado	Entra entre as sedes	0,9	0,75	0,28
	Obturador contornado	Em qualquer direção	0,85	0,70	0,32
Globo angular	Obturador contornado (Linear e igual porcentagem)	Abre Fecha	0,9 0,8	0,72 0,65	0,46 1,00
	Gaiola caracterizada de 4 portas	Para fora da gaiola Para dentro da gaiola	0,9 0,85	0,65 0,60	0,41 0,41
	Venturi	Fecha	0,5	0,20	1,00
Globo, trim de capacidade reduzida	Obturador com entalhe em V	Abre	0,98	0,84	0,70
	Sede plana (curso curto)	Fecha	0,85	0,70	0,30

Rotativa	Obturador esférico excêntrico	Abre Fecha	0,85 0,68	0,60 0,40	0,42 0,42
	Obturador cônico excêntrico	Abre Fecha	0,77 0,79	0,54 0,55	0,44 0,44
Borboleta (eixo centrado)	Deslocamento oscilante (70°)	Qualquer	0,62	0,35	0,57
	Deslocamento oscilante (60°)	Qualquer	0,70	0,42	0,50
	Hélice estriada (70°)	Qualquer	0,67	0,38	0,30
Borboleta de alta performance (eixo excêntrico)	Sede deslocada (70°)	Qualquer	0,67	0,35	0,57
Esfera	Passagem plena (70°)	Qualquer	0,74	0,42	0,99
	Bola segmentada	Qualquer	0,60	0,30	0,98

Fonte: Adaptado de ISA, 2007

Nota-se que esta tabela apresenta apenas valores típicos de alguns tipos de válvulas de controle, o procedimento ideal seria determinar os coeficientes através de experimentos ou cálculos aproximados. Nos apêndices da norma é possível verificar um cálculo aproximado do fator F_d , que pode ser determinado pela razão do diâmetro hidráulico e o diâmetro circular equivalente da válvula, a partir de dimensões fornecidas pelo fabricante da válvula.

Após a escolha do tipo da válvula, será necessário escolher as equações necessárias para o cálculo do coeficiente de vazão requerido, a norma separa o dimensionamento para fluidos incompressíveis (líquidos) e para fluidos compressíveis (gases e vapores), por conta das diferenças de comportamentos que estes fluidos apresentam no escoamento. A seguir será explicado o dimensionamento para fluidos incompressíveis e posteriormente o processo para fluidos compressíveis. As constantes numéricas estão mostradas na tabela abaixo, para o cálculo utilizando K_v ou C_v para o coeficiente de vazão.

Tabela 2 – Constantes numéricas para as equações de dimensionamento

Constante	K_v	C_v
N_1	0,1	0,0865
N_2	$1,60 \times 10^{-3}$	$2,14 \times 10^{-3}$
N_4	$7,07 \times 10^{-2}$	$7,60 \times 10^{-2}$

N_5	$1,80 \times 10^{-3}$	$2,41 \times 10^{-3}$
N_6	3,16	2,73
N_7	4,82	4,17
N_8	1,10	0,948
N_9	24,6	21,2
N_{18}	0,865	1,00
N_{22}	17,3	15,0
N_{27}	0,775	0,670
N_{32}	140	127

Fonte: Adaptado de ISA, 2007

3.1.1 Equações de dimensionamento para fluidos incompressíveis

Antes de seleccionar as equações corretas para o dimensionamento, é necessário conhecer algumas propriedades físicas do fluido, que estão listadas na tabela abaixo. As unidades listadas são as que são possíveis de serem utilizadas utilizando a tabela de constantes numéricas, a norma ISA apresenta diferentes valores de constantes para diferentes combinações de unidades, para facilitar no uso prático.

Tabela 3 – Propriedades para o dimensionamento de fluidos incompressíveis

Propriedade	Descrição	Unidade
P_1	Pressão estática na entrada da válvula	kPa
P_2	Pressão estática na saída da válvula	kPa
P_v	Pressão de vaporização do líquido na temperatura de entrada	kPa
P_c	Pressão crítica do fluido	kPa
ρ_1	Massa específica na entrada	kg/m ³
ν	Viscosidade cinemática	m ² /s
Q	Vazão volumétrica	m ³ /h

Fonte: do Autor

Com estas propriedades, o próximo passo é calcular o fator de razão crítica de pressão do líquido F_F , este fator é definido como a razão da pressão aparente na *vena contracta* da válvula de controle, com a pressão de vaporização do líquido. O fator está atrelado ao fenômeno de flash que pode ocorrer na sede devido a diminuição de pressão causada pelo estrangulamento nesta região. A norma define que para pressões de vapor próximas a zero, o fator se aproxima do valor 0,96. Para resultados aproximados, os valores de F_F podem ser determinados pela equação (5). Sendo P_v a pressão de vaporização do líquido e P_c a pressão crítica do fluido:

$$F_F = 0,96 - 0,28\sqrt{\frac{P_v}{P_c}} \quad (5)$$

Como o cálculo do coeficiente de vazão é iterativo, é preciso fazer algumas suposições para calcular o primeiro valor do coeficiente de vazão C e assim seguir com o dimensionamento. Para isto, é utilizado o fator F_F , e adotado a ausência de acessórios na entrada e saída da válvula. Para determinar se o fluxo está chocado ou não chocado, é feita uma análise a partir da equação (6), com ΔP sendo a variação de pressão da entrada e saída da válvula, calculada pela equação (7). O fator de recuperação de pressão do líquido (F_L) é obtido a partir da tabela 1.

$$\Delta P \geq F_L^2(P_1 - F_F P_v) \quad (6)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (7)$$

Com a equação (5) pode-se verificar a condição do fluxo, se a equação for verdadeira então o fluxo está chocado ou crítico, se a equação for falsa o fluxo não está chocado, ou também o fluxo está subcrítico.

Se o fluxo for subcrítico para calcular o primeiro coeficiente de fluxo, adota-se a equação (8) de fluxo turbulento e subcrítico sem conexões de tubulação, sendo esta a primeira hipótese para o regime de fluxo. Sendo ρ_0 a densidade da água a temperatura de 15°C (~1000 kg/m³), e o fator N_1 um fator numérico utilizado dependendo das unidades das propriedades.

$$C = \frac{Q}{N_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0 \Delta P}} \quad (8)$$

Para o caso do fluxo ser crítico é preciso calcular o coeficiente de fluxo utilizando uma outra fórmula, adota-se a equação de fluxo turbulento e crítico sem acessórios, fazendo a mesma hipótese para o subcrítico, adota-se o regime de fluxo como turbulento utilizando a

equação (9). Nota-se que a equação (9) se assemelha muito com a equação (8), mas com o valor da pressão na saída sendo substituída pelo valor da pressão na *vena contracta*.

$$C = \frac{Q}{N_1 F_L} \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{P_1 - F_F P_v}} \quad (9)$$

Seguindo com o cálculo, agora com o coeficiente de vazão calculado pelas primeiras hipóteses, consegue-se calcular um valor aproximado para o número de Reynolds na válvula, descrito na equação (10). Com o cálculo deste adimensional pode-se verificar se a proposta de escoamento que se adotou anteriormente está correta ou não. Se o número de Reynolds der menor que 10000, o escoamento é turbulento, e pode-se utilizar o coeficiente anteriormente calculado. Utiliza-se neste cálculo $C = C_i$. Para resultados mais exatos para o número de Reynolds são necessários testes experimentais.

$$Re_v = \frac{N_4 F_d Q}{v \sqrt{C_i F_L}} \left(\frac{F_L^2 C_i^2}{N_2 D_1^4} + 1 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

Se o número de Reynolds der menor que 10000, significa que o regime de escoamento é não turbulento (laminar ou de transição), e assim é necessário fazer um processo iterativo para calcular o coeficiente de vazão de cada iteração (C_i), calculando fator do número de Reynolds (F_R) equivalente até se chegar na convergência de valores.

As normas fornecem quatro equações para o cálculo do fator de Reynolds, duas para o caso de trim da válvula ser pleno e duas para o caso de trim reduzido. Válvulas de tipo trim total ou pleno são as válvulas onde a equação (11) é verdadeira, se a equação for falsa a válvula é do tipo trim reduzido.

$$\frac{C}{d^2} > 0,016 N_{18} \quad (11)$$

Para válvulas de trim de tamanho pleno, para calcular o fator do número de Reynolds utiliza-se o menor valor entre as equações (12) e (13), se o fluxo for de transição de laminar para turbulento, que acontece quando $Re_v \geq 10$. Quando o fluxo for laminar ($Re_v < 10$), utiliza-se o valor da equação (14), com n_1 descrito na equação (10). Para a equação (10) o valor da razão do C_i com o d^2 não poderá exceder o valor de 0,04 se for usado K_v , e 0,047 se for usado C_v . Na equação (13) o valor de F_R não pode exceder 1,0.

$$F_R = 1 + \left(\frac{0,33 \sqrt{F_L}}{n_1^{\frac{1}{4}}} \right) \log_{10} \left(\frac{Re_v}{10000} \right) \quad (12)$$

$$F_R = \frac{0,026}{F_L} \sqrt{n_1 Re_v} \quad (13)$$

$$n_1 = \frac{N_2}{\left(\frac{C_i}{d^2}\right)} \quad (14)$$

As válvulas de trim de tamanho reduzido, a abordagem é a mesma, porém as equações mudam um pouco devido a maior perda de carga causada pela menor área na sede. O F_R é calculado utilizando o menor valor entre as equações (15) e (16) se o fluxo for de transição, e se o fluxo for laminar, utiliza-se a equação (17), com o n_2 descrito na equação (13). Com o valor de F_R não podendo exceder 1,0 na equação (17).

$$F_R = 1 + \left(\frac{0,33 \sqrt{F_L}}{n_2^{\frac{1}{4}}} \right) \log_{10} \left(\frac{Re_v}{10000} \right) \quad (15)$$

$$F_R = \frac{0,026}{F_L} \sqrt{n_2 Re_v} \quad (16)$$

$$n_2 = 1 + N_{32} \left(\frac{C_i}{d^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (17)$$

Conhecendo agora como o fator F_R é calculado, é possível por meio de iteração, encontrar o coeficiente de vazão adequado para seguirmos com o dimensionamento para o caso de fluxo não turbulento. Utilizando o valor de C calculado pela equação (8) ou (9), adota-se o coeficiente de vazão para a interação C_i como sendo 30% maior que C . Com o C_i calcula-se o número de Reynolds e o F_R com o processo descrito acima, utilizando as equações corretas para o tipo de trim e regime de escoamento. No final deste passo da iteração usaremos a equação (18) para validar o C_i adotado, se a equação for verdadeira poderemos utilizar o valor de C_i , se ela for falsa acrescentamos 30% ao C_i e repetimos o passo, até que a equação seja verdadeira.

$$\frac{C}{F_R} \leq C_i \quad (18)$$

Um adendo importante para o caso de fluxo laminar ou de transição, é que as normas utilizadas não fornecem equações para o caso de considerar as conexões acopladas na válvula, então o resultado de C_i conseguido pela equação (18) pode ser utilizado como o valor de coeficiente de vazão do processo.

O próximo passo do dimensionamento, para o escoamento turbulento, é considerar as conexões que serão instalados junto a válvula de controle. Estas conexões de tubulação são as

reduções ou ampliações que são necessárias para fixar a válvula na tubulação quando o diâmetro da válvula é diferente do diâmetro da linha. Se o diâmetro da válvula de controle for igual ao diâmetro da linha, considera-se o valor do coeficiente da vazão calculado como sendo verdadeiro, mas se não, precisa-se fazer um processo iterativo, calculando os fatores de geometria da tubulação F_p para o caso de fluxo subcrítico, e o fator que combina a recuperação de pressão com os acessórios de tubulação instalados F_{LP} para o caso de fluxo crítico.

Para calcular o fator de geometria da tubulação, é preciso considerar o diâmetro da tubulação tanto na entrada quanto na saída da válvula, a norma considera que a equação (19), que aproximam os valores de F_p , foi desenvolvida para redutores concêntricos de comprimento curto disponíveis comercialmente. Para resultados mais exatos do coeficiente de geometria são necessários testes experimentais. Este fator de geometria é utilizado para o caso do fluxo ser subcrítico, ele entra na equação para considerar as perdas de carga causadas pela tubulação nas reduções e ampliações necessárias para a fixação da válvula na tubulação.

$$F_p = \left[1 + \frac{\sum \xi}{N_z} \left(\frac{C_i}{d^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Na equação (19), o fator $\sum \xi$ é a soma de todos os coeficientes de perda de carga que as conexões fixadas à válvula de controle causam, impactando na sua velocidade efetiva. Este coeficiente é calculado utilizando mais quatro coeficientes, que serão descritos nas equações (20) à (23), sendo D_1 o diâmetro da tubulação a montante da válvula, e D_2 o diâmetro da tubulação a jusante. A equação (21) pode ser utilizada para calcular tanto o coeficiente ζ_{B1} quanto o ζ_{B2} , apenas trocando o diâmetro D da equação pelo diâmetro equivalente.

$$\sum \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_{B1} - \xi_{B2} \quad (20)$$

$$\xi_B = 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \quad (21)$$

$$\xi_1 = 0,5 \left[1 - \left(\frac{d}{D_1} \right)^2 \right]^2 \quad (22)$$

$$\xi_2 = 1,0 \left[1 - \left(\frac{d}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (23)$$

Para calcular o valor estimado do fator F_{LP} se utiliza a equação (24), com o $\sum \xi_1$ descrito na equação (25). Este fator será utilizado como substituição do fator F_L nas equações de fluxo crítico, para obter resultados mais aproximados é necessário a realização de testes experimentais.

$$F_{LP} = F_L \left[1 + \frac{F_L^2}{N_2} \sum \xi_1 \left(\frac{C_i}{d^2} \right)^2 \right]^{\frac{-1}{2}} \quad (24)$$

$$\sum \xi_1 = \xi_1 + \xi_{B1} \quad (25)$$

No caso de escoamento turbulento com a utilização de conexões acopladas com diâmetros de tubulação diferentes do diâmetro da válvula de controle, é preciso utilizar uma equação diferente da equação (7) para verificar se o fluxo está em regime crítico ou subcrítico. Para este caso se utiliza a equação (26).

$$\Delta P \geq \left(\frac{F_{LP}}{F_P} \right)^2 (P_1 - F_F P_v) \quad (26)$$

A equação para o fluxo não chocado considerando as conexões acopladas pode ser vista na equação (28), e para o fluxo chocado utiliza-se a equação (29). Para escolher o regime correto é preciso analisar a equação (26), se a equação for verdadeira o fluxo é chocado, se a equação for falsa o fluxo não é chocado.

$$C = \frac{Q}{N_1 F_p} \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{\Delta P}} \quad (28)$$

$$C = \frac{Q}{N_1 F_{LP}} \sqrt{\frac{\frac{\rho_1}{\rho_0}}{P_1 - F_F P_v}} \quad (29)$$

Agora com todas as equações definidas pode-se explicar o segundo processo de iteração. Primeiro adota-se o C_i como sendo igual a C . Com o C_i utiliza-se as equações (19) e (24) para calcular o coeficiente de geometria F_p e o coeficiente de recuperação de pressão considerando as conexões acopladas F_{LP} . Com o F_p e o F_{LP} calcula-se o coeficiente de fluxo utilizando ou a equação (28) ou a (29) de acordo com a análise da equação (26). Com isto, é utilizado a equação (30) para validar a iteração, se a equação for verdadeira, quer dizer que não se chegou no valor do coeficiente ainda, e é preciso fazer mais iterações, seguindo os mesmos passos. Se a equação for falsa significa que o coeficiente foi encontrado, e assim se pode ser utilizado o C como o coeficiente de fluxo do processo.

$$\frac{C_i}{C} < 0,99 \quad (30)$$

3.1.2 Equações de dimensionamento para fluidos compressíveis

Antes de selecionar as equações corretas para o dimensionamento de fluidos compressíveis, é necessário conhecer algumas propriedades físicas do fluido, que estão listadas na tabela abaixo. Diferente do dimensionamento anterior, o dimensionamento de fluidos compressíveis apresenta mais equações para determinar o coeficiente de fluxo, dependendo das propriedades escolhidas, é preciso analisar as equações e a combinação de variáveis compatíveis que podem ser utilizadas. As equações que se utilizam para a explicação do procedimento de cálculo, que foi usado posteriormente no programa, foram definidas pelo autor.

Tabela 4 – Propriedades para o dimensionamento de fluidos compressíveis

Propriedade	Descrição	Unidade
P_1	Pressão estática na entrada da válvula	kPa
P_2	Pressão estática na saída da válvula	kPa
T_1	Temperatura na entrada da válvula	K
M	Massa molecular do fluido	kg/kmol
Z	Fator de compressibilidade	Adimensional
γ	Razão entre os calores específicos	Adimensional
Q	Vazão volumétrica normalizada a 1 atm e 0°C	m³/h
ν	Viscosidade cinemática	m²/s

Fonte: do Autor

Com as propriedades termodinâmicas é possível seguir com o dimensionamento calculando o coeficiente da razão de calores específicos F_γ , utilizando a equação (31). Este coeficiente é necessário porque o fator da razão diferencial de pressão x_T foi estabelecido para o ar à pressão atmosférica.

$$F_\gamma = \frac{\gamma}{1,40} \quad (31)$$

Semelhante ao dimensionamento de fluidos incompressíveis, adota-se como primeira hipótese escoamento turbulento sem conexões acopladas à válvula, e assim se precisa apenas

verificar se o fluxo é crítico ou subcrítico, utilizando a equação (32). Com o coeficiente x sendo a razão do diferencial de pressão com a pressão de entrada, está sendo expresso na equação (33). Diferente dos fluidos incompressíveis, aqui um fluxo crítico ou subcrítico está relacionado ao fato da velocidade do som ter sido alcançada ou não, na região de *vena contracta*.

$$x < F_Y x_T \quad (32)$$

$$x = \frac{\Delta P}{P_1} \quad (33)$$

Se a equação (32) for verdadeira, pelas hipóteses adotadas, o fluxo será subcrítico, e assim se utiliza a equação (34) para o cálculo do primeiro coeficiente de vazão. O valor do coeficiente Y , conhecido como fator de expansão, está exibido na equação (35) para o caso de fluxo subcrítico.

$$C = \frac{Q}{N_9 P_1 Y} \sqrt{\frac{MT_1 Z}{x}} \quad (34)$$

$$Y = 1 - \frac{x}{3F_Y x_T} \quad (35)$$

Para o caso do fluxo ser crítico, quando a equação (32) for falsa, pelas hipóteses de regime turbulento sem conexões acopladas, como a velocidade do escoamento não aumentará por conta de a velocidade sônica ter sido alcançada, se utiliza o valor de x limite, expresso na equação (36), utilizando a mesma equação para o caso de fluido subcrítico. Vale notar que por conta da equação (36) o valor de Y será 0,667.

$$x = F_Y x_T \quad (36)$$

Com o valor do Coeficiente de vazão calculado, pode-se seguir para o próximo passo, que seria calcular o número de Reynolds utilizando a equação (10), para verificar se o escoamento for turbulento ($Re_v \geq 10000$) ou não turbulento ($Re_v < 10000$). Se o escoamento for não turbulento, precisamos calcular o coeficiente de vazão utilizando a equação (37) para seguir com o dimensionamento.

$$C = \frac{Q}{N_{22} F_R} \sqrt{\frac{MT_1}{\Delta P(P_1 + P_2)}} \quad (37)$$

Com o cálculo do coeficiente de vazão para as equações fluxo não turbulento, o processo que se segue é muito semelhante ao caso de fluidos incompressíveis, se define o coeficiente da iteração como sendo 30% maior que o coeficiente calculado, se calcula o fator F_R e analisa-se pela equação (18) se ele é um coeficiente válido ou não, que acontece quando

a equação se torna verdadeira. Como nos fluidos incompressíveis as normas não fornecem equações considerando as conexões acopladas, então o valor que resultar da iteração pode ser utilizado como o valor do coeficiente de vazão do processo.

Seguindo para o caso do escoamento turbulento, é preciso verificar a influência das conexões acopladas na entrada e saída da válvula de controle. Para o caso de fluidos compressíveis, é preciso calcular o fator de geometria F_p (semelhante ao caso de fluidos incompressíveis), utilizando a equação (19), e o fator da razão diferencial de pressão considerando as conexões acopladas x_{TP} , que pode ser calculado utilizando a equação 38.

$$x_{TP} = \frac{x_T}{F_p^2} \left[1 + \frac{x_T \sum \xi_i}{N_5} \left(\frac{C_i}{d^2} \right)^2 \right]^{-1} \quad (38)$$

Com o valor de x_{TP} , considerando também as conexões acopladas à válvula, pode-se determinar se o fluxo é crítico ou subcrítico a partir da equação (39). Se ela for verdadeira o fluxo é subcrítico, então utiliza a equação (40) para determinar o coeficiente de vazão. O valor do coeficiente de expansão Y deverá ser calculado pela equação (35).

$$x < F_\gamma x_{TP} \quad (39)$$

$$C = \frac{Q}{N_9 F_p^2 Y} \sqrt{\frac{MT_1 Z}{x}} \quad (40)$$

Para o caso do fluido subcrítico, podemos utilizar a mesma equação que usamos para o caso anterior, mas substituindo os valores do coeficiente da razão de diferencial de pressão e a pressão de entrada x com os valores da equação (41), considera-se o valor do fator de expansão como sendo 0,667.

$$x = x_{TP} F_\gamma \quad (41)$$

Conhecendo agora as equações que são utilizadas para o processo de iteração, pode-se seguir com a explicação. Primeiro considera-se o coeficiente de vazão calculado anteriormente como sendo o primeiro para a iteração ($C_i = C$), com este valor, se calcula o F_p e o x_{TP} e utiliza-se a equação (36) (analisando o regime de fluxo) para calcular o coeficiente de vazão. Após calcular o C , se utiliza a equação (30) para validar a iteração, se ela for verdadeira precisa-se refazer o procedimento, se ela for falsa podemos utilizar o valor de C_i calculado como o coeficiente de vazão do processo.

3.2 Programa de Dimensionamento.

Para o desenvolvimento do programa na linguagem Python, foi utilizado a IDE Visual Studio Code, este programa consegue interagir facilmente com pastas e arquivos, algo que é muito útil no desenvolvimento de projetos.

Iniciou-se a programação primeiramente definindo as constantes numéricas utilizadas para os cálculos de dimensionamento, que podem ser vistas no código abaixo. Foi utilizado a lógica de dicionários para facilitar a busca das constantes durante a programação.

Figura 10 – Constantes numéricas para o dimensionamento

```
src > calculate > constants.py > ...
1  N_Kv = {
2      1: 0.10, 2: 1.60E-3, 4: 7.07E-2, 5: 1.80E-3,
3      6: 3.16, 7: 4.82, 8: 1.10, 9: 24.6,
4      18: 0.865, 22: 17.3, 27: 0.775, 32: 140}
5
6  N_Cv = {
7      1: 0.0865, 2: 2.14E-3, 4: 7.60E-2, 5: 2.41E-3,
8      6: 2.73, 7: 4.17, 8: 0.948, 9: 21.2,
9      18: 1.00, 22: 15.0, 27: 0.670, 32: 127}
```

Fonte: do Autor

Após definir as constantes numéricas foi preciso também separar os fatores que dependem do tipo, do trim, e da direção do fluxo da válvula, vistos na tabela 1. Estes fatores foram definidos no mesmo arquivo, como pode ser visto no código abaixo, os dicionários também foram utilizados neste cálculo, para facilitar na visualização, e ainda poderem ser utilizados na interface.

Figura 11 – Fatores em função da válvula escolhida

```

src > calculate > constants.py > ...
17 VALVE = {
18     'Globo sede simples':{
19         'Obturador em V de 3 vias':{
20             'Abre ou fecha' : {'fl':0.9, 'xt':0.70, 'fd': 0.48}
21         },
22         'Obturador em V de 4 vias':{
23             'Abre ou fecha' : {'fl':0.9, 'xt':0.70, 'fd': 0.41}
24         },
25         'Obturador em V de 6 vias':{
26             'Abre ou fecha' : {'fl':0.9, 'xt':0.70, 'fd': 0.30}
27         },
28         'Obturador contornado (Linear e igual porcentagem)':{
29             'Abre' : {'fl':0.9, 'xt':0.72, 'fd': 0.46},
30             'Fecha': {'fl':0.8, 'xt':0.55, 'fd': 1.00}
31         },
32         'Gaiola perfurada, 60 furos de diâmetros iguais ':{
33             'Para fora da gaiola ou para dentro da gaiola' : {'fl':0.9, 'xt':0.68, 'fd': 0.13}
34         },
35         'Gaiola perfurada, 120 furos de diâmetros iguais':{
36             'Para fora da gaiola ou para dentro da gaiola' : {'fl':0.9, 'xt':0.68, 'fd': 0.09}
37         },
38         'Gaiola caracterizada de 4 portas':{
39             'Para fora da gaiola' : {'fl':0.9, 'xt':0.75, 'fd': 0.41},
40             'Para dentro da Gaiola': {'fl':0.85, 'xt':0.70, 'fd': 0.41}
41         },

```

Fonte: do Autor

Com as constantes definidas, foi possível construir as funções que calculam os fatores utilizados para os cálculos, além de construir as funções que calculam o coeficiente de vazão do processo, aplicando o procedimento descrito no tópico 3.1. Os cálculos dos coeficientes podem ser vistos nas figuras abaixo.

Figura 12 – Cálculo do Fator do número de Reynolds

```

src > calculate > factors_calc.py > ...
1  from math import log10
2  from functools import lru_cache
3
4  lru_cache(maxsize=128)
5  def Reynolds_Number(N2, N4, Fd, FL, Q, v, Ci, D):
6      return (N4*Fd*Q)/(v*(Ci*FL)**0.5) * ((FL**2 * Ci**2)/(N2 * D**4) + 1)**0.25
7
8  lru_cache(maxsize=128)
9  def FR_Reynolds_factor(Rev, N2, N18, N32, FL, Ci, d, C_TYPE):
10     Ci_d2 = Ci / d**2
11
12     if Ci_d2 > 0.016*N18:
13         n1lim_Ci_d2 = N2/(0.040 if C_TYPE == 'kv' else 0.047)
14         n1 = min(N2/Ci_d2, n1lim_Ci_d2)
15         FRt = 1 + ( (0.33*FL**0.5) / (n1**0.25) ) * log10(Rev*1E-4)
16         FRl = min(0.026/FL * (n1*Rev)**0.5, 1.0)
17
18     else:
19         n2 = 1 + N32*(Ci_d2)**(2/3)
20         FRt = 1 + ( (0.33*FL**0.5) / (n2**0.25) ) * log10(Rev*1E-4)
21         FRl = 0.026/FL * (n2*Rev)**0.5
22
23     if Rev < 10: return FRl
24     else: return min(FRl, FRt)
25

```

Fonte: do Autor

Figura 13 – Cálculo dos Fatores Fp, FLP e xTP

```

26 lru_cache(maxsize=128)
27 def Fp_Piping_geometry_factor(N2, Ci, d, D1, D2):
28     xi_B1 = 1 - (d/D1)**4
29     xi_B2 = 1 - (d/D2)**4
30     xi_1 = 0.5*(1 - (d/D1)**2)**2
31     xi_2 = 1.0*(1 - (d/D2)**2)**2
32     xi_sum = xi_1 + xi_2 + xi_B1 - xi_B2
33     return (1 + xi_sum/N2 * (Ci/d**2)**2)**-0.5
34
35 lru_cache(maxsize=128)
36 def FLP_combined_FL_Fp_factor(N2, FL, Ci, d, D1):
37     xi_1 = 0.5*(1 - (d/D1)**2)**2
38     xi_B1 = 1 - (d/D1)**4
39     xi_sum1 = xi_1 + xi_B1
40     return FL*(1 + FL**2 / N2 * xi_sum1 * (Ci/d**2)**2)**-0.5
41
42 lru_cache(maxsize=128)
43 def xTP_pressure_diferencial_ratio_Fp_factor(N5, xT, Fp, d, D1, Ci):
44     xi_1 = 0.5*(1 - (d/D1)**2)**2
45     xi_B1 = 1 - (d/D1)**4
46     xi_sum1 = xi_1 + xi_B1
47     return xT/Fp**2 * (1 + xT*xi_sum1/N5*(Ci/d**2)**2)**-1

```

Fonte: do Autor

Com as funções para o cálculo dos coeficientes é possível montar as funções que calculam o coeficiente de vazão para fluidos incompressíveis e compressíveis. Estas funções podem ser vistas nas figuras 14 e 15.

Figura 14 – Função para o cálculo de fluidos incompressíveis

```

src > calculate > incomp.py > ...
1  from calculate.constants import N_Ctype
2  from calculate.factors_calc import (Reynolds_Number, FR_Reynolds_factor,
3                                     Fp_Piping_geometry_factor, FLP_combined_FL_Fp_factor)
4
5  def sizing_incompressible_fluids(FL, Fd, d, D1, D2, P1, P2, Pv, Pc, rho1, v, Q, C_TYPE):
6      rho0 = 1000
7      FF = 0.96 - 0.28*(Pv/Pc)**0.5
8      dP = P1 - P2
9      dPc = FL**2*(P1 - FF*Pv)
10     N = N_Ctype(C_TYPE)
11
12     if dP < dPc:
13         # Fluxo Subcrítico
14         C = Q/N[1]*((rho1/rho0)/dP)**0.5
15     else:
16         # Fluxo Crítico
17         C = Q/N[1]/FL*((rho1/rho0)/(P1 - FF*Pv))**0.5
18
19     Rev = Reynolds_Number(N[2], N[4], Fd, FL, Q, v, C, D1)
20     if Rev < 1E4:
21         # ESCOAMENTO NÃO TURBULENTO
22         Ci = 1.3*C
23         FR = FR_Reynolds_factor(Rev, N[2], N[18], N[32], FL, C, d, C_TYPE)
24         while Ci < C/FR:
25             Ci = 1.3*Ci
26             FR = FR_Reynolds_factor(Rev, N[2], N[18], N[32], FL, Ci, d, C_TYPE)
27
28         Fp = Fp_Piping_geometry_factor(N[2], Ci, d, D1, D2)
29         FLP = FLP_combined_FL_Fp_factor(N[2], FL, Ci, d, D1)
30
31         return Ci, Rev, dPc, Fp, FLP
32
33     else:
34         # ESCOAMENTO TURBULENTO
35         if D1 == d and D2 == d:
36             Fp = Fp_Piping_geometry_factor(N[2], C, d, D1, D2)
37             FLP = FLP_combined_FL_Fp_factor(N[2], FL, C, d, D1)
38             return C, Rev, dPc, Fp, FLP
39
40         Ci = 0
41         while Ci/C < 0.99:
42             Ci = C
43             Fp = Fp_Piping_geometry_factor(N[2], Ci, d, D1, D2)
44             FLP = FLP_combined_FL_Fp_factor(N[2], FL, Ci, d, D1)
45             dPc = (FLP/Fp)**2 * (P1 - FF*Pv)
46             if dP < dPc:
47                 # Fluxo Subcrítico
48                 C = Q/N[1]/Fp*((rho1/rho0)/dP)**0.5
49             else:
50                 # Fluxo Crítico
51                 C = Q/N[1]/FLP*((rho1/rho0)/(P1 - FF*Pv))**0.5
52
53         return C, Rev, dPc, Fp, FLP

```

Fonte: do Autor

Figura 15 – Função para o cálculo de fluidos compressíveis

```

src > calculate > comp.py > ...
1  from calculate.constants import N_Type
2  from calculate.factors_calc import (Reynolds_Number, FR_Reynolds_factor,
3                                     Fp_Piping_geometry_factor, xTP_pressure_diferencial_ratio_Fp_factor)
4
5  def sizing_compressible_fluids(FL, Fd, xT, d, D1, D2, P1, P2, M, T1, Z, v, k, Q, C_TYPE):
6      N = N_Type(C_TYPE)
7      Fk = k / 1.40
8      dP = P1 - P2
9      x = dP / P1
10     xc = Fk * xT
11
12     if x < xc:
13         # Fluxo Subcrítico
14         Y = 1 - x/(3*Fk*xT)
15         C = Q/(N[9]*P1*Y)*(M*T1*Z/x)**0.5
16     else:
17         # Fluxo Crítico
18         Y = 0.667
19         C = Q/(N[9]*P1*Y)*(M*T1*Z/x)**0.5
20
21     Rev = Reynolds_Number(N[2], N[4], Fd, FL, Q, v, C, D1)
22     if Rev < 1E4:
23         # ESCOAMENTO NÃO TURBULENTO
24         FR = FR_Reynolds_factor(Rev, N[2], N[18], N[32], FL, C, d, C_TYPE)
25         C = Q / ( N[22]*FR ) * ( M*T1 / (dP*(P1 + P2)) )**0.5
26         Ci = 1.3*C
27         FR = FR_Reynolds_factor(Rev, N[2], N[18], N[32], FL, C, d, C_TYPE)
28
29         while Ci < C/FR:
30             Ci = 1.3*Ci
31             FR = FR_Reynolds_factor(Rev, N[2], N[18], N[32], FL, Ci, d, C_TYPE)
32
33         Fp = Fp_Piping_geometry_factor(N[2], Ci, d, D1, D2)
34         xTP = xTP_pressure_diferencial_ratio_Fp_factor(N[5], xT, Fp, d, D1, Ci)
35
36         return Ci, Rev, xc, Fp, xTP
37
38     else:
39         # ESCOAMENTO TURBULENTO
40         if D1 == d and D2 == d:
41             Fp = Fp_Piping_geometry_factor(N[2], C, d, D1, D2)
42             xTP = xTP_pressure_diferencial_ratio_Fp_factor(N[5], xT, Fp, d, D1, C)
43             return C, Rev, xc, Fp, xTP
44
45         Ci = 0
46         while Ci/C < 0.99:
47             Ci = C
48             Fp = Fp_Piping_geometry_factor(N[2], Ci, d, D1, D2)
49             xTP = xTP_pressure_diferencial_ratio_Fp_factor(N[5], xT, Fp, d, D1, Ci)
50             xc = Fk * xTP
51
52             if x < xc:
53                 # Fluxo Subcrítico
54                 Y = 1 - x/(3*Fk*xT)
55                 C = Q/(N[9]*Fp*P1*Y)*(M*T1*Z/x)**0.5
56             else:
57                 # Fluxo Crítico
58                 Y = 0.667
59                 C = Q/(N[9]*Fp*P1*Y)*(M*T1*Z/x)**0.5
60
61         return C, Rev, xc, Fp, xTP

```

Fonte: do Autor

Com as funções de cálculo feitas, o restante do código do programa fica na criação das interface de usuário, para isso foi utilizada a biblioteca tkinter e a extensão ttkbootstrap, que aprimora os visuais dos widgets além de facilitar um pouco a criação da interface. Para criar o arquivo executável do programa foi utilizado a biblioteca cx_Freeze.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Para validar os resultados dos cálculos do programa, foi feito o cálculo de dois exemplos presentes na norma ISA 75.01.01-2007. O primeiro exemplo encontrado na norma é para o cálculo utilizando fluidos incompressíveis, no exemplo o escoamento é sem choque e sem conexões de tubulação acoplada à válvula de controle. Na tabela 5, é possível ver os dados do exemplo, e na figura 16, está mostrado o cálculo realizado pelo programa.

Tabela 5 – Exemplo 1, cálculo coeficiente de vazão

Dados do processo	
Fluido	Água
Temperatura de entrada	$T_1 = 363 \text{ K}$
Densidade	$\rho_1 = 965,4 \text{ kg/m}^3$
Pressão do vapor	$P_v = 70,1 \text{ kPa}$
Pressão crítica termodinâmica	$P_c = 22120 \text{ kPa}$
Viscosidade cinemática	$\nu = 3,26 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Pressão absoluta na entrada	$P_1 = 680 \text{ kPa}$
Pressão absoluta na saída	$P_2 = 220 \text{ kPa}$
Vazão volumétrica	$Q = 360 \text{ m}^3/\text{h}$
Diâmetro da tubulação	$D_1 = D_2 = 150 \text{ mm}$
Dados da Válvula	
Estilo da válvula	Globo
Trim	Obturador contornado
Direção de fluxo	Fluxo tende a abrir
Tamanho da válvula	$d = 150 \text{ mm}$
Fração de recuperação de pressão do líquido	$F_L = 0,90$
Modificador de estilo da válvula	$F_d = 0,46$
Resultados	
Número de Reynolds	$Re_v = 2,967 \times 10^6$
Coeficiente de Vazão	$K_v = 165$

Fonte: Adaptado de ISA, 2007

Figura 16 – Resultados do programa exemplo 1, cálculo coeficiente de vazão

Fluidos Incompressíveis | Fluidos Compressíveis

DIMENSIONAMENTO PARA FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS

DADOS DE ENTRADA

NOME DO LÍQUIDO

Água

VAZÃO VOLUMÉTRICA (Q)

360.00

m³/h

TEMPERATURA NA ENTRADA (T1)

363.00

K

PRESSÃO NA ENTRADA (P1)

680.00

kPa

PRESSÃO NA SAÍDA (P2)

220.00

kPa

PRESSÃO CRÍTICA TERM. (Pc)

22120

kPa

PRESSÃO DE VAPORIZAÇÃO (Pv)

70.100

kPa

DENSIDADE DO FLUIDO (ρ1)

965.40

kg/m³

VISCOSIDADE DO FLUIDO (ν)

0.3260

cS

DADOS DA VÁLVULA E TUBULAÇÃO

TIPO DA VÁLVULA

Globo sede simples

TIPO DO TRIM

Obturador contornado (Linear e igual porcentag

DIREÇÃO DO FLUXO

Abre

FL - Fator de recuperação de pressão do fluido)

0.9

Fd - Fator modificador de estilo da válvula

0.46

xT - Fator de razão diferencial de pressão de curso nominal

0.72

d - Diâmetro da válvula [mm]

150.0

D1 - Diâmetro interno da tubulação a montante [mm]

150.0

D2 - Diâmetro interno da tubulação a jusante [mm]

150.0

RESULTADOS

CALCULAR

Rev - Número de Reynolds [-]

2967672.0

TIPO DO COEFICIENTE

Kv

COEFICIENTE DE VAZÃO

164.921

DPc - Diferencial de pressão crítico [kPa]

497.2

Fp - Fator da geometria da tubulação [-]

1.0

FLP - Fator de recuperação de pressão [-]

0.9

Fonte: do Autor

No primeiro Exemplo, pode ser verificado que o número de Reynolds e o coeficiente de fluxo deram os mesmos valores. Isto garante o cálculo realizado pelo programa.

O segundo exemplo utilizado foi para o cálculo de fluidos compressíveis, com escoamento sem choque e considerando as conexões de tubulação na válvula, segue abaixo os resultados do cálculo do coeficiente de vazão do processo pela norma e com o programa.

Tabela 6 – Exemplo 2, cálculo coeficiente de vazão

Dados do processo	
Fluido	Dióxido de carbono
Temperatura de entrada	$T_1 = 433 \text{ K}$
Massa Molecular	$M = 44,01 \text{ kg/kmol}$
Viscosidade cinemática	$\nu = 1,743 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Razão dos calores específicos	$\gamma = 1,30$
Fator de Compressibilidade	$Z = 0,988$
Pressão absoluta na entrada	$P_1 = 680 \text{ kPa}$
Pressão absoluta na saída	$P_2 = 310 \text{ kPa}$
Pressão do vapor	$P_v = 70,1 \text{ kPa}$
Vazão volumétrica Normalizada	$Q = 3800 \text{ m}^3/\text{h}$

Diâmetro da tubulação	$D_1 = 80 \text{ mm}; D_2 = 100 \text{ mm}$
Dados da Válvula	
Estilo da válvula	Rotativa
Trim	Obturador esférico excêntrico
Direção de fluxo	Fluxo tende a abrir
Tamanho da válvula	$d = 50 \text{ mm}$
Fator da razão diferencial de pressão	$x_T = 0,60$
Fração de recuperação de pressão do líquido	$F_L = 0,85$
Modificador de estilo da válvula	$F_d = 0,42$
Resultados	
Número de Reynolds	$Re_v = 8,96 \times 10^5$
Fator de geometria da tubulação	$F_p = 0,869$
Fator da razão diferencial de pressão considerando as conexões da tubulação	$X_{TP} = 0,625$
Coefficiente de Vazão	$K_v = 72,1$

Fonte: Adaptado de ISA, 2007

Figura 17 – Resultados do programa exemplo 2, cálculo coeficiente de vazão

Fluidos Incompressíveis

Fluidos Compressíveis

DIMENSIONAMENTO PARA FLUIDOS COMPRESSÍVEIS

DADOS DE ENTRADA

NOME DO GÁS

Dióxido de Carbono

VAZÃO VOLUMÉTRICA NORMALIZADA (Q)

3800.0

m³/h

TEMPERATURA NA ENTRADA (T1)

433.00

K

PRESSÃO NA ENTRADA (P1)

680.00

kPa

PRESSÃO NA SAÍDA (P2)

310.00

kPa

FATOR DE COMPRESSIBILIDADE (Z)

0.9880

-

MASSA MOLAR (M)

44.010

kg/kmol

RAZÃO DOS CALORES ESP. (γ)

1.3000

-

VISCOSIDADE DO GÁS (ν)

17.430

cS

DADOS DA VÁLVULA E TUBULAÇÃO

TIPO DA VÁLVULA

Rotativa

TIPO DO TRIM

Obturador esférico excêntrico

DIREÇÃO DO FLUXO

Abre

FL - Fator de recuperação de pressão do fluido

0.85

Fd - Fator modificador de estilo da válvula

0.42

xT - Fator de razão diferencial de pressão de curso nominal

0.6

d - Diâmetro da válvula [mm]

50

D1 - Diâmetro interno da tubulação a montante [mm]

80

D2 - Diâmetro interno da tubulação a jusante [mm]

100

RESULTADOS

CALCULAR

Rev - Número de Reynolds [-]

896556.0

TIPO DO COEFICIENTE

Kv

xc - Razão diferencial de pressão crítica [-]

0.6

COEFICIENTE DE VAZÃO

72.587

Fp - Fator da geometria da tubulação [-]

0.863

xTP - Fator de razão diferencial de pressão [-]

0.626

No segundo exemplo, pode-se verificar que os resultados deram muito parecidos, o coeficiente de fluxo calculado pelo programa resultou num valor 0,6% por cento maior que o cálculo feito pelo exemplo da norma.

5. CONCLUSÃO

Em resumo, o trabalho apresentado teve como objetivo apresentar o procedimento utilizado na indústria para dimensionamento de válvulas de controle. O método normativo escolhido para a elaboração do programa vem cada vez mais sendo utilizado pelos fabricantes de válvulas. A confirmação dos cálculos com os exemplos da norma comprovam a utilização correta das equações, além de habilitar o uso do programa para cálculos reais de dimensionamento de válvulas de controle.

A comprovação dos resultados do programa poderia ser melhor tratada se fosse possível analisar um dimensionamento real, porém devido às dificuldades de se encontrar exemplos de dimensionamento a partir das fabricantes de válvulas, não foi possível realizar uma análise neste âmbito mais prático. Porém como pode ser visto em catálogos de alguns fabricantes renomados como a Emerson ou a Masoneilan, o método utilizado e recomendado para o dimensionamento foi seguido.

Outro ponto importante que precisa ser informado, que é confirmado pela própria norma ISA, é que os coeficientes dos cálculos são aproximações do comportamento médio de funcionamento das válvulas de controle. O procedimento mais preciso a ser feito seria fazer medições de vazão, experimentos laboratoriais, e uma análise geométrica mais aprofundada para se alcançar os coeficientes modificadores mais precisos, para se chegar no coeficiente de vazão mais exato, que para muitas aplicações acaba não sendo algo necessário.

Contudo, pode-se afirmar que este trabalho cumpriu com os objetivos que foram propostos, pois o desenvolvimento do programa foi feito, e os resultados alcançados pelos cálculos do programa são de acordo com o procedimento de dimensionamento visto na norma.

Como uma sugestão para projetos futuros, seria necessário introduzir uma análise mais abrangente para o dimensionamento, analisando também a influência da característica de vazão da válvula, e da variável controlada, para a melhor escolha das condições de projeto e não depender tanto de recomendações de fabricantes. A fim de se conseguir uma válvula mais adequada, e mais barata, que consiga cumprir com os requisitos operacionais que podem acontecer durante o seu funcionamento.

REFERÊNCIAS

- Classification of globe valve depending on number of ports.** AATRAL Engineering, 26 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.aatralengineering.com/2022/03/classification-of-globe-valve-depending.html>>. Acesso em: 20 set. 2025.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- DRESSER INDUSTRIES, INC. **Masoneilan Control Valve Sizing Handbook**. [S. l.], 2000
- EMERSON. **Control valve handbook**. 6. ed. Marshalltown: Emerson, 2023.
- EMERSON. **Pressure relief valve Engineering handbook**. Estados Unidos: Emerson, 2012.
- FLUID CONTROLS. **Válvulas industriais**. 2024. Disponível em: <<https://fluidcontrols.com.br/wp-content/uploads/2024/01/Apostila-Valvulas-Industriais.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2025.
- FOX, Robert W. et al. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- HIBBELER, Russell C. **Mecânica dos Fluidos**. 1. ed. São Paulo: Pearson, 2016.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION (ISA). ISA-75.01.01: **Flow Equations for Sizing Control Valves**. Research Triangle Park, NC: ISA, 2007.
- MATHIAS, A. C. **Válvulas: Industriais, Segurança e Controle: Tipos, Seleção e Dimensionamento**. São Paulo: Artliber Editora, 2008.
- RIBEIRO, Marco Antônio. **Válvulas de Controle e Segurança**. 5. ed. Salvador, BA: Tek, 1999.
- SILVA TELLES, Pedro Carlos da. **Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 252 p.
- SMITH, P.; ZAPPE, R. W. **Valve Selection Handbook**. Oxford: Elsevier, 2004.
- SPIRAX SARCO. **Control hardware electric-pneumatic actuation**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/control-hardware-electric-pneumatic-actuation/control-valves?sc_lang=de-DE>. Acesso em: 20 set. 2025.