



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



Dimensionamento de Válvulas de Controle para Sistemas com Líquidos

Leonardo Braga Cunha

Uberlândia - MG

2020



Dimensionamento de Válvulas de Controle para Sistemas com Líquidos

Leonardo Braga Cunha

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Uberlândia como parte dos requisitos
necessários para aprovação na disciplina
de Projeto de Graduação de curso de
Engenharia Química.

Uberlândia – MG

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Faculdade de Engenharia Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4285 - secdireq@feq.ufu.br - www.feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso - FEQUI31033 (Turma A11)				
Data:	10/03/2020	Hora de início:	9h00	Hora de encerramento:	10h00
Matrícula do Discente:	11511EQU014				
Nome do Discente:	LEONARDO BRAGA CUNHA				
Título do Trabalho:	Dimensionamento de Válvulas de Controle para Sistemas com Líquidos				

A defesa ocorreu no Auditório Giulio Massarani (1K228) e a Banca Examinadora assim composta: Eng. Rafael Yuri Medeiros Barbosa - PPGEQ/UFU; Prof. Dr. Rubens Gedraite - FEQUI/UFU; Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes - FEQUI/UFU orientador(a) do(a) candidato(a). Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a) e concedeu ao discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a). Nota: 98 (noventa e oito).

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luis Claudio Oliveira Lopes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/03/2020, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/03/2020, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Yuri Medeiros Barbosa, Usuário Externo**, em 10/03/2020, às 10:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1811062** e o código CRC **7126D597**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais e meu irmão, que são minha base e exemplo maior. Em seguida, agradeço aos meus outros familiares, que estiveram presentes ao meu lado ao longo dos anos e que são parte fundamental da minha essência.

À minha namorada e aos meus amigos, que me inspiram das mais diversas maneiras e que tanto me ensinam a todo momento. Que me ensinaram, inclusive, que uma das maiores riquezas que se pode ter na vida é uma amizade sincera.

Ao professor Luís Cláudio, que se aventurou na produção de todo esse conteúdo comigo, tendo muita paciência e boa vontade ao longo desse último ano. À professora Érika, que foi uma grande mentora ao longo dos anos e que hoje é amiga querida, que levo com muito carinho. Ao professor Rubens, que na reta final do curso, foi um grande companheiro tanto para mim, quanto para outros alunos, transmitindo força, boas vibrações e uma amizade muito valiosa. Em tempos nos quais nos esquecemos o que é ser humano, ter pessoas como essas por perto é de uma sorte inestimável.

A todos os meus outros professores, que contribuíram não só para a minha formação técnica, mas também para a formação do meu caráter, da minha cidadania e da minha moral. Em um país onde essa profissão é tão negligenciada, ter pessoas que se empenham para a boa formação de novos profissionais é um ato de incomparável nobreza.

À Faculdade de Engenharia Química (FEQUI) da Universidade Federal de Uberlândia, que me possibilitaram as mais diversas experiências relacionadas ao ambiente acadêmico. Experiências essas que, hoje, são fundamentais para a formação de profissionais melhores e mais completos.

Finalmente, ao Diretório Acadêmico, ao Programa de Educação Tutorial e à Enactus UFU, que elevaram a minha experiência no ensino superior a outro nível e me trouxeram ensinamento não só para a carreira, mas para a vida toda.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1- INTRODUÇÃO.....	11
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Característica de vazão.....	13
2.2. Fenômenos físico-químicos.....	15
2.2.1. Flash.....	15
2.2.2. Cavitação.....	15
2.3. Componentes de válvulas.....	16
2.3.1. Corpo.....	16
2.3.2. Castelo.....	16
2.3.3. Caixa de gaxetas.....	17
2.3.4. Sede.....	17
2.3.5. Plug.....	17
2.3.6. Atuador.....	18
2.4. Tipos de válvulas.....	19
2.4.1. Válvula gaveta.....	19
2.4.1.1. Válvulas gaveta de deslocamento paralelo.....	20
2.4.1.2. Válvulas gaveta de deslocamento perpendicular.....	21
2.4.2. Válvula globo.....	21
2.4.2.1. Válvula globo de sede simples.....	22
2.4.2.2. Válvula globo de sede dupla.....	23
2.4.2.3. Válvula globo de três vias.....	23
2.4.2.4. Válvula globo gaiola.....	24
2.4.3. Válvula diafragma.....	24
2.4.4. Válvula pinch.....	25
2.4.5. Válvula esfera.....	26
2.4.6. Válvula borboleta.....	27

2.4.7. Válvula plug.....	28
2.5. Materiais de construção.....	30
2.5.1. Metais.....	30
2.5.1.1. Aço carbono.....	30
2.5.1.2. Ligas de aço.....	31
2.5.1.3. Aço inoxidável.....	31
2.5.2. Elastômeros.....	31
3- METODOLOGIA.....	34
3.1. Equacionamento.....	34
3.2. Cavitação.....	38
3.3. Dimensionamento.....	39
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1. Entrada de parâmetros.....	41
4.2. Procedimento de cálculo.....	41
4.3. Estudos de caso.....	43
4.3.1. Operação com um fluido não viscoso.....	43
4.3.2. Operação com fluido viscoso em pequenos diâmetros.....	48
4.3.3. Operação com fluido viscoso em maiores diâmetros.....	50
4.3.4. Possibilidade de Cavitação.....	52
5- CONCLUSÃO.....	55
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Características de vazão	14
Figura 2.2 – Obturador para característica de vazão de igual porcentagem (a), linear (b) e abertura rápida (c).....	18
Figura 2.3 – Válvulas gaveta com deslizamento de disco (paralelo) e de guilhotina (perpendicular).....	19
Figura 2.4 – Disco em V para válvulas do tipo gaveta.....	21
Figura 2.5 – Válvula globo de sede simples.....	22
Figura 2.6 – Válvula globo de sede dupla.....	23
Figura 2.7 – Válvula globo de três vias convergente (a) e divergente (b).....	24
Figura 2.8 – Válvula globo gaiola.....	24
Figura 2.9 – Válvula diafragma.....	25
Figura 2.10 – Válvula pinch.....	26
Figura 2.11 – Válvula esfera.....	27
Figura 2.12 – Válvula borboleta.....	28
Figura 2.13 – Válvula plug.....	29
Figura 3.1 – Relação entre Re_V e F_R	37
Figura 4.1 – Fluxograma demonstrativo do software.....	43
Figura 4.2 – Entrada de valores iniciais.....	44
Figura 4.3 – Variáveis dependentes da temperatura.....	44
Figura 4.4 – Seleção dos diâmetros da válvula e da tubulação.....	45
Figura 4.5 – Informações gerais sobre a operação.....	45
Figura 4.6 - Informações referentes a cada tipo de válvula.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Materiais para fabricação de válvulas.....	32
Tabela 2.2 – Seleção do material dos internos.....	32
Tabela 3.1 – Constantes numéricas para equações de vazão de líquido.....	35
Tabela 3.2 – Valores característicos de parâmetros de acordo com o tipo de válvula.....	37
Tabela 4.1 – Condições de operação do estudo de caso 1.....	44
Tabela 4.2 – Registro das informações obtidas pelo software.....	46
Tabela 4.3 – Condições de operação do estudo de caso 2.....	48
Tabela 4.4 – Registro das informações obtidas pelo software.....	48
Tabela 4.5 – Condições de operação do estudo de caso 3.....	50
Tabela 4.6 – Registro das informações obtidas pelo software.....	50
Tabela 4.7 – Condições de operação do estudo de caso 4.....	52
Tabela 4.8 – Registro das informações obtidas pelo software.....	52

RESUMO

Elementos finais de controle são equipamentos muito importantes em uma planta de controle industrial. Esses dispositivos são responsáveis por atuar nas variáveis manipuladas de um processo, na tentativa de manter algum outro parâmetro dentro de uma faixa de valores desejáveis. Dentre os diversos elementos finais de controle disponíveis, pode-se dizer que as válvulas são as ferramentas mais empregadas na indústria – fato que justifica o estudo e entendimento desses aparelhos. Ainda assim, há muitos casos em que a escolha das melhores válvulas para determinada unidade industrial é negligenciada, visto que existem diversas variáveis que influenciam no projeto desses dispositivos – como o estado físico do fluido passante, a composição do mesmo, as dimensões das tubulações, os valores de vazão, temperatura, pressão e assim por diante – e também uma grande variedade de válvulas disponíveis no mercado. Dito isso, o trabalho em questão visa desenvolver um *software* que represente, de maneira simplificada, as etapas necessárias para a escolha adequada de uma válvula que opere com líquidos. A função principal do programa é indicar as dimensões adequadas para uma seleção correta do elemento final de controle, de modo que o equipamento seja capaz de garantir uma boa operação, sem imprevistos ou fenômenos de mudança de estado físico do fluido.

Palavras-chave: válvulas de controle; seleção de válvulas; dimensionamento de válvulas; válvulas para líquidos.

ABSTRACT

Final control elements are very important equipments in an industrial control plant. These devices are responsible for acting on the manipulated variables of a process, trying to keep some other parameter inside a desirable range. Among all the final control elements, it is right to say that valves are the most employed tools in industry – a fact which explains the study and comprehension of these dispositives. Even though, there are many cases where the choice of the best valves for an industrial unit is yet neglected, once there is several variables that can influence these devices' projects – such as the physical state and composition of the downstream fluid, flow rate, temperature, pressure and so on – and also a great variety of valves available on the market. That said, the object of this paper is the development of a software that represents, in a simple way, the required steps to choose a proper valve for operations with liquid fluids. The program's main function is to show the principal measures for a correct selection of a final control element, so the equipment can guarantee a good procedure, without unexpected problems or physical state changement scenarios.

Key words: control valves; valve selection; valve sizing; valves for liquids.

1. INTRODUÇÃO

Elementos finais de controle são dispositivos presentes em toda e qualquer malha fechada, de modo a atuar em uma variável, dita variável manipulada, a fim de garantir que outra variável, chamada variável controlada, tenha seus valores dentro de uma faixa específica de operação ao longo do tempo. Para a maioria dos processos químicos e petroquímicos, as variáveis controladas são vazões de correntes materiais – sejam elas sólidas, líquidas ou gasosas – e, conseqüentemente, as correntes energéticas associadas a esses processos. (SEBORG et. al, 2004).

Apesar de existirem diversos tipos de elementos finais de controle, o principal elemento, empregado na maioria dos processos são as válvulas de controle. Estima-se que aproximadamente 5% dos custos totais de uma indústria química são oriundos desses dispositivos. (RIBEIRO, 1999).

As primeiras válvulas de controle utilizadas foram as válvulas do tipo globo, com movimento de haste linear. Nessa época, as válvulas rotatórias eram empregadas apenas em finalidades de controle liga/desliga. Hoje, essa limitação das válvulas rotativas não existe mais e, mesmo que as válvulas globo ainda tenham largas aplicações, válvulas rotativas mais baratas – como a válvula borboleta, por exemplo – ganharam muito espaço em diferentes operações da indústria (Lipták, 2006).

Válvulas de controle podem ser definidas como equipamentos que alteram a vazão de fluido que passa por uma tubulação por meio de uma barreira física que é inserida no sistema. Essa interferência pode ser parcial – de modo a controlar a quantidade de líquido ou gás passante – ou total, a depender da necessidade do operador. Apesar de parecerem simples, as válvulas são formadas por várias peças, de modo que cada peça pode ser constituída de diferentes materiais, a depender da aplicação necessária.

Devido a toda a complexidade desse equipamento, existem, também, diversas classificações possíveis para se tratar de válvulas. As classificações mais comuns são de acordo com seu princípio de acionamento (manual, auto-reguladora ou controle), com o seu deslocamento (linear, ou rotativo), com o seu tipo de abertura (linear, abertura rápida ou igual porcentagem), com a sua condição de falha (falha abre ou falha fecha) e também de acordo com a capacidade de vedação da válvula (definida pela norma ANSI B16.104).

Como existe uma enorme variedade de combinações possíveis para a produção de uma válvula, deve-se conhecer o máximo de informações possíveis sobre a operação. É importante que se tenha noção da função a ser desempenhada pela válvula, das condições operacionais mínimas, normais e máximas, dos valores da queda de pressão, exigências de qualidade necessárias, possíveis variações de carga, níveis aceitáveis de ruído e propriedades físico-químicas do fluido.

Todas essas informações são importantes para o correto dimensionamento de uma válvula de controle. O equacionamento que é realizado para a elaboração de uma válvula de controle não é simples, e se baseia, principalmente, nas informações disponíveis. São elas que vão determinar diversos parâmetros e equações matemáticas a serem utilizadas.

O dimensionamento de uma válvula que transporta um fluido gasoso, por exemplo, é diferente daquele empregado para uma válvula que atua apenas com líquidos. Se houver possibilidade de cavitação, é necessário pensar em ambos os cenários, atentando-se às condições limite para mudança de estado físico.

Em função desses fatores é difícil desenvolver um método que forneça, de maneira eficiente, resultados satisfatórios para o dimensionamento de 100% das válvulas. Assim, o que se faz é dividir uma série de casos que possuem características semelhantes e, a partir disso, utilizam-se as equações mais convenientes.

Ainda assim, há certa dificuldade nesse processo, em razão da dificuldade de obtenção de alguns dados. Por exemplo, mesmo que cada fabricante tenha um banco de dados muito completo acerca de seus equipamentos, ainda não foi possível reunir, de maneira objetiva, um banco de dados que represente, de forma fiel, certos parâmetros – como C_v nominal, fatores de correção, entre outros.

Em função disso, o objetivo deste trabalho é elaborar um *software* que seja capaz de fornecer valores de interesse para alguém interessado na instalação de válvulas em alguma operação, de modo a informá-lo sobre informações importantes antes de tomar uma decisão imediata. O desenvolvimento é adequado, sobretudo, para operações com fluidos em estado líquido.

Existem limitações – e a falta de um acervo vasto e confiável é a principal delas – para que o programa desenvolvido seja empregado em aplicações comerciais. Ainda assim, todo o exposto possui valor científico, visto que elabora de maneira prática e concisa uma etapa de um projeto de planta industrial que, muitas vezes, é negligenciado. Se o dimensionamento proposto for feito com uma base de dados mais robusta, grandes contribuições podem ser realizadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Característica de vazão

A característica de vazão de uma válvula é a relação entre o aumento da sua vazão de acordo com o aumento da abertura da válvula. Existem três tipos principais de característica de vazão, que são ditas linear, igual porcentagem, abertura rápida e parabólica modificada. Com exceção da característica de abertura rápida, todas as outras configurações dependem das características do obturador e seu deslocamento em relação à sede para proporcionar o fluxo desejado (MATHIAS, 2008).

A característica de vazão linear, como o próprio nome diz, possui uma relação linear entre abertura da válvula e aumento da vazão. A Equação 1 representa uma curva de vazão linear.

$$f(x) = x \quad (1)$$

A característica de igual porcentagem traz uma relação exponencial entre abertura e aumento de vazão. Ela recebe esse nome porque para uma variação na posição da haste, há uma igual variação percentual de vazão, independente da posição da haste. Conseqüentemente, pequenas aberturas geram pouca variação na vazão, ao passo que aberturas próximas das totais geram enormes variações. Por isso, ela é uma mais indicada para controle em pequenas aberturas. A Equação 2 representa uma curva característica de vazão de igual porcentagem.

$$f(x) = R^{x/x-1} \quad (2)$$

A característica de abertura rápida apresenta comportamento oposto ao de igual porcentagem. Pequenas aberturas causam grandes variações, ao passo que para aberturas próximas da máxima geram pouca variação. Esse seria o melhor cenário para controle contínuo. No entanto, é importante que se tenha sempre uma margem para abertura e fechamento da válvula durante o controle de um processo e, por essa razão, essa característica de vazão é mais adequada para controles liga-desliga. A Equação 3 representa a curva referente à abertura raiz quadrática, que é análoga a de abertura rápida.

$$f(x) = \sqrt{x} \quad (3)$$

Nas Equações 1, 2 e 3, $f(x)$ é a curva característica de vazão, R a rangeabilidade, x a excursão da haste e X a excursão máxima da válvula. A Figura 2.1 compara as três características descritas.

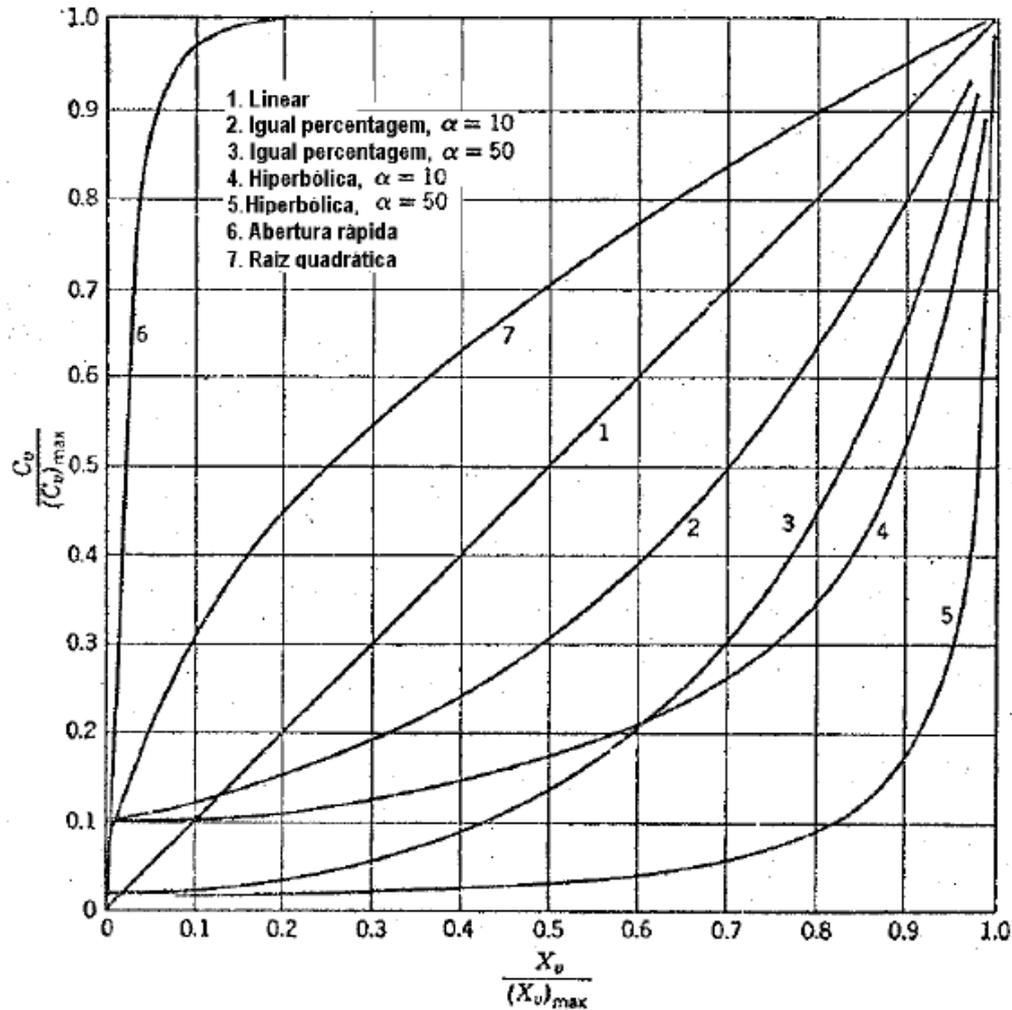


Figura 2.1 – Características de vazão (Fonte: RIBEIRO, 1999)

Uma observação importante a ser mencionada é a diferença entre a vazão de uma válvula durante o dimensionamento e a vazão real, após a instalação da válvula. Chama-se de vazão inerente o primeiro caso, que é a característica de vazão escolhida de acordo com o dimensionamento adequado da válvula, com o tipo da válvula, materiais e internos. No entanto, em uma situação real, a queda de pressão não é constante o tempo todo, e tampouco é a vazão, temperatura e outras variáveis.

Por conta disso, a característica de vazão em uma operação real sofre alguns desvios, causados pela própria instalação, resistências do sistema e tipo de fluido, por exemplo. Essa característica real de vazão é chamada vazão instalada. Características de vazão linear tendem a se

comportar como se fossem de abertura rápida. Analogamente, características de igual porcentagem e parabólica se aproximam bastante da linear (OLIVEIRA, 1999).

Diante disso, o melhor a ser feito é considerar o máximo de informações possíveis sobre a planta na etapa de dimensionamento, de modo a minimizar o efeito da instalação nas características de vazão da válvula.

2.2. Fenômenos físico-químicos

Existem alguns fenômenos físico químicos que merecem atenção quando se fala de válvulas. A compreensão desses fenômenos é importante, sobretudo, quando se tem mudanças de estado físico, como é o caso do *flash* e da cavitação.

2.2.1. Flash

O *flash* pode ser descrito como um fenômeno relacionado ao equilíbrio líquido-vapor. Quando um líquido tem sua pressão reduzida à pressão de vapor, ocorre uma evaporação parcial desse líquido, formando um sistema com líquido e vapor em equilíbrio (SMITH et al., 2007).

Esse fenômeno pode causar sérios prejuízos à válvula, principalmente relacionados à erosão. O dispositivo passa a ter uma aparência polida e suave, e geralmente é mais comprometido nos pontos em que o fluido passa com maior velocidade, que é próximo à linha da haste ou do *plug* e assento da válvula (FISHER CONTROLS INTERNATIONAL, 2001).

2.2.2. Cavitação

A cavitação é um fenômeno parecido com o *flash* e muitas vezes pode ser considerada uma consequência do mesmo. Quando ocorre a vaporização do fluido na tubulação, ela se manifesta, primeiramente, no formato de bolhas. No entanto, a recuperação da pressão pode fazer com que esse fluido se liquefaça novamente.

Isso resulta no retorno desse fluido ao estado líquido, e compressão promove uma redução de volume e, conseqüentemente, a implosão dessa bolha. Esse fenômeno resulta em três conseqüências: ruído e vibração, remoção de material e redução de vazão.

Além disso, a cavitação é um fenômeno assimétrico e violento, que pode resultar em ondas de pressão no interior do sistema. Se o fluido em questão possuir materiais particulados, os danos às válvulas e tubulações podem ser ainda mais severos (PERRY et al., 1997).

2.3. Componentes de válvulas

Cada válvula possui suas particularidades e características próprias. Ainda assim, existem alguns componentes que estão presentes em todas as válvulas, como o corpo, o trim e o atuador. (EZEKIEL ENTERPRISES , 1993). Esses e outros componentes serão apresentados a seguir.

Existe uma série de componentes que merecem atenção, por serem os componentes que ficam em contato direto com o fluido. Esses componentes são chamados de Trim ou partes molhadas da válvula. É importante destacar, porém, que o castelo, as flanges e as gaxetas não fazem parte do trim.

A importância dessas partes se deve ao fato de que são elas que determinam a modulação da vazão, a característica de vazão da válvula e a capacidade de vazão (C_v) da válvula. Além disso, elas estão diretamente relacionadas com forças do fluido capazes de causar vibrações, resistências e cargas nas guias e suportes da válvula, além de serem capazes de minimizar fenômenos como *flash*, cavitação, erosão, e corrosão (RIBEIRO, 1999).

2.3.1. Corpo

O corpo da válvula pode ser definido como a parte do equipamento que é conectado à tubulação. Ele pode ser pensado como o elemento que contém as demais partes da válvula. Por isso, é chamado, muitas vezes, de carcaça.

Existem diversos formatos possíveis para o corpo de uma válvula. Apesar de uma esfera ou cilindro serem os formatos mais lógicos, muitas operações requerem adaptações. Alguns corpos de válvula são divididos em duas partes, por exemplo, para facilitar a acomodação e o acesso ao assento, por exemplo (EZEKIEL ENTERPRISES , 1993)

2.3.2. Castelo

É a porção da válvula que serve guia da haste do obturador, além de ser a parte que conecta o corpo ao atuador. O castelo é uma parte muito importante da válvula, sobretudo em aplicações que exigem cuidados especiais. (GONÇALVES, 2003).

É importante lembrar que existem válvulas em que o castelo é parte integrante do corpo da válvula, e não um outro componente. Isso acontece principalmente em válvulas rotativas.

Uma importante função do castelo é promover a selagem contra vazamentos pela haste – que, por estar sujeita a pressão do fluido, também pode permitir o escape do mesmo. Além disso, o castelo comporta a caixa de gaxetas e a bucha da guia (quando há um).

Existem variações desse equipamento, para atender diferentes tipos de operações. O castelo normal é utilizado em operações com temperaturas entre $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $232\text{ }^{\circ}\text{C}$. O castelo alongado suporta uma faixa maior de temperatura (de $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $540\text{ }^{\circ}\text{C}$) em função da maior distância entre a caixa de gaxetas e o fluido. O castelo extra longo é usado para temperaturas menores (de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $45\text{ }^{\circ}\text{C}$), para evitar o congelamento do teflon presente nas caixas de gaxetas. Finalmente, o castelo com fole de selagem é utilizado quando não devem ocorrer vazamentos em hipótese alguma – normalmente isso acontece quando se trabalha com fluidos radioativos, tóxicos ou explosivos (OLIVEIRA, 1999).

2.3.3. Caixa de gaxetas

É um dispositivo que serve para lubrificar a haste e conter vazamentos pela mesma. É composta por prensa gaxeta, anéis da gaxeta, retentor de graxa, subconjunto de lubrificação, mola de compressão e flange de prensa gaxeta. Pode ser necessária lubrificação externa, a depender dos materiais constituintes.

Para esse interno, devem ser usados materiais mais elásticos, que tenham capacidade de deformação, que produzam pouco atrito e resistam às condições de pressão, temperatura e, se houver, corrosão do fluido (OLIVEIRA, 1999).

2.3.4. Sede

A sede da válvula é o local onde se assenta o obturador. Também pode ser chamada de assento, de forma que a posição do obturador em relação à sede é o que determina a abertura da válvula.

Uma válvula pode conter mais de uma sede, a fim de facilitar o escoamento do fluido passante e exigir menos esforço do atuador para operações de abertura e fechamento. No entanto, nesses casos a vedação é comprometida, pelo fato de haver mais de um local de escape do fluido (RIBEIRO, 1999).

2.3.5. Plug

O *plug*, também chamado obturador, é o interno que fica na extremidade da haste e que ficará em contato direto com a sede, quando a válvula estiver completamente fechada. Ele pode assumir

diferentes formatos, o que determina a característica de vazão da válvula. (MATHIAS, 2008). A Figura 2.2 ilustra esse comportamento.

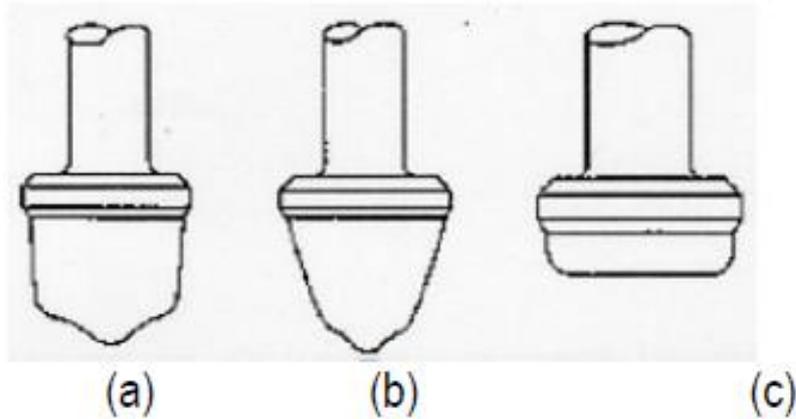


Figura 2.2 – Obturador para característica de vazão de igual porcentagem (a), linear (b) e abertura rápida (c) (Fonte: RIBEIRO, 1999)

2.3.6. Atuador

É o componente que recebe o sinal de controle e traduz esse sinal em uma força que resultará na abertura ou fechamento da válvula. Existem classificações do atuador quanto à atuação da válvula (que pode ser manual ou automática), quanto ao dispositivo móvel (linear ou rotativo) e quanto à natureza do sinal de controle (pneumático, elétrico ou hidráulico).

O tipo de atuador mais utilizado é o pneumático, mas atuadores hidráulicos e elétricos também tem uso considerável. Existe também uma variedade de atuador dita eletro-hidráulica, que tem um princípio mais complexo de funcionamento. Sua principal vantagem é a independência de pontos de ar, assim como a possibilidade de operação em baixas temperaturas, onde a água poderia ser congelada em atuadores convencionais. Em contrapartida, o preço desses dispositivos é maior.

Atuadores manuais geralmente são necessárias em situações iniciais ou finais de operação – como um *start-up* ou *shut-down* de planta – ou em condições emergenciais. Fora essas situações, o mais comum são controles automáticos.

Os atuadores pneumáticos funcionam pela injeção de ar no atuador, que resultará no deslocamento da haste de acordo com o sinal de resposta do controle. Atuadores elétricos usam motores para gerar o torque ou o impulso necessário para atender à ação de controle. (FISHER CONTROLS INTERNATIONAL, 2001).

Já os atuadores hidráulicos (e também eletro-hidráulicos) convertem a pressão de um fluido – que não é o fluido que passa pela tubulação, e sim um fluido hidráulico, capaz de deslocar a haste de maneira linear ou rotativa – em movimento para o atuador (LIPTÁK, 2006).

2.4. Tipos de válvulas

Existem diversas maneiras de se classificar as válvulas. Para esta revisão, adotou-se a classificação de acordo com o deslocamento do corpo da válvula, de modo que os dispositivos serão divididos em válvulas de deslocamento linear – que abrangem as variações globo, gaiola, diafragma, gaveta e *pinch* – em válvulas de deslocamento rotativo – que englobam os tipos borboleta, esfera, e *plug*.

2.4.1. Válvula Gaveta (*Gate valves*)

São válvulas baratas, comparadas aos outros tipos de válvulas existentes, com capacidade de operar fluidos lamacentos ou particulados. São caracterizadas por variarem a vazão através do deslizamento de um orifício ou de uma placa, conforme ilustra a Figura 2.3. Enquanto as variações de deslizamento paralelo fornecem melhores resultados para operações de alta pressão, cavitação, abrasão ou erosão, os modelos com atuadores perpendiculares possuem maior controlabilidade e melhores desempenhos para fluidos lamacentos, particulados e viscosos. (LIPTÁK, 2006).

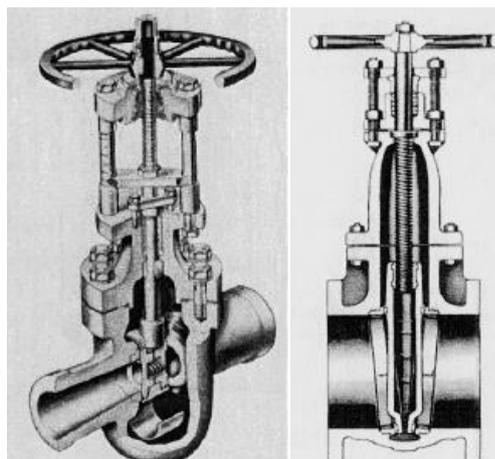


Figura 2.3 – Válvulas gaveta com deslizamento de disco (paralelo) e de guilhotina (perpendicular) (Fonte: SMITH; ZAPPE, 2004)

Uma das vantagens das válvulas gaveta é o fato de que, quando totalmente abertas, o disco ou placa não fica em contato com o fluido, o que garante baixa queda de pressão e pouca turbulência no sistema. Além disso, quando totalmente fechadas, são capazes de fornecer excelente vedação. Essa válvula também consegue operar em extensas faixas de temperatura e pressão, pode ser construída com diversos materiais – ou seja – ela pode atender a diversas condições diferentes de operação, com uma grande variedade de fluidos.

Ainda assim, existem desvantagens. Durante a abertura e fechamento da válvula, ocorrem distúrbios na vazão, que resultam em vibração indesejável e até mesmo erosão da válvula. Ademais, o ganho da válvula é muito grande para aberturas acentuadas, o que aumenta a instabilidade da operação. Também é importante citar que a lâmina da válvula percorre grande distância entre as posições completamente aberta e completamente fechada, o que configura uma resposta lenta e demanda grandes forças de atuação.

Dentre as aplicações, a válvula gaveta é muito empregada para aplicações de bloqueio e controles liga-desliga. Estima-se que essa válvula corresponde entre cerca de 70 a 80% das válvulas empregadas na indústria petroquímica. No entanto, as desvantagens dessa válvula a tornam inadequada para controle contínuo. Logo, ela não é ideal em operações com fluidos em altas velocidades ou que exijam respostas rápidas. Também não se recomenda o uso desse elemento final de controle para operações com vapor d'água. (RIBEIRO, 1999)

2.4.1.1. Válvulas gaveta de deslocamento paralelo

São válvulas em que a obstrução do fluido pode ser causada por um ou dois discos idênticos. A pressão exercida pelo fluido é o próprio mecanismo de atuação da válvula, que pode atuar tanto no disco quanto no assento da válvula.

Se a pressão do fluido é baixa, podem ser necessárias forças de atuação complementares para promover uma vedação adequada, sobretudo em construções em que tanto o atuador quanto o assento são metais. O controle com esse tipo de válvula é satisfatório apenas com fechamento maior ou igual a 50%

Altas velocidades e densidades podem danificar seriamente a válvula e, por isso, sua aplicação é bem maior para fluidos no estado gasoso (SMITH; ZAPPE, 2004).

2.4.1.2. Válvulas gaveta de deslocamento perpendicular

Aqui, a obstrução do fluido é causada por uma placa ou disco que se desloca perpendicularmente ao fluido. Nesse caso, a pressão do fluido não é suficiente para promover a vedação completa, sobretudo em construções exclusivamente metálicas.

Um inconveniente dessa válvula é a possibilidade de travamento durante a operação com fluidos particulados. Quando o atuador se aproxima do assento, a possibilidade de travamento aumenta consideravelmente. Para resolver esse problema, geralmente são empregados assentos de borracha (SMITH; ZAPPE, 2004).

Existe uma configuração dessa válvula que permite maior controle durante a abertura e fechamento, com um disco em formato de V. Essa variação atribui uma configuração de vazão parabólica. No entanto, essa implementação aumenta em muito a importância de um bom atuador e de um bom posicionador, para garantir a qualidade do controle desejada (LIPTÁK, 2006). A Figura 2.4 ilustra esse design.

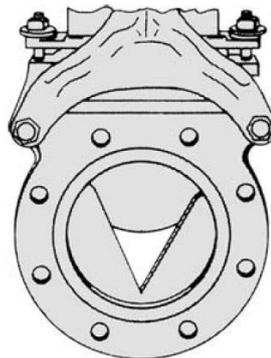


Figura 2.4 – Disco em V para válvulas do tipo gaveta (Fonte: LIPTÁK, 2006)

2.4.2. Válvulas Globo

Como o próprio nome diz, são válvulas cujo formato é similar ao de um globo. Internamente, tem-se a passagem do fluido por um orifício, cuja abertura e fechamento são controlados por elemento vedante, comumente chamado de disco. É a posição desse disco em relação ao orifício (também chamado de assento), que varia de maneira linear, que determina a quantidade de fluido passante. A sua larga aplicação industrial levou a inúmeras variações da válvula globo tradicional (PERRY et al., 1997). Algumas dessas variações serão vistas neste trabalho.

É a válvula mais conhecida, provavelmente em função de sua característica de vazão linear. Dentre suas vantagens, é possível citar o atuador simples, composto majoritariamente por molas, a possibilidade de mudanças das características de vazão (existem diversos tipos de válvulas globo), as pequenas probabilidades de cavitação e ruído, a disponibilidade de diferentes materiais para construção (que possibilitam construções que atendam uma enorme quantidade de operações, cada uma com características próprias), a relação linear entre sinal de controle e movimento da haste, pequena banda morta e pequena histerese (o que dispensa o uso do posicionador).

Como desvantagens, podem ser citados o menor coeficiente de vazão (C_v) dessa válvula, o que demanda um maior diâmetro e, conseqüentemente, maior custo para construção. Além disso, a menor capacidade de vazão, o maior peso e maior probabilidade de vazamentos e maior tempo de resposta frente a outras válvulas também são pontos negativos das válvulas globo.

Apesar das desvantagens da válvula globo, elas ainda são atrativas, principalmente quando comparadas às desvantagens das válvulas rotativas, que apresentam maiores tendências de cavitação e geração de ruído. Além disso, como os diâmetros são menores (comparados aos diâmetros das válvulas globo), as reduções de tamanho nas tubulações são maiores. O resultado disso é o aumento da histerese e da banda morta. (RIBEIRO, 1999).

2.4.2.1. Válvula globo de sede simples

A válvula globo de sede simples é o modelo padrão de válvula globo e ainda o mais utilizado na indústria, principalmente devido à grande possibilidade de adaptações possíveis nessa válvula – ela pode ser construída de diversos materiais, para diferentes aplicações e aceita uma grande quantidade de variações em seus internos. Apresentam boa capacidade de vedação e geralmente são usadas para diâmetros que variam entre 4 e 8 polegadas com atuadores de alto impulso (FISHER CONTROLS INTERNATIONAL, 2001). A Figura 2.5 ilustra essa válvula.

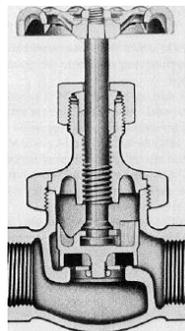


Figura 2.5 – Válvula globo de sede simples (Fonte: SMITH; ZAPPE, 2004)

2.4.2.2. Válvula globo de sede dupla

A válvula globo de sede dupla foi uma das primeiras válvulas desenvolvidas no início do século 20. Apesar de ainda ser utilizada, a válvula globo de sede simples substituiu o uso desse tipo de válvula – devido às inúmeras adaptações que ela comporta. Além disso, a válvula de sede dupla é muito maior e mais pesada.

A vedação não é tão eficiente, pois existem dois assentos e dois *plugs*. Em outras palavras, duas regiões possíveis de vazamento de fluido. Todavia, essa válvula costuma ser empregada para controles que não necessitam vedação total.

Uma vantagem dessa válvula é sua classificação como uma válvula semi-balanceada. As forças hidrostáticas atuando no disco superior cancelam as mesmas forças aplicadas no *plug* inferior, o que demanda menor esforço do atuador durante o controle. Ainda assim, sempre existe algum esforço, visto que os diâmetros dos assentos são diferentes. (LIPTÁK, 2006). A Figura 2.6 ilustra esse dispositivo.

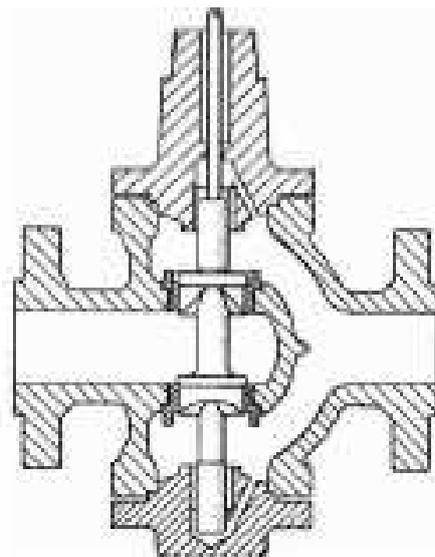


Figura 2.6 – Válvula globo de sede dupla (Fonte: LIPTÁK, 2006)

2.4.2.3. Válvula globo de três vias

A válvula globo de três vias é utilizada para misturar ou separar fluidos. As Figuras 2.7-a e 2.7-b ilustram, respectivamente, esses dois casos. A mistura ou o desvio do fluido ocorre na região do assento, em que os fluidos entram ou saem por cima e por baixo do *plug* (de acordo com a finalidade da operação). Existem válvulas rotativa para essa finalidade, mas a grande maioria das válvulas para essa finalidade ainda são as válvulas globo (PERRY et al., 1997).

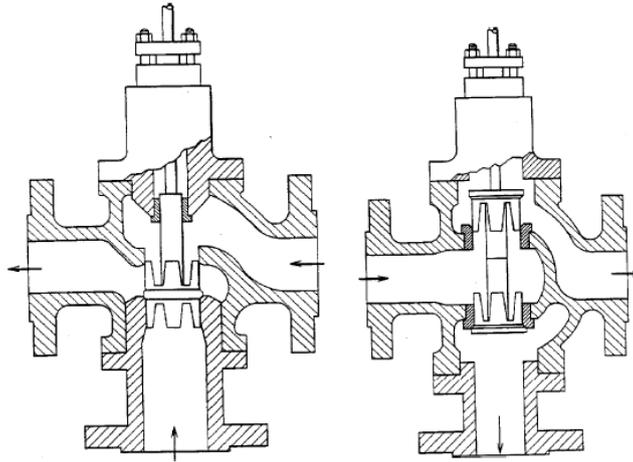


Figura 2.7 – Válvula globo de três vias convergente (a) e divergente (b) (Fonte: RIBEIRO, 1999)

2.4.2.4. Válvula Globo Gaiola

A válvula globo gaiola é uma outra variação da válvula de sede simples, muito popular na indústria. Seu design, ilustrado na Figura 2.8, torna operações de desmontagem e manutenção muito mais simples. Uma característica dessa válvula é seu *plug* vazado, que permite a passagem do fluido por dentro do mesmo, de modo que a pressão do fluido serve como um balanceador da válvula.

São boas válvulas para vedação, mas perturbações na linha são transmitidas em função do design do assento (DUNN, 2005)

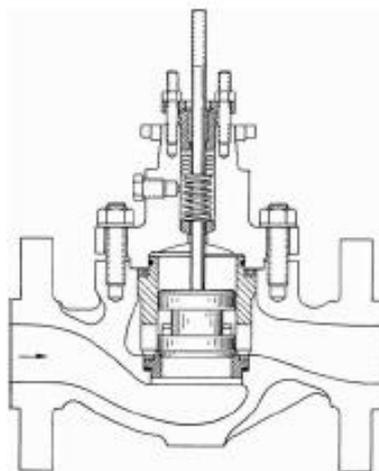


Figura 2.8 – Válvula globo gaiola (Fonte: LIPTÁK, 2006)

2.4.3. Válvula Diafragma

A válvula diafragma é uma válvula que abre e fecha por meio de um diafragma flexível e elástico, que se move pela ação de um compressor fixo, instalado na haste da válvula. Foi projetada

para trabalhar com fluidos corrosivos, perigosos tóxicos ou muito voláteis, de modo a evitar o vazamento desses compostos. O atuador se encontra na porção externa e não entra em contato com o fluido, o que equivale a dizer que vazamentos pela extremidade da haste são impossíveis.

É uma válvula barata, que geralmente é empregada em pequenos serviços – com diâmetros da ordem de, no máximo, 6 polegadas. Conseqüentemente, as pressões e temperaturas limites de operação podem variar bastante, a depender do material empregado para a construção da mesma (TELLES, 2005).

As válvulas do tipo diafragma também são chamadas Válvulas *Saunders* em homenagem a seu criador, e não são as mais indicadas para uma operação de controle. A Figura 2.9 representa uma Válvula *Saunders*.

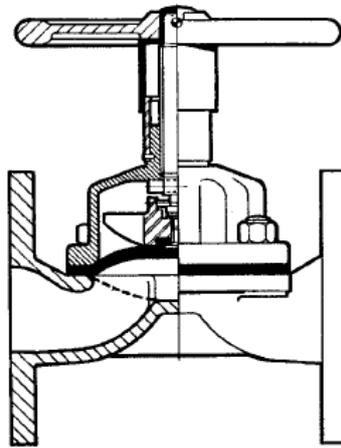


Figura 2.9 – Válvula diafragma (Fonte: SMITH; ZAPPE, 2004)

2.4.4. Válvula *Pinch*

Válvulas *Pinch* são válvulas com um corpo flexível, que é comprimido para aumentar ou diminuir a vazão do fluido passante. Possuem um mecanismo de funcionamento semelhante ao das válvulas diafragma. Elas foram muito aprimoradas graças ao surgimento de novos materiais, sobretudo elastômeros como teflon, neoprene e polipropileno. (RIBEIRO, 1999).

A principal vantagem desse elemento final de controle é a ausência de fendas ou partes móveis. A flexibilidade do corpo da válvula é suficiente para promover alterações de vazão. São válvulas que permitem trabalhar com fluidos corrosivos, lamacentos ou que contêm partículas sólidas. As principais aplicações das válvulas *Pinch* estão nas indústrias farmacêuticas e alimentícias, que são as que exigem maiores padrões de qualidade do produto final.

A ausência de partes móveis garante pouca queda de pressão dentro dessas válvulas, o que torna a operação de controle pouco precisa para aberturas superiores a 50%.

Existem limitações de pressão e temperatura, em função do tipo de material empregado – elastômeros. Além disso, existem limitações operacionais. É fundamental a abertura da válvula antes do início da operação para retirada do ar que se encontra na tubulação; caso contrário, o fluido passante irá comprimir o ar remanescente, que abrirá fissuras na válvula e causará vazamentos (SMITH; ZAPPE, 2004). A Figura 2.10 representa uma válvula *Pinch*.

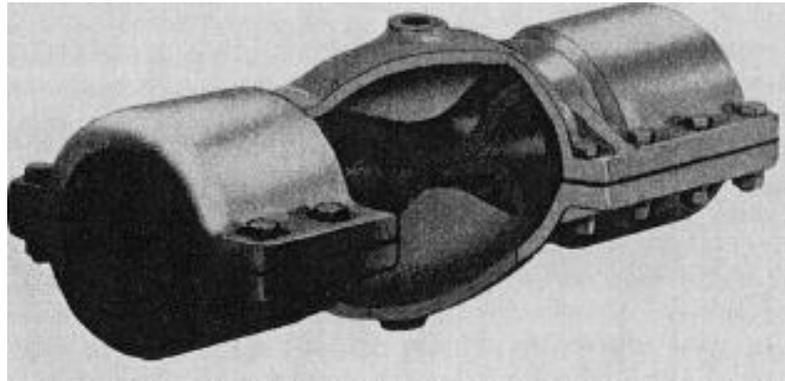


Figura 2.10 – Válvula *pinch* (Fonte: SMITH; ZAPPE, 2004)

2.4.5. Válvula Esfera

Inicialmente eram utilizadas apenas para operações liga-desliga. Hoje, são utilizadas também para controle de processos e, comparadas às válvulas globo, apresentam menores custos, pesos, e maior capacidade de vazão – que pode chegar a ser três vezes maior que a de uma válvula globo tradicional.

Válvulas esfera são válvulas rotativas, com um elemento vedante em forma de esfera, que rotaciona na porção interna do corpo para promover a abertura e fechamento da válvula. Os assentos são macios para aliviar o atrito com a esfera. Em termos de vedação, válvulas esfera possuem excelente desempenho.

As características de vazão são interessantes para controle, mas é importante ressaltar que operações a altas pressões por tempos prolongados podem deslocar os assentos da válvula, causando o travamento da mesma naquela posição. Por essa razão, as válvulas esfera são mais adequadas para situações de *start-up*, *shut-down* ou controle de vazões em condições moderadas.

Este tipo de válvula é recomendada para trabalhos com fluidos possuindo sólidos em suspensão. Todavia, não são indicados fluidos corrosivos ou contendo partículas abrasivas, que podem danificar a esfera – a menos que os anéis retentores sejam específicos para tal. Também

deve-se ter atenção à temperatura, visto que, geralmente, esses anéis não suportam temperaturas muito elevadas (TELLES, 2005).

A instalação de uma válvula esfera deve ser bem pensada, uma vez que ela possui diâmetros menores que outros tipos de válvulas – como as válvulas globo, por exemplo. Isso significa que é necessária uma considerável redução da tubulação (o que resulta em uma grande perda de pressão para bombeamento do fluido) ou a utilização de uma válvula superdimensionada. Essas configurações aumentam a possibilidade de cavitação e ruído. Além disso, as configurações de controle possuem acentuada não linearidade entre o atuador e a rotação da válvula, o que contribui para a existência de histerese e banda morta. (LIPTÁK, 2006). A Figura 2.11 ilustra uma válvula esfera.

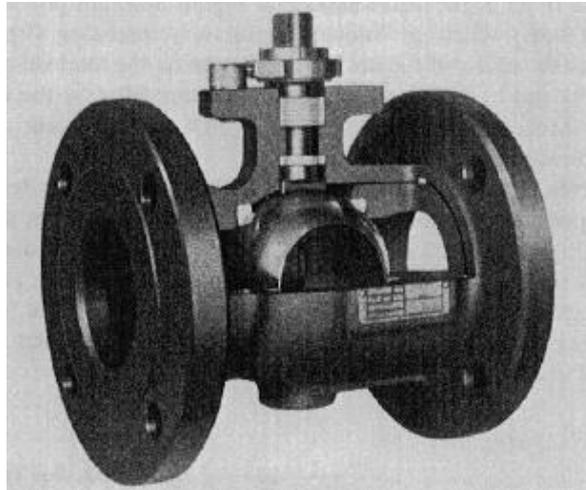


Figura 2.11 – Válvula esfera (Fonte: SMITH; ZAPPE, 2004)

2.4.6. Válvula Borboleta

São válvulas que possuem um elemento vedante em forma de disco, que rotaciona 90° entre as posições de abertura e fechamento máximo. Assim como as válvulas esfera, válvulas borboleta também apresentam vantagens de custo, peso e capacidade de vazão, quando comparadas às válvulas globo.

Inicialmente, a válvula borboleta não era indicada para operações de *shut-off* que exigissem rigorosos controles, em função dos consideráveis vazamentos que apresenta. Porém, com o surgimento de novos materiais, sobretudo os elastômeros, as válvulas borboletas começaram a atender, também, esse tipo de aplicação. O elastômero é instalado entre o disco metálico que compõe o assento da válvula e o disco que rotacional. No entanto, esse tipo de configuração limita a queda de pressão no interior do equipamento (MCMILLAN; CONSIDINE, 1999).

As válvulas borboletas oferecem pouca resistência à passagem do fluido quando totalmente abertas e, quando estão com abertura entre 15° e 70°, proporcionam um controle bastante sensível do fluido em questão. Existem riscos de ocorrência de cavitação, que podem ser eliminados através da redução do dimensionamento da válvula, para uma operação com maiores pressões e menores aberturas. (SMITH; ZAPPE, 2004)

Como nas válvulas esfera, existem relações não lineares entre atuador e rotação do disco, o que pode acarretar em histerese e banda morta.

Em relação às aplicações, as válvulas borboleta são empregadas em diversos cenários, alguns até mesmo fora do contexto industrial. São válvulas que podem ser encontradas em fornos, carburadores de automóveis e até mesmo chuveiros (LIPTAK, 2006). A Figura 2.12 representa uma válvula borboleta.

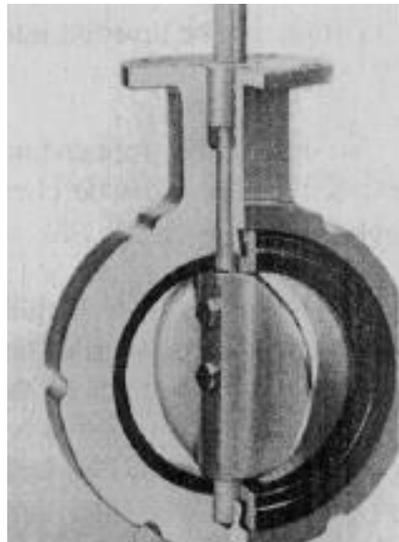


Figura 2.12 – Válvula borboleta (Fonte: SMITH; ZAPPE, 2004)

2.4.7. Válvula *Plug*

Novamente, uma válvula rotativa que, quando compara à válvula globo apresenta menor custo, menor peso e maior capacidade de vazão – que pode ser até três vezes maior. É caracterizada por ter um *plug* rotativo, com um formato cilindro ou cônico, com um furo em seu interior. Seu design lembra muito o de uma válvula esfera. A abertura e fechamento dessa válvula se dá pela rotação do cilindro, que varia de 0° (totalmente fechada) a 90° (totalmente aberta).

Um detalhe interessante é que existe a possibilidade de lubrificação do cilindro, por meio da injeção de fluidos lubrificantes pelo macho da válvula. Isso garante que não haja travamento da

válvula e permite um melhor desempenho, sobretudo, com fluidos não lubrificantes (RIBEIRO, 1999).

As válvulas *plug* são indicadas para fluidos corrosivos, viscosos, lamacentos e fibrosos, mas são muito sensíveis a cavitação e *flashing*, devendo ser evitadas em cenários em que esses fenômenos são possíveis. Elas são capazes de promover excelente vedação e podem operar como dispositivos de segurança corta-fogo. São também muito indicadas para trabalhos com gases tóxicos. É interessante ressaltar que as válvulas borboleta também possuem essa propriedade desde que os elastômeros suportem as altas temperaturas envolvidas. Além disso, são capazes de operar em amplas faixas de pressão e temperatura.

Em contrapartida, essas válvulas não são recomendáveis quando se tem grandes oscilações de vazão ou uma operação contínua por longos períodos de tempo, uma vez que a lubrificação do *plug* é necessária e a falta dela pode acarretar sérios problemas ao dispositivo (LIPTÁK, 2006).

Essa válvula também traz o inconveniente de uma grande redução de tubulação devido aos menores diâmetros requeridos e, como consequência, uma queda de pressão acentuada, o que pode trazer complicações para o bombeamento do fluido. Assim, quando a redução é muito acentuada, podem ser usadas válvulas superdimensionadas para evitar esse tipo de situação.

Como nas outras válvulas rotativas, a relação entre a rotação do *plug* e a força do atuador não é linear, o que pode resultar em histerese e banda morta. As aplicações principais são para *start-up* e *shut-down*, mas ela também pode ser usada para controle convencional de vazão (SMITH; ZAPPE, 2004).

Uma adaptação que torna essa válvula bastante interessante para operações com desvios de corrente ou misturas são as válvulas de três ou quatro vias, que possuem um princípio de funcionamento semelhante ao de uma válvula globo de três vias. A Figura 2.13 ilustra uma válvula *plug*.

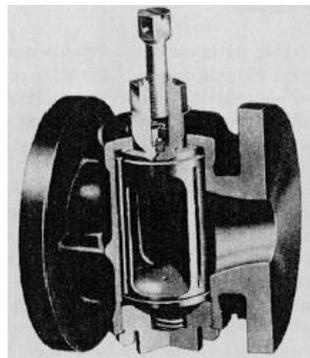


Figura 2.13 – Válvula *plug* (Fonte: SMITH; ZAPPE, 2004).

2.5. Materiais de construção

Os materiais de construção de uma válvula são extremamente importantes para o bom funcionamento da mesma. São eles que atribuem ao elemento final de controle as características necessárias para se atender às exigências do processo – seja para se operar um fluido sem complicações, para atender a exigências de vedação em uma tubulação, para garantir operações a altas pressões e temperaturas, para evitar pausas excessivas na planta para manutenção, entre outros motivos.

Quando se busca um material adequado, se está pensando, na verdade, em um conjunto de propriedades que melhor atenda as necessidades de determinado projeto. Os materiais podem ser divididos em seis principais grupos, que são os metais, os polímeros, os elastômeros, as cerâmicas, os vidros e os híbridos. Cada uma dessas famílias apresentam características, processamento e, muitas vezes, até aplicações semelhantes.

A seleção de um material requer o conhecimento das propriedades do mesmo. Para materiais clássicos e mais antigos, essas informações são facilmente acessíveis. No entanto, materiais mais modernos carecem de informações e, quando essas existem, muitas vezes não são confiáveis. Ainda assim, é importante lembrar que os materiais são grandes fontes possíveis para inovação e que, por isso, escolhê-los bem pode trazer grandes vantagens para o processo (ASHBY, 2012).

O material usado na tubulação já é um bom indicador do que pode ser usado na válvula. No entanto, como as velocidades em seu interior são maiores, isso nem sempre é suficiente para determinar os materiais. Quando materiais como aço inox, aço carbono ou ligas de aço não atendem às exigências da válvula, deve-se pensar em outros materiais e considerar o uso de revestimentos. Geralmente os materiais do trim são escolhidos levando-se em conta os materiais do corpo da válvula, as faixas de temperatura e as características do fluido. (MCMILLAN; CONSIDINE, 1999).

2.5.1. Metais

Os metais são materiais com características gerais muito semelhantes. Com uma ou outra exceção, são conhecidos pela sua alta ductilidade, baixa resistência térmica, e baixa resistência à corrosão.

2.5.1.1. Aço Carbono

Apresenta a menor relação custo/resistência entre os materiais usados para construção industrial e é largamente utilizado. As propriedades desse material são muito influenciadas pela

composição, de modo que, quanto mais carbono houver no material, maior será a resistência do aço. Em contrapartida, a ductibilidade e a soldabilidade são comprometidas (TELLES, 2005).

2.5.1.2. Ligas de Aço

São mais empregadas para exigências de altas temperaturas. A maioria envolve o uso de Crômio e Molibdênio, o que confere mais resistência ao temperamento, grafitação, erosão e *flashing* (MCMILLAN; CONSIDINE, 1999).

2.5.1.3. Aço Inoxidável

É usado para aplicações com possibilidade de corrosão. Geralmente possuem elementos químicos em sua composição que conferem resistência aos meios ácidos. Alguns exemplos desses elementos são o silício (Si), o tungstênio (W), o molibdênio (Mo), o níquel (Ni), o cromo (Cr), o nióbio (Nb) e o titânio (Ti).

Aços inoxidáveis se comportam bem com fluidos ácidos – como ácido nítrico, ácido sulfúrico, entre outros – e também com soluções alcalinas. No entanto, deve-se ter atenção com relação à tensão no caso das últimas, uma vez que ela favorece a ocorrência da corrosão nesses materiais. Uma saída para isso pode ser a adição de Magnésio, Prata ou Níquel na liga (GENTIL, 1996).

2.5.2. Elastômeros

Podem ser definidos como polímeros de cadeia longa acima da temperatura de transição vítrea. As ligações covalentes que ligam os monômeros permanecem intactas, mas ligações de Van der Waals e hidrogênio geralmente derretem. Essa é a explicação físico-química para as propriedades desses materiais – dilatação com aumento da temperatura e enorme extensão elástica, por exemplo (ASHBY, 2012).

Podem ser usados no trim das válvulas, por geralmente não sofrerem ação da corrosão. Além disso, sua capacidade de vedação faz com que os elastômeros também sejam usados como revestimentos para redução de fricção e vazamentos no interior das válvulas (McMillan e Considine, 1999).

As Tabelas 2.1 e 2.2, assim como a Figura 2.14, ilustram a variedade de informações disponíveis acerca de diversos materiais possíveis para a construção de válvulas.

Tabela 2.1 – Materiais para fabricação de válvulas (Fonte: FISHER CONTROLS INTERNATIONAL , 2001)

MATERIAL	APPLICATION	LOWER		UPPER	
		°F	°C	°F	°C
304 SST, S30400, CF8	uncoated plugs and seats	-450	-268	600	316
316 SST, S31600, CF8M	uncoated plugs and seats	-450	-268	600	316
317 SST, S31700, CG8M	uncoated plugs and seats	-450	-268	600	316
416 SST, S41600, 38 HRC min	cages, plugs and seats	-20	-29	800	427
CA6NM, 32 HRC min	cages, plugs and seats	-20	-29	900	482
Nitronic 50 ⁽¹⁾ , S20910 high strength condition	shafts, stems and pins	-325	-198	1100	593
440 SST, S44004	bushings, plugs and seats	-20	-29	800	427
17-4 PH, S17400, CB7Cu-1, H1075 condition	cages, plugs and seats	-80	-62	800	427
Alloy 6, R30006, CoCr-A	plugs and seats	-325	-198	1500	816
Electroless Nickel Coating	trim coating	-325	-198	750	400
Hard Chromium Plating	trim coating	-325	-198	600	316
Hard Chromium Plating on V-balls	trim coating	-325	-198	800	427
Hard Chromium Coating	trim coating	-325	-198	1100	593
Monel ⁽²⁾ K500, N05500	uncoated plugs and seats	-325	-198	800	427
Monel ⁽²⁾ 400, N04400	uncoated plugs and seats	-325	-198	800	427
Hastelloy ⁽³⁾ B2, N10665, N7M	uncoated plugs and seats	-325	-198	800	427
Hastelloy ⁽³⁾ C276, N10276, CW2M	uncoated plugs and seats	-325	-198	800	427
Titanium Grades 2, 3, 4, C2, C3, C4	uncoated plugs and seats	-75	-59	600	316
Nickel, N02200, CZ100	uncoated plugs and seats	-325	-198	600	316
Alloy 20, N08020, CN7M	uncoated plugs and seats	-325	-198	600	316
NBR, nitrile rubber	seats	-20	-29	200	93
FKM Fluoroelastomer (Viton ⁽⁴⁾)	seats	0	-18	400	204
PTFE, polytetrafluoroethylene	seats	-450	-268	450	232
PA (nylon)	seats	-60	-51	200	93
HDPE, high density polyethylene	seats	-65	-54	185	85
CR, chloroprene (Neoprene ⁽²⁾)	seats	-40	-40	180	82

1. Trademark of Armco Steel Corp.
2. Monel and Inconel are tradenames of Inco Alloys International
3. Hastelloy is a tradename of Haynes International
4. Trademark of E. I. DuPont Co.

Tabela 2.2 – Seleção do material dos internos (Fonte: FISHER CONTROLS INTERNATIONAL , 2001)

Property	ACM, ANIM ⁽¹⁾ Poly-acrylic	AU, EU ⁽²⁾ Polyurethane	CO, ECO Epi-chlorohydrin	CR Chloroprene Neo-prene	EPDM ⁽³⁾ Epi-ethylene Propylene	FKM ^(1,2) Fluoro-elastomer Viton ⁽⁴⁾	FFKM Per-fluoro-elastomer	IIR Butyl	VMQ Silicone	NBR Nitrile Buna N	NR Natural Rubber	SBR Buna-S GRS	TFE/P Tetra-fluoro-ethylene pro-pylene copolymer
Tensile, psi (MPa) Pure Gum Reinforced	100(0.7) 1800(12)	--- 6500(45)	2000(14) 2500(17)	3500(24) 3500(24)	--- 2500(17)	--- 2300(16)	--- 3200(22)	3000(21) 3000(21)	200-450 (1.4-3) 1100(8)	600(4) 4000(28)	3000(21) 4500(31)	400(3) 3000(21)	--- 2800(19)
Tear Resistance	Fair	Excellent	Good	Good	Poor	Good	---	Good	Poor-Fair	Fair	Excellent	Poor-Fair	Good
Abrasion Resistance	Good	Excellent	Fair	Excellent	Good	VG	---	Fair	Poor	Good	Excellent	Good	Good
Aging: Sunlight Oxidation Heat: (Max. Temp.)	Excellent 350° F (117° C)	Excellent 200° F (93° C)	Good 275° F (135° C)	Excellent Good 200° F (93° C)	Excellent Good 350° F (117° C)	Excellent Excellent 400° F (204° C)	Excellent Excellent 550° F (288° C)	Excellent Good 200° F (93° C)	Good VG 450° F (232° C)	Poor Fair 250° F (121° C)	Poor Good 200° F (93° C)	Poor Fair 200° F (93° C)	--- Excellent 400° F (204° C)
Flex Cracking Resistance	Good	Excellent	---	Excellent	---	---	---	Excellent	Fair	Good	Excellent	Good	---
Compression Set Resistance	Good	Good	Fair	Excellent	Fair	Poor	---	Fair	Good	VG	Good	Good	Good
Solvent Resistance: Aliphatic Hydrocarbon Aromatic Hydrocarbon Oxygenated Solvent Halogenated Solvent	Good Poor Poor Poor	VG Fair Poor ---	Excellent Good --- ---	Fair Poor Fair VP	Poor Fair --- Poor	Excellent VG Good ---	Excellent Excellent Excellent Excellent	Poor VP Good Poor	Poor VP Poor VP	Good Fair Poor VP	VP VP Good VP	VP VP Good VP	Good Fair Poor Poor/Good

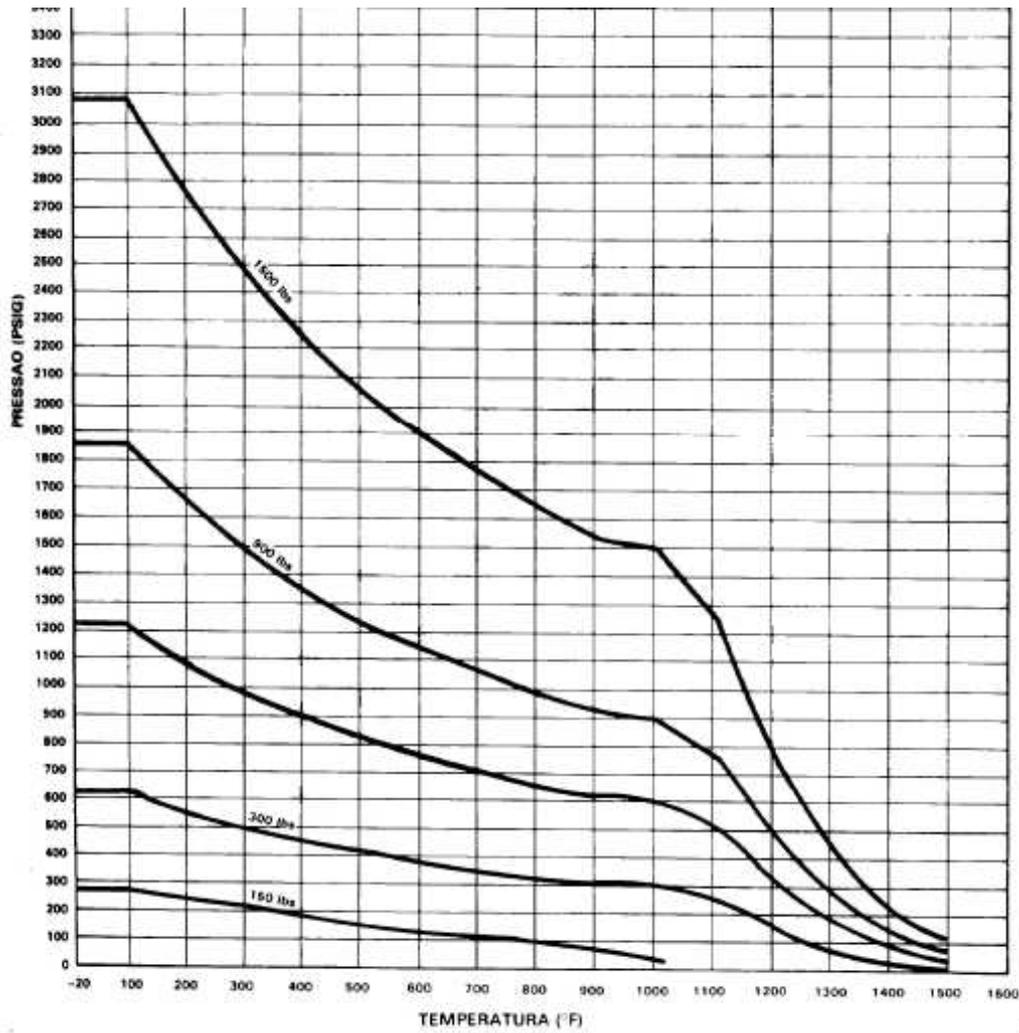


Figura 2.14 – Limites de pressão e temperatura do aço inox tipo 304 (Fonte: OLIVEIRA, 1999)

3. METODOLOGIA

3.1. Equacionamento

A metodologia presente nesse trabalho segue o equacionamento padrão utilizado para dimensionar válvulas que operam fluidos no estado líquido. A maioria dos autores trabalham com as mesmas relações matemáticas presentes na norma ISA-75.01-1985 (1995).

Além disso, vale ressaltar que existem diversos fatores de correção ou parâmetros que são obtidos de forma empírica. Isso equivale a dizer que é possível obtê-los por meio de tabelas, correlações ou até mesmo experimentos laboratoriais.

O dimensionamento é calculado por meio de uma equação principal, que relaciona vazão volumétrica (Q) com outras diversas variáveis. Uma delas é o Coeficiente de Vazão (C_V), um parâmetro muito importante no equacionamento, pois fornece a taxa da vazão que passa pela válvula em galões por minuto, quando o fluido passante é água a 60°F a uma pressão de 1 lb/in² (PERRY et al., 1997). As equações 4 e 5 representam o supracitado, para vazões volumétricas e mássicas (W), respectivamente.

$$Q = N_1 \cdot F_P \cdot F_Y \cdot F_R \cdot C_V \cdot \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{G}} \quad (4)$$

$$W = N_6 \cdot F_P \cdot F_Y \cdot F_R \cdot C_V \cdot \sqrt{(P_1 - P_2) \cdot \gamma} \quad (5)$$

Nas equações acima, P_1 é a pressão à montante (ou pressão de entrada da válvula) e P_2 é a pressão à jusante (ou pressão de saída da válvula). G é a densidade relativa, definida como a razão entre a densidade do fluido em questão e a densidade da água. N_1 e N_6 são constantes, que serão definidas na Tabela 3.1 e γ é a viscosidade dinâmica.

As variáveis F_P , F_R e F_Y são fatores de correção, relativos à geometria da tubulação adjacente, ao fator de Reynolds e ao fluxo crítico na válvula, respectivamente. Vale lembrar que este último engloba a geometria do corpo da válvula, bem como as propriedades do fluido em uma condição de fluxo bloqueado (OLIVEIRA, 1999). O fator F_Y pode ser definido pela Equação 6 e o fator F_P pela Equação 7.

Ainda em relação às Equações 4 e 5, vale dizer que elas englobam condições de escoamento turbulentos e não turbulentos. No primeiro caso, F_R pode ser considerado um, ao passo que, no segundo, F_P possui valor unitário (INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA, 1995).

Tabela 3.1 – Constantes numéricas para equações de vazão de líquido (Fonte: INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA, 1995)

Constante	Unidades usadas nas equações						
	N	w	q	p, ΔP	d, D	γ1	v
N ₁	0,0865	-	m ³ /h	kPa	-	-	-
	0,865	-	m ³ /h	bar	-	-	-
	1,00	-	gpm	psia	-	-	-
N ₂	0,00214	-	-	-	mm	-	-
	890	-	-	-	in	-	-
N ₄	76 000	-	m ³ /h	-	mm	-	centistokes
	17 300	-	gpm	-	in	-	centistokes
N ₆	2,73	kg/h	-	kPa	-	kg/m ³	-
	27,3	kg/h	-	bar	-	kg/m ³	-
	63,3	lb/h	-	psia	-	lb/ft ³	-

Para converter m³/s para centistokes, multiplicar m³/s por 10⁶.
Para converter centipoise para centistoke, dividir centipoise por G.

$$F_Y = F_L \cdot \sqrt{\frac{P_1 - F_F \cdot P_V}{P_1 - P_2}} \quad (6)$$

$$F_P = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum K}{N_2} \cdot \left(\frac{C_V}{d}\right)^2}} \quad (7)$$

O fator F_F é dito fator de pressão crítica do fluido, e pode ser representado pelas Equações 8 e 9.

$$F_F = \frac{P_{VC}}{P_V} \quad (8)$$

$$F_F = 0,96 - 0,28 \cdot \sqrt{\frac{P_V}{P_C}} \quad (9)$$

Na Equação 8, P_{VC} é a pressão na vena contrata, que pode ser definida como a região em que a área de escoamento é mínima, as “linhas de corrente” são retas e a pressão é uniforme através da seção do canal (FOX et al., 2014).

O fator F_L diz respeito à recuperação de pressão por parte do líquido, representado na Equação 10. Já o termo $\sum K$ se refere a quatro constantes, mostradas nas Equações de 11 a 14.

$$F_L = \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_{VC}}} \quad (10)$$

$$K_1 = 0,5 * \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^2 \quad (11)$$

$$K_2 = 1 * \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]^2 \quad (12)$$

$$K_{B1} = 1 - \left(\frac{d_1}{D}\right)^4 \quad (13)$$

$$K_{B2} = -1 + \left(\frac{d_2}{D}\right)^4 \quad (14)$$

Nas Equações 11 e 12, K_1 e K_2 representam, respectivamente, coeficientes geométricos de encaixe, na entrada e saída da válvula. Os parâmetros K_{B1} e K_{B2} representam coeficientes de Bernoulli, relacionados, também, a entrada e a saída da válvula. Quando os diâmetros de entrada e saída são iguais, o que é comum em grande parte das válvulas, K_{B1} e K_{B2} se anulam.

Se o fator F_p é menor que 1, deve-se empregar, no lugar de F_L , um outro parâmetro, chamado F_{LP} . Esse, nada mais é do que o produto entre os fatores F_L e F_p . A Equação 15 revela o resultado dessa operação. Isso acontece sempre que o diâmetro da válvula for menor que o da tubulação.

$$F_{LP} = \frac{1}{\sqrt{F_L^2 + \frac{K_i \cdot (C_V/d)^2}{F_L \cdot N_2}}} \quad (15)$$

Em que K_i é a soma de K_1 e K_{B1} . As variáveis d , D , d_1 e d_2 dizem respeito ao diâmetro interno da válvula, diâmetro da tubulação adjacente, diâmetro de entrada e diâmetro de saída da válvula.

Outra variável muito importante é a análise do número de Reynolds da válvula Re_V . Ele é importante pois o fator de Reynolds (F_R) influencia diretamente na capacidade da válvula. Além disso, a viscosidade exerce grande influência no tipo de escoamento do fluido, o que pode alterar os valores de Re_V e F_R significativamente. A Equação 16 representa o número de Reynolds da Válvula.

$$Re_V = \frac{N_4 \cdot F_d \cdot Q}{\gamma \sqrt{F_p \cdot C_V \cdot F_L}} \cdot \sqrt{\frac{(F_p \cdot F_L \cdot C_V)^2}{N_2 \cdot D^4} + 1} \quad (16)$$

A Figura 3.1 ilustra a relação entre o número de Reynolds e o fator de correção F_R . Já a Tabela 3.2 ilustra valores de alguns parâmetros característicos de cada tipo de válvula.

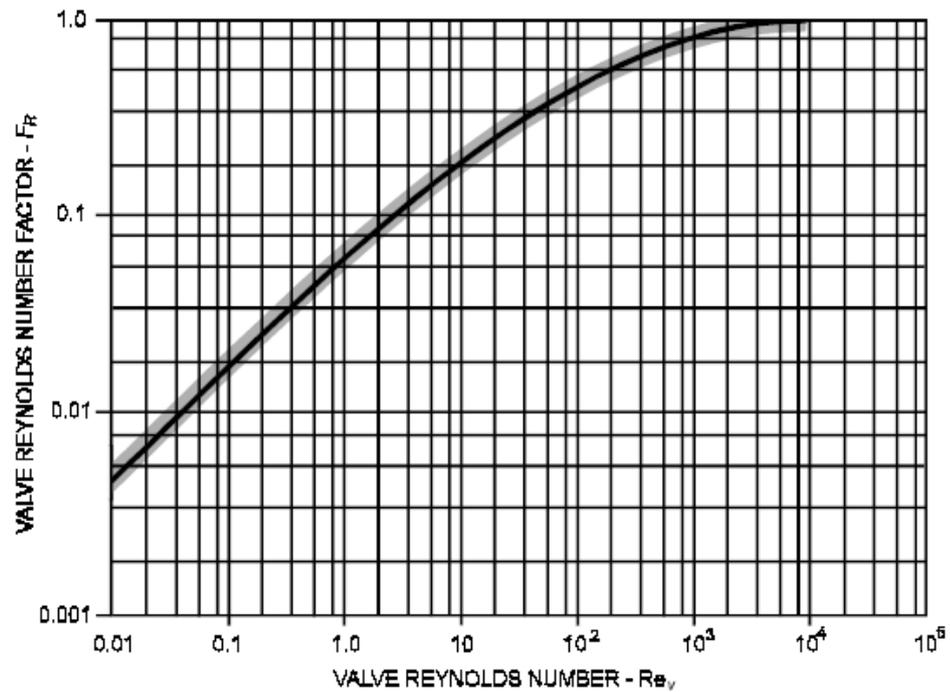


Figura 3.1 – Relação entre Re_v e F_R (Fonte: INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA, 1995)

Tabela 3.2 – Valores característicos de parâmetros de acordo com o tipo de válvula (Fonte: OLIVEIRA, 1999)

Tipo de Válvulas e de Internos	Direção do Fluxo	Diâmetro da Válvula igual ao Diâmetro da Linha ($D = d$)				$(D=2d)$	
		FL	XT	KC	Fd	FLP	XTP
Globo Sede Simples							
- Contorno	Abre	0,91	0,70	0,65	1,0	0,86	0,73
- Contorno	Fecha	0,89	0,63	0,68	1,0	0,81	0,57
- Em V	Qualquer	0,97	0,79	0,80	1,0	0,90	0,75
- Gaiola	Abre	0,90	0,75	0,65	1,0	0,84	0,75
- Gaiola	Fecha	0,87	0,70	0,64	1,0	0,79	0,71
Globo Sede Dupla							
- Contorno	-	0,89	0,70	0,70	0,71	0,82	0,71
- Em V	-	0,97	0,79	0,80	0,71	0,90	0,75
Angular							
- Gaiola	Abre	0,85	0,65	0,65	1,0	0,80	0,66
- Gaiola	Fecha	0,80	0,59	0,54	1,0	0,75	0,62
Bi-partida							
- Contorno	Abre	0,86	-	0,50	1,0	0,76	-
- Contorno	Fecha	0,86	-	0,52	1,0	0,76	-
Obturador Excêntrico							
	Abre	0,86	-	0,61	0,71	0,78	-
	Fecha	0,76	-	0,37	0,71	0,65	-
Esfera							
	-	0,55	0,15	0,28	1,0	0,47	0,42
Borboleta							
- 90°	-	0,63	0,33	0,30	0,71	0,65	0,33
- 60°	-	0,70	0,41	0,33	0,71	0,53	0,43

A partir dos valores encontrados para F_R , corrige-se o valor de C_V calculado com o auxílio da Equação 17. Isso é necessário apenas para baixos números de Reynolds – geralmente menores que 10.000.

$$C_{V\text{corrigido}} = \frac{C_V}{F_R} \quad (17)$$

Finalmente, a velocidade com que o fluido entra na válvula pode ser estimada pela Equação 18.

$$V = \frac{N_{10} \cdot Q}{D^2} \quad (18)$$

3.2. Cavitação

Para garantir que não haja cavitação no interior da válvula, é preciso analisar as condições de fluxo crítico. O coeficiente de cavitação incipiente (K_C) é a variável que prevê a cavitação na parte interna do equipamento. As válvulas geralmente apresentam um valor experimental, que varia de acordo com o fabricante e com o tipo da válvula. Esse valor deve ser maior do que o coeficiente teórico, demonstrado pela Equação 19.

$$K_C = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_V} \quad (19)$$

Nessa equação, P_V é a pressão de vapor. Para garantir que a cavitação não ocorra, O valor de K_C experimental deve ser, obrigatoriamente, maior que o valor do K_C teórico (dado pela Equação 19).

Uma outra maneira de perceber a possibilidade de cavitação em uma válvula é através da análise do fator F_Y . Definido na Equação 6, ele pode ser escrito em função de outras variáveis. A máxima pressão diferencial através de uma válvula pode ser representada pela Equação 20.

$$\Delta P_M = F_L^2 \cdot (P_1 - F_F \cdot P_V) \quad (20)$$

Substituindo a Equação 19 na Equação 6, tem-se um novo equacionamento para F_Y , mostrado na Equação 21.

$$F_Y = \sqrt{\frac{\Delta P_M}{\Delta P}} \quad (21)$$

É importante salientar que essa equação não é usada no dimensionamento, mas na previsão da cavitação. Quando F_Y é maior que 1, significa que a queda de pressão no sistema está dentro do máximo suportado – logo, o fluxo é não cavitante. Nesse caso o valor de F_Y será 1 no equacionamento.

Se o valor de F_Y é menor que 1, equivale a dizer que a queda de pressão dentro da válvula é maior que a permitida para a não ocorrência de cavitação – ou seja, existe um estágio de fluxo crítico, em que a queda de pressão deve ser limitada à máxima pressão diferencial (ΔP_M). Nesse caso, utiliza-se o valor de ΔP_M no equacionamento (ao invés de F_Y). É por essa razão que o valor de F_Y nunca é maior que 1.

3.3. Dimensionamento

O primeiro passo para dimensionar uma válvula de controle é conhecer bem a operação em questão. Deve-se ter informações suficientes acerca do fluido e das tubulações. As pressões de entrada e saída da válvula devem ser conhecidas, bem como a vazão de fluido passante, temperatura do fluido – e, aliada a ela, as propriedades físico químicas do mesmo, como pressão de vapor, viscosidade e densidade relativa.

O objetivo do dimensionamento é determinar os valores de C_V para essa operação e o diâmetro da válvula. Esses valores variam de acordo com o tipo de válvula escolhida. Conhecendo o processo e o fluido, já é possível eliminar alguns modelos que não corresponderiam bem ao panorama em questão. No entanto, ainda podem haver dúvidas quanto a essa escolha. Nesse caso, o melhor a ser feito é comparar os valores encontrados para cada válvula, juntamente ao preço, manutenção e outros fatores, já discutidos anteriormente.

O primeiro a ser feito é verificar as pressões crítica e de vapor do fluido. Em seguida, calcula-se o K_C teórico pela Equação 19, para eliminar válvulas que ofereçam a possibilidade de cavitação. Conhecidas as duas pressões citadas, calcula-se F_F pela Equação 9. A escolha do tipo de válvula possibilitará a obtenção de F_L e, com essa variável, calcula-se F_Y pela Equação 6. É importante salientar que os valores calculados de K_C e de F_Y devem ser coerentes, isto é, os dois devem apontar a não de cavitação. Outra observação pertinente é que o máximo valor de F_Y no equacionamento deve ser 1. Um valor maior que o unitário apenas confirma a não ocorrência da cavitação. A ordem de grandeza não deve ser considerada.

O valor de F_R deve ser arbitrado como 1 na primeira etapa do cálculo. De posse desses valores (até agora F_F , F_L , F_Y e F_R arbitrado), utiliza-se a Equação 4 (ou 5, se a vazão trabalhada for mássica). Ainda há duas variáveis a serem determinadas, que são F_P e C_V . Com isso, a equação deve ser simplificada e escrita em função do produto desses dois parâmetros.

O próximo passo é definir o diâmetro desejado para a válvula – que deve ser, no máximo, igual ao diâmetro da tubulação. Com esse diâmetro, é possível obter o valor de F_P , com o auxílio de tabelas fornecidas por fabricantes. Essas tabelas geralmente relacionam a razão C_V/d^2 com F_P .

Se F_P for menor que 1, o que geralmente acontece, é preciso corrigí-lo. Para isso, adota-se a variável F_{LP} em seu lugar, como mostrado na Equação 15.

Com o produto $F_P.C_V$, também é possível calcular o número de Reynolds da válvula, por meio da Equação 16. O valor dessa variável permite, com o auxílio do gráfico ilustrado na Figura 14, corrigir o valor de F_R . Se houver alguma correção nesse parâmetro, os valores de C_V serão, também, modificados. O novo cálculo de C_V é dado pela Equação 22, a seguir.

$$C_{V\text{CORRIGIDO}} = \frac{C_V}{F_{R\text{CORRIGIDO}}} \quad (22)$$

4. RESULTADOS

Para realizar o dimensionamento da válvula de forma simples e prática, foi desenvolvido um programa com o auxílio do software Scilab-6.0.1. O objetivo foi desenvolver todo o equacionamento descrito anteriormente e informar os valores encontrados para cada parâmetro.

Vale lembrar que para isso é necessário uma base de dados robusta e suficientemente confiável. Esse é, realmente, o maior empecilho para desenvolver uma ferramenta que seja capaz de comparar cenários reais com válvulas – pois os fabricantes, por motivos econômicos e competitivos, não revelam todas as informações de seus produtos.

Dito isso, os valores utilizados no algoritmo foram extraídos da norma ISA-75.01-1985 (1995).

4.1. Entrada de parâmetros

O primeiro passo para dimensionar uma válvula no programa é informar algumas propriedades do fluido. Primeiro, confirma-se ou não a presença de materiais particulados ou propriedades corrosivas no fluido.

Em seguida, é necessário entrar valores de vazão (em galões por minuto), de pressão à montante e a jusante da válvula (em psia) e a temperatura em graus *Fahrenheit*. Feito isso, deve-se informar as propriedades físico químicas que são função da temperatura de operação. São elas: pressão de vapor (em psia), viscosidade (em centipoise) e densidade relativa (adimensional). Também é necessário informar a pressão crítica do fluido – que pode ser definida como a pressão de vapor na temperatura crítica do mesmo.

Finalmente, informa-se os diâmetros da válvula e da tubulação, de modo obter todas as informações necessárias para o dimensionamento. É importante salientar que todo o equacionamento do software trabalha com bases de cálculo volumétricas. No entanto, é possível trabalhar com bases mássicas sem perdas de qualidade das soluções obtidas.

4.2. Procedimento de cálculo

O dimensionamento calcula o cenário projetado para dezenove tipos de válvula. São elas: globo sede simples *plug* simples, globo sede simples *plug* contornado normal aberta, globo sede simples *plug* contornado normal fechada, globo sede simples gaiola normal aberta, globo sede simples gaiola normal fechada, globo sede simples guiada pela lateral, globo sede dupla *plug* simples, globo sede dupla *plug* contornado, globo sede dupla guiada pela lateral, rotativa *plug*

esférico excêntrico normal aberta, rotativa *plug* esférico excêntrico normal fechada, angular *plug* contornado normal aberta, angular gaiola normal aberta, angular gaiola normal fechada, angular venturi, esfera segmentada, borboleta 60°, borboleta com lâmina flautada e borboleta 90°.

Cada válvula possui valores próprios de F_L , F_d e da razão C_V/d^2 , geralmente obtida por meio de um catálogo de válvulas. O valor de C_V obtido por essa relação indica o máximo valor de C_V para aquela válvula. Nesse primeiro momento, o valor de F_R é arbitrado unitário.

De posse desses valores, calculam-se F_f , F_p , F_Y e C_V – desta vez o valor de capacidade de vazão previsto para operação, que deve ser menor ou igual que o primeiro valor encontrado.

Com o valor de C_V calculado, calcula-se o número de Reynolds da válvula, que servirá para corrigir o valor de F_R . Com esse novo valor.

Se F_p for menor que 1, F_L deve ser corrigido pelo cálculo de F_{LP} . Finalmente, corrige-se o valor de C_V calculado, uma vez que todos os outros valores já foram corrigidos. A Figura 4.1 ilustra esse procedimento com mais clareza.

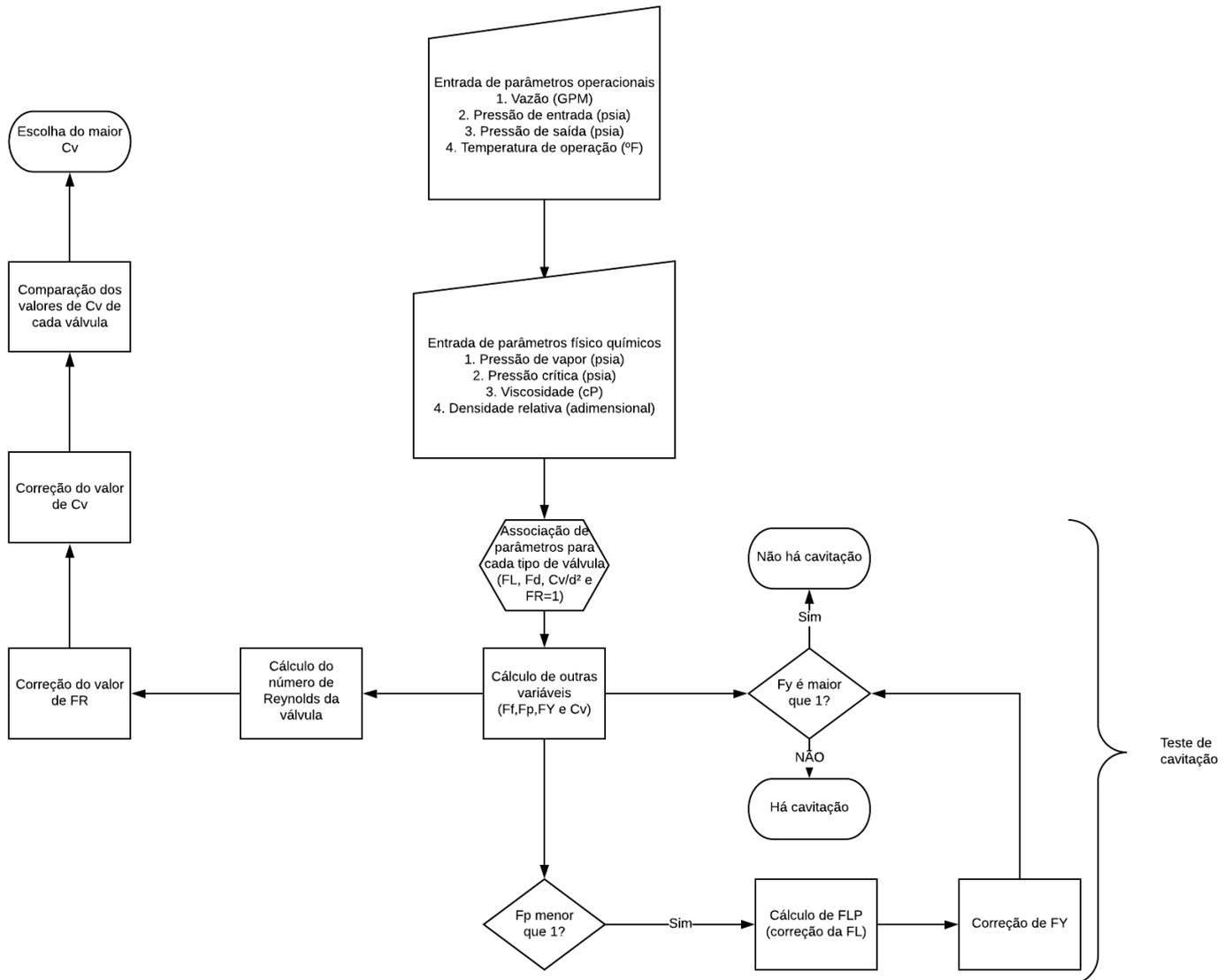


Figura 4.1 – Fluxograma demonstrativo do software

4.3. Estudos de caso

Foram realizados três estudos de caso: uma operação com um fluido de baixa viscosidade, uma operação com um fluido de alta viscosidade e uma operação em condições propícias à cavitação.

4.3.1. Estudo de Caso 1 - Operação com um fluido não viscoso

O fluido empregado nesse estudo foi a água e as condições de temperatura e pressão foram condições próximas da ambiente, ou seja, não houve nenhuma condição muito extrema que pudesse comprometer o sistema

A Tabela 4.1 ilustra as condições de operação desse estudo.

Tabela 4.1 – Condições de operação do estudo de caso 1

Variável	Valor
Fluido	Água
Vazão do sistema	250 GPM
Pressão de entrada (P_1)	75 psia
Pressão de Saída (P_2)	65 psia
Temperatura	60 °F
Densidade Relativa	1
Diâmetro da Linha (D)	4''
Diâmetro da válvula (d)	3''

Inseridos os valores de entrada, conforme mostra a Figura 4.2, deve-se informar as variáveis que são função da temperatura. A Figura 4.3 ilustra esse procedimento.

Figura 4.2 – Entrada de valores iniciais

Figura 4.3 – Variáveis dependentes da temperatura

O próximo passo é a seleção dos diâmetros da válvula e da linha, lembrando que o diâmetro da válvula sempre deve ser menor ou igual ao diâmetro da linha. A Figura 4.4 demonstra a escolha do diâmetro de acordo com as condições iniciais.

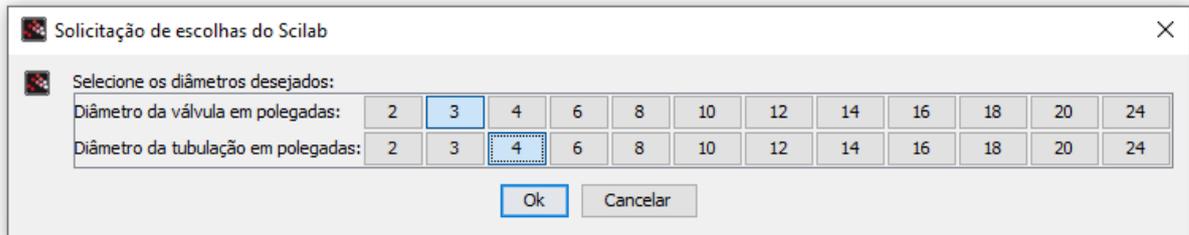


Figura 4.4 – Seleção dos diâmetros da válvula e da tubulação

De posse de todos esses valores, inicia-se o procedimento de cálculo. As Figuras 4.5 e 4.6 ilustram a caixa que traz as informações gerais e todos os 19 cenários possíveis (um para cada tipo de válvula que o programa comporta).

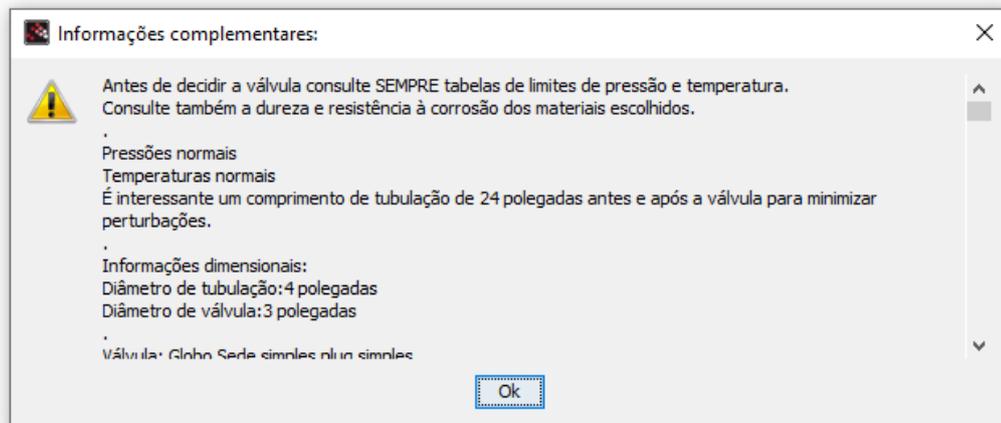


Figura 4.5 – Informações gerais sobre a operação

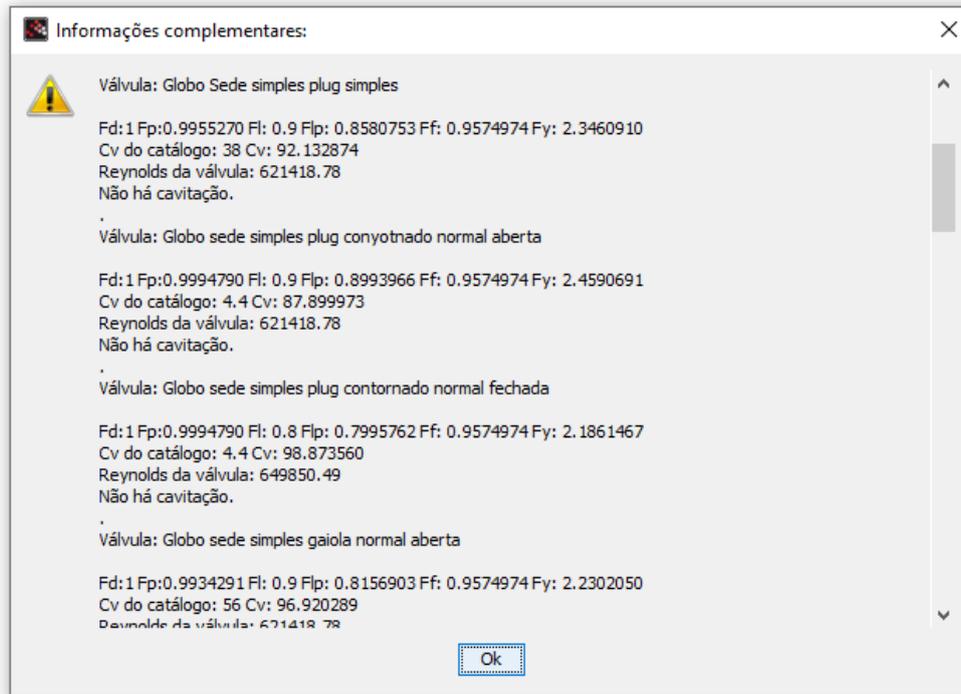


Figura 4.6 – Informações referentes a cada tipo de válvula

Todas as informações que aparecem nessa caixa estão reunidas na Tabela 4.2, mostrada a seguir.

Tabela 4.2 – Registro das informações obtidas pelo software

Informações Dimensionais							
Diâmetro da Tubulação				4 "			
Diâmetro da Válvula				3 "			
Válvula Globo Sede Simples <i>Plug Simples</i>				Válvula Globo Sede Simples <i>Plug Contornado Normal Aberta</i>			
F_d	1	C_v catálogo	85,5	F_d	1	C_v catálogo	9,9
F_p	0,9985	C_v calculado	90,6088	F_p	0,9998	C_v calculado	87,8787
F_L	0,9	Re	621418	F_L	0,9	Re	621418
F_{LP}	0,8725	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8996	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2			F_Y	2,4597		
Válvula Globo Sede Simples <i>Plug Contornado Normal Fechada</i>				Válvula Globo Sede Simples <i>Gaiola Normal Aberta</i>			
F_d	1	C_v catálogo	9,9	F_d	1	C_v catálogo	126
F_p	0,9998	C_v calculado	98,8546	F_p	0,9978	C_v calculado	93,7479
F_L	0,8	Re	649850	F_L	0,9	Re	621418
F_{LP}	0,7997	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8433	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,1865			F_Y	2,3057		
Válvula Globo Sede Simples <i>Gaiola Normal Fechada</i>				Válvula Globo Sede Simples <i>Guiada pela Lateral</i>			
F_d	1	C_v catálogo	144	F_d	1	C_v catálogo	9,9
F_p	0,9974	C_v calculado	100,2571	F_p	0,9998	C_v calculado	87,8787
F_L	0,85	Re	634856	F_L	0,9	Re	621418
F_{LP}	0,7885	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8996	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		

F_Y	2,1559			F_Y	2,3347		
Válvula Globo Sede Dupla Plug Simples				Válvula Globo Sede Dupla Plug Contornado			
F_d	0,7	C_v catálogo	112,5	F_d	0,7	C_v catálogo	117
F_p	0,9979	C_v calculado	92,5805	F_p	0,9979	C_v calculado	97,8539
F_L	0,9	Re	434993	F_L	0,85	Re	444399
F_{LP}	0,8539	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8079	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,3347			F_Y	2,2089		
Válvula Globo Sede Dupla Guiada pela Lateral				Válvula Rotativa Plug Esférico Excêntrico Normal Aberta			
F_d	0,7	C_v catálogo	126	F_d	1	C_v catálogo	108
F_p	0,9977	C_v calculado	93,7479	F_p	0,9981	C_v calculado	97,1523
F_L	0,9	Re	434993	F_L	0,85	Re	634856
F_{LP}	0,8433	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8137	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,3056			F_Y	2,2249		
Válvula Rotativa Plug Esférico Excêntrico Normal Fechada				Válvula Angular Plug Contornado Normal Aberta			
F_d	1	C_v catálogo	121,5	F_d	1	C_v catálogo	153
F_p	0,9978	C_v calculado	120,4733	F_p	0,9972	C_v calculado	96,4242
F_L	0,68	Re	693884,4	F_L	0,9	Re	621418
F_{LP}	0,6562	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8199	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	1,7942			F_Y	2,2417		
Válvula Angular Gaiola Normal Aberta				Válvula Angular Gaiola Normal Fechada			
F_d	1	C_v catálogo	108	F_d	1	C_v catálogo	108
F_p	0,998	C_v calculado	97,1523	F_p	0,9981	C_v calculado	102,7311
F_L	0,85	Re	634856	F_L	0,8	Re	649850
F_{LP}	0,8197	Cavitação	Não	F_{LP}	0,7696	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,2248			F_Y	2,104		
Válvula Angular Venturi				Válvula Esfera Segmentada			
F_d	1	C_v catálogo	198	F_d	1	C_v catálogo	225
F_p	0,9964	C_v calculado	166,2791	F_p	0,9959	C_v calculado	144,1578
F_L	0,5	Re	793046	F_L	0,6	Re	731667
F_{LP}	0,4754	Cavitação	Não	F_{LP}	0,5484	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	1,2999			F_Y	1,4994		
Válvula Borboleta 60°				Válvula Borboleta com Lâmina Flautada			
F_d	0,7	C_v catálogo	157,5	F_d	0,7	C_v catálogo	225
F_p	0,9972	C_v calculado	123,2575	F_p	0,996	C_v calculado	127,1828
F_L	0,68	Re	485719	F_L	0,7	Re	479930
F_{LP}	0,6414	Cavitação	Não	F_{LP}	0,6216	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	1,7536			F_Y	1,6995		
Válvula Borboleta 90°							
F_d	0,7	C_v catálogo	261				
F_p	0,9953	C_v calculado	148,2011				
F_L	0,6	Re	512188				
F_{LP}	0,5334	Cavitação	Não				
F_F	0,9575						
F_Y	1,4585						

As válvulas em que os valores de C_v estão em fundo amarelo são aquelas em que o C_v calculado, ou seja, o necessário para atender a operação, são maiores que o do catálogo – que é o máximo valor de C_v suportado pela válvula nessas condições. Isso representa uma inconsistência física e, portanto, essas válvulas não são consideradas na análise.

Geralmente, se escolhe a válvula com o maior C_v . Seguindo esse critério, a melhor válvula para essa operação seria a Válvula Angular Venturi.

4.3.2. Estudo de Caso 2 - Operação com fluido viscoso em pequenos diâmetros

Para esse estudo de caso e para o seguinte, foi escolhido um fluido com viscosidade consideravelmente maior que a da água. Trata-se do óleo combustível número 6. As informações de densidade relativa, viscosidade e temperatura foram baseados em Baumann (2009).

Tabela 4.3 – Condições de operação do estudo de caso 2

Variável	Valor
Fluido	Fuel Oil #6 (Bunker C)
Vazão do sistema	250 GPM
Pressão de entrada (P_1)	75 psia
Pressão de Saída (P_2)	65 psia
Temperatura	85 °F
Viscosidade	3998,4 cP
Densidade Relativa	0,98
Diâmetro da Linha (D)	4''
Diâmetro da válvula (d)	3''

O funcionamento do software e os passos a serem executados são os mesmos para todos os estudos de caso. Por isso, serão apresentados apenas os valores obtidos no final do procedimento, por meio da Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Registro das informações obtidas pelo software

Informações Dimensionais							
Diâmetro da Tubulação				4 ''			
Diâmetro da Válvula				3 ''			
Válvula Globo Sede Simples Plug Simples				Válvula Globo Sede Simples Plug Contornado Normal Aberta			
F_d	1	C_v catálogo	85,5	F_d	1	C_v catálogo	9,9
F_p	0,9984	C_v calculado	172,4964	F_p	0,9998	C_v calculado	167,2991
F_L	0,9	Re	136,1078	F_L	0,9	Re	136,1078
F_{LP}	0,8725	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8996	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_V	2,3856			F_V	2,4596		
Válvula Globo Sede Simples Plug Contornado Normal Fechada				Válvula Globo Sede Simples Gaiola Normal Aberta			
F_d	1	C_v catálogo	9,9	F_d	1	C_v catálogo	126
F_p	0,9998	C_v calculado	188,1944	F_p	0,9977	C_v calculado	178,4725
F_L	0,8	Re	142,3659	F_L	0,9	Re	136,1078
F_{LP}	0,7997	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8732	Cavitação	Não

F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,1865			F_Y	2,3056		
Válvula Globo Sede Simples Gaiola Normal Fechada				Válvula Globo Sede Simples Guiada pela Lateral			
F_d	1	C_V catálogo	144	F_d	1	C_V catálogo	9,9
F_P	0,9974	C_V calculado	190,8645	F_P	0,9998	C_V calculado	167,2995
F_L	0,85	Re	139,0661	F_L	0,9	Re	136,1078
F_{LP}	0,7885	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8996	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,1559			F_Y	2,4597		
Válvula Globo Sede Dupla Plug Simples				Válvula Globo Sede Dupla Plug Contornado			
F_d	0,7	C_V catálogo	112,5	F_d	0,7	C_V catálogo	117
F_P	0,9979	C_V calculado	208,2954	F_P	0,9979	C_V calculado	220,16
F_L	0,9	Re	95,2754	F_L	0,85	Re	97,3462
F_{LP}	0,8539	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8079	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,3347			F_Y	2,2089		
Válvula Globo Sede Dupla Guiada pela Lateral				Válvula Rotativa Plug Esférico Excêntrico Normal Aberta			
F_d	0,7	C_V catálogo	126	F_d	1	C_V catálogo	108
F_P	0,9977	C_V calculado	210,9221	F_P	0,998	C_V calculado	184,9536
F_L	0,9	Re	95,2754	F_L	0,85	Re	139,0661
F_{LP}	0,9432	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8137	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,3056			F_Y	2,2248		
Válvula Rotativa Plug Esférico Excêntrico Normal Fechada				Válvula Angular Plug Contornado Normal Aberta			
F_d	1	C_V catálogo	121,5	F_d	1	C_V catálogo	153
F_P	0,9978	C_V calculado	229,3509	F_P	0,9972	C_V calculado	183,5679
F_L	0,68	Re	152,0512	F_L	0,9	Re	136,1078
F_{LP}	0,6562	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8198	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	1,7941			F_Y	2,2416		
Válvula Angular Gaiola Normal Aberta				Válvula Angular Gaiola Normal Fechada			
F_d	1	C_V catálogo	108	F_d	1	C_V catálogo	108
F_P	0,998	C_V calculado	184,9536	F_P	0,998	C_V calculado	195,5742
F_L	0,85	Re	139,066	F_L	0,8	Re	142,3658
F_{LP}	0,8137	Cavitação	Não	F_{LP}	0,7695	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,2248			F_Y	2,104		
Válvula Angular Venturi				Válvula Esfera Segmentada			
F_d	1	C_V catálogo	198	F_d	1	C_V catálogo	225
F_P	0,9964	C_V calculado	293,9426	F_P	0,9959	C_V calculado	254,8374
F_L	0,5	Re	173,8415	F_L	0,6	Re	160,3632
F_{LP}	0,47554	Cavitação	Não	F_{LP}	0,5484	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	1,2999			F_Y	1,4994		
Válvula Borboleta 60°				Válvula Borboleta com Lâmina Flautada			
F_d	0,7	C_V catálogo	157	F_d	0,7	C_V catálogo	225
F_P	0,9972	C_V calculado	227,1352	F_P	0,9959	C_V calculado	286,1467
F_L	0,68	Re	106,4358	F_L	0,7	Re	105,163
F_{LP}	0,6413	Cavitação	Não	F_{LP}	0,6216	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	1,7536			F_Y	1,6995		
Válvula Borboleta 90°							
F_d	0,7	C_V catálogo	157,5				
F_P	0,9971	C_V calculado	277,3152				
F_L	0,68	Re	106,4358				
F_{LP}	0,6413	Cavitação	Não				
F_F	0,9575						
F_Y	1,7536						

Nesse estudo, percebe-se que o aumento da viscosidade reduziu significativamente os valores de Reynolds encontrados, o que já era esperado. Percebe-se também, que nenhum dos cenários é factível, provavelmente em função dos pequenos diâmetros selecionados – o que parece razoável.

O terceiro estudo de caso validará essa suposição.

4.3.3. Estudo de Caso 3 - Operação com fluido viscoso em maiores diâmetros

Aqui, o fluido continua o mesmo, bem como as condições. As diferenças estão nos diâmetros da válvula e tubulação, que têm o dobro do tamanho se comparados ao estudo anterior.

Tabela 4.5 – Condições de operação do estudo de caso 3

Variável	Valor
Fluido	Fuel Oil #6 (Bunker C)
Vazão do sistema	250 GPM
Pressão de entrada (P_1)	75 psia
Pressão de Saída (P_2)	65 psia
Temperatura	85 °F
Viscosidade	3998,4 cP
Densidade Relativa	0,98
Diâmetro da Linha (D)	8''
Diâmetro da válvula (d)	6''

Os resultados desse estudo são mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Registro das informações obtidas pelo software

Informações Dimensionais							
Diâmetro da Tubulação				8 ''			
Diâmetro da Válvula				6 ''			
Válvula Globo Sede Simples <i>Plug</i> Simples				Válvula Globo Sede Simples <i>Plug</i> Contornado Normal Aberta			
F_d	1	C_v catálogo	342	F_d	1	C_v catálogo	39,6
F_p	0,9984	C_v calculado	186,8717	F_p	0,9998	C_v calculado	181,2406
F_L	0,9	Re	128,972	F_L	0,9	Re	128,972
F_{LP}	0,8725	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8996	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,3856			F_Y	2,4596		
Válvula Globo Sede Simples <i>Plug</i> Contornado Normal Fechada				Válvula Globo Sede Simples Gaiola Normal Aberta			
F_d	1	C_v catálogo	39,6	F_d	1	C_v catálogo	504
F_p	0,9998	C_v calculado	188,1944	F_p	0,9977	C_v calculado	193,3452
F_L	0,8	Re	136,2167	F_L	0,9	Re	128,972
F_{LP}	0,7997	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8732	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,1865			F_Y	2,3056		

Válvula Globo Sede Simples Gaiola Normal Fechada				Válvula Globo Sede Simples Guiada pela Lateral			
F_d	1	C_v catálogo	576	F_d	1	C_v catálogo	39,6
F_p	0,9974	C_v calculado	190,8645	F_p	0,9998	C_v calculado	181,2406
F_L	0,85	Re	132,423	F_L	0,9	Re	128,972
F_{LP}	0,7885	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8996	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,1559			F_Y	2,4597		
Válvula Globo Sede Dupla Plug Simples				Válvula Globo Sede Dupla Plug Contornado			
F_d	0,7	C_v catálogo	450	F_d	0,7	C_v catálogo	468
F_p	0,9979	C_v calculado	229,1249	F_p	0,9979	C_v calculado	242,176
F_L	0,9	Re	90,2804	F_L	0,85	Re	92,6961
F_{LP}	0,8539	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8079	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,3347			F_Y	2,2089		
Válvula Globo Sede Dupla Guiada pela Lateral				Válvula Rotativa Plug Esférico Excêntrico Normal Aberta			
F_d	0,7	C_v catálogo	504	F_d	1	C_v catálogo	432
F_p	0,9977	C_v calculado	232,0143	F_p	0,998	C_v calculado	184,9536
F_L	0,9	Re	90,2804	F_L	0,85	Re	132,423
F_{LP}	0,9432	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8137	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,3056			F_Y	2,2248		
Válvula Rotativa Plug Esférico Excêntrico Normal Fechada				Válvula Angular Plug Contornado Normal Aberta			
F_d	1	C_v catálogo	486	F_d	1	C_v catálogo	612
F_p	0,9978	C_v calculado	229,3509	F_p	0,9972	C_v calculado	198,8647
F_L	0,68	Re	147,0833	F_L	0,9	Re	128,972
F_{LP}	0,6562	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8198	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	1,7941			F_Y	2,2416		
Válvula Angular Gaiola Normal Aberta				Válvula Angular Gaiola Normal Fechada			
F_d	1	C_v catálogo	432	F_d	1	C_v catálogo	432
F_p	0,998	C_v calculado	184,9536	F_p	0,998	C_v calculado	195,5742
F_L	0,85	Re	132,423	F_L	0,8	Re	136,2167
F_{LP}	0,8137	Cavitação	Não	F_{LP}	0,7695	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	2,2248			F_Y	2,104		
Válvula Angular Venturi				Válvula Esfera Segmentada			
F_d	1	C_v catálogo	792	F_d	1	C_v catálogo	900
F_p	0,9964	C_v calculado	293,9426	F_p	0,9959	C_v calculado	254,8374
F_L	0,5	Re	170,5865	F_L	0,6	Re	156,1699
F_{LP}	0,47554	Cavitação	Não	F_{LP}	0,5484	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	1,2999			F_Y	1,4994		
Válvula Borboleta 60°				Válvula Borboleta com Lâmina Flautada			
F_d	0,7	C_v catálogo	630	F_d	0,7	C_v catálogo	900
F_p	0,9972	C_v calculado	277,3152	F_p	0,9959	C_v calculado	286,1467
F_L	0,68	Re	102,9583	F_L	0,7	Re	101,5485
F_{LP}	0,6413	Cavitação	Não	F_{LP}	0,6216	Cavitação	Não
F_F	0,9575			F_F	0,9575		
F_Y	1,7536			F_Y	1,6995		
Válvula Borboleta 90°							
F_d	0,7	C_v catálogo	1044				
F_p	0,9971	C_v calculado	333,4354				
F_L	0,68	Re	109,3189				
F_{LP}	0,6413	Cavitação	Não				
F_F	0,9575						
F_Y	1,7536						

O estudo realmente mostrou que os diâmetros também exercem forte influencia no dimensionamento de fluidos viscosos. Seguindo o mesmo critério de antes, a válvula mais adequada para essa operação é a Válvula Borboleta 90°.

4.3.4. Possibilidade de Cavitação

O último estudo de caso diz respeito a possibilidade de cavitação no interior da válvula. Conforme foi discutido, a cavitação é um fenômeno muito agressivo para a válvula, que pode comprometer toda a operação.

A Tabela 4.7 ilustra uma situação em que há possibilidade de cavitação dentro da válvula e, conseqüentemente, a previsibilidade disso pelo dimensionamento.

Tabela 4.7 – Condições de operação do estudo de caso 4

Variável	Valor
Fluido	Água
Vazão do sistema	260 GPM
Pressão de entrada (P_1)	115 psia
Pressão de Saída (P_2)	60 psia
Temperatura	90 °F
Pressão de vapor	0,96 psia
Densidade Relativa	1
Diâmetro da Linha (D)	3''
Diâmetro da válvula (d)	2''

O software permanece com o mesmo funcionamento e os resultados são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Registro das informações obtidas pelo software

Informações Dimensionais							
Diâmetro da Tubulação				3 ''			
Diâmetro da Válvula				2 ''			
Válvula Globo Sede Simples Plug Simples				Válvula Globo Sede Simples Plug Contornado Normal Aberta			
F_d	1	C_v catálogo	38	F_d	1	C_v catálogo	4,4
F_p	0,9975	C_v calculado	42,43	F_p	0,9997	C_v calculado	40,8766
F_L	0,9	Re	906840	F_L	0,9	Re	906840
F_{LP}	0,8666	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8995	Cavitação	Não
F_F	0,9551			F_F	0,9551		
F_Y	1,309			F_Y	1,3587		
Válvula Globo Sede Simples Plug Contornado Normal Fechada				Válvula Globo Sede Simples Gaiola Normal Aberta			
F_d	1	C_v catálogo	4,4	F_d	1	C_v catálogo	56
F_p	0,9997	C_v calculado	45,9811	F_p	0,9963	C_v calculado	44,2042
F_L	0,8	Re	955721	F_L	0,9	Re	906840

F_{LP}	0,7996	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8318	Cavitação	Não
F_F	0,9551			F_F	0,9551		
F_Y	1,2079			F_Y	1,2564		
Válvula Globo Sede Simples Gaiola Normal Fechada				Válvula Globo Sede Simples Guiada pela Lateral			
F_d	1	C_V catálogo	64	F_d	1	C_V catálogo	4,4
F_P	0,9958	C_V calculado	47,3642	F_P	0,9997	C_V calculado	40,8766
F_L	0,85	Re	930085	F_L	0,9	Re	906840
F_{LP}	0,7763	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8995	Cavitação	Não
F_F	0,9551			F_F	0,9551		
F_Y	1,1726			F_Y	1,3587		
Válvula Globo Sede Dupla Plug Simples				Válvula Globo Sede Dupla Plug Contornado			
F_d	0,7	C_V catálogo	50	F_d	0,7	C_V catálogo	52
F_P	0,9967	C_V calculado	43,5458	F_P	0,9966	C_V calculado	46,0099
F_L	0,9	Re	634788	F_L	0,85	Re	651059
F_{LP}	0,8443	Cavitação	Não	F_{LP}	0,7991	Cavitação	Não
F_F	0,9551			F_F	0,9551		
F_Y	1,2754			F_Y	1,2071		
Válvula Globo Sede Dupla Guiada pela Lateral				Válvula Rotativa Plug Esférico Excêntrico Normal Aberta			
F_d	0,7	C_V catálogo	56	F_d	1	C_V catálogo	48
F_P	0,9963	C_V calculado	44,2042	F_P	0,9968	C_V calculado	45,6133
F_L	0,9	Re	634788	F_L	0,85	Re	930085
F_{LP}	0,8318	Cavitação	Não	F_{LP}	0,8061	Cavitação	Não
F_F	0,9551			F_F	0,9551		
F_Y	1,2564			F_Y	1,1276		
Válvula Rotativa Plug Esférico Excêntrico Normal Fechada				Válvula Angular Plug Contornado Normal Aberta			
F_d	1	C_V catálogo	54	F_d	1	C_V catálogo	68
F_P	0,9965	C_V calculado	56,4691	F_P	0,9956	C_V calculado	45,7076
F_L	0,68	Re	1029541	F_L	0,9	Re	906840
F_{LP}	0,6511	Cavitação	Sim	F_{LP}	0,8044	Cavitação	Não
F_F	0,9551			F_F	0,9551		
F_Y	0,9835			F_Y	1,2151		
Válvula Angular Gaiola Normal Aberta				Válvula Angular Gaiola Normal Fechada			
F_d	1	C_V catálogo	48	F_d	1	C_V catálogo	48
F_P	0,9968	C_V calculado	45,6133	F_P	0,9968	C_V calculado	48,185
F_L	0,85	Re	930085	F_L	0,8	Re	955721
F_{LP}	0,8061	Cavitação	Não	F_{LP}	0,763	Cavitação	Não
F_F	0,9551			F_F	0,9551		
F_Y	1,2176			F_Y	1,1526		
Válvula Angular Venturi				Válvula Esfera Segmentada			
F_d	1	C_V catálogo	88	F_d	1	C_V catálogo	100
F_P	0,9943	C_V calculado	7801759	F_P	0,9935	C_V calculado	68,2932
F_L	0,5	Re	1190532	F_L	0,6	Re	1091611
F_{LP}	0,4703	Cavitação	Sim	F_{LP}	0,5384	Cavitação	Sim
F_F	0,9551			F_F	0,9551		
F_Y	0,7104			F_Y	0,8132		
Válvula Borboleta 60°				Válvula Borboleta com Lâmina Flautada			
F_d	0,7	C_V catálogo	70	F_d	0,7	C_V catálogo	100
F_P	0,9954	C_V calculado	58,043	F_P	0,9935	C_V calculado	60,5606
F_L	0,68	Re	720679	F_L	0,7	Re	711075
F_{LP}	0,6334	Cavitação	Sim	F_{LP}	0,6071	Cavitação	Sim
F_F	0,9551			F_F	0,9551		
F_Y	0,9568			F_Y	0,9171		
Válvula Borboleta 90°							
F_d	0,7	C_V catálogo	116				
F_P	0,9925	C_V calculado	70,5543				
F_L	0,6	Re	764127,8				
F_{LP}	0,5211	Cavitação	Sim				
F_F	0,9551						
F_Y	0,7872						

Novamente tem-se a presença de válvulas com inconsistências físicas, mas o principal a ser analisado nesse estudo de caso é a ocorrência de cavitação em determinados tipos de válvulas – os campos coloridos de cinza no campo “Cavitação” demonstram as válvulas em que esse fenômeno acontece.

5. CONCLUSÃO

Dimensionar válvulas não é uma tarefa simples e, por várias vezes, isso foi provado no decorrer do procedimento. Desde as bases de dados até as equações a serem utilizadas, houve dificuldades que comprometeriam a aplicação do software em uma situação real.

Primeiramente, a falta de informações compromete em muito a confiabilidade de certos valores. Nos quatro estudos de caso, as válvulas globo sede simples *plug* contornado normal aberta e fechada demonstraram C_{Vs} calculados maiores que os C_{Vs} catalogados – o que é, no mínimo, questionável. Vale ressaltar que as informações de C_V catalogados foram obtidos de uma norma ISA e, mesmo assim, essa situação persistiu.

Além disso, sabe-se que existem amplas bases de dados sobre esse tipo de variável, mas elas são desenvolvidas por empresas privadas e, por motivos óbvios, o acesso a elas é restrito.

Ainda assim, o software atendeu às expectativas no intuito de prever comportamentos perigosos reais que podem acontecer em uma planta de engenharia. Foram testadas situações em condições mais próximas das condições ambiente, com fluidos pouco e muito viscosos, com diâmetros menores e maiores, e também situações com quedas de pressão mais acentuadas.

Em todas essas, os resultados se mostraram condizentes com o que se espera. Apesar da precisão numérica ser questionável, a análise qualitativa é válida, uma vez que nos mostra que é possível prever comportamentos que podem comprometer a boa operação de uma unidade industrial e que é possível, também, selecionar válvulas mais adequadas para evitar esse cenário – que foi, desde o princípio, o objetivo maior desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHBY, Michael. Materiais de Engenharia e suas Propriedades. *In*: ASHBY, Michael. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. [S. l.]: Elsevier Editora Ltda., 2012. cap. 3, p. 27-49. ISBN 978-85617-633-7.

ACTUATORS and Control. *In*: DUNN, William C. **Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control**. [S. l.]: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2005. cap. 11, p. 179-200.

BAUMANN, Hans D. Valve Sizing Made Easy. *In*: BAUMANN, Hans D. **Control Valve Primer: A User's Guide**. 4. ed. [S. l.]: ISA, 2009. cap. 5, p. 21-45.

EZEKIEL ENTERPRISES (New Smyrna Beach, FL). Valve Functions and basic parts. *In*: FUNDAMENTALS of Valves. Whashington DC: [s. n.], 1993. v. 2, cap. 1, p. 1-7.

FISHER CONTROLS INTERNATIONAL. Control Valve Selection. *In*: FISHER CONTROLS INTERNATIONAL. **Control Valve Handbook**. 3. ed. [S. l.: s. n.], 2001. cap. 5, p. 73-145.

FISHER CONTROLS INTERNATIONAL. Valve and Actuator Types. *In*: FISHER CONTROLS INTERNATIONAL. **Control Valve Handbook**. 3. ed. [S. l.: s. n.], 2001. cap. 3, p. 73-145.

FOX, Robert W. *et al.* Escoamento Interno Viscoso e Incompressível. *In*: FOX, Robert W. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. [S. l.]: LTC, 2014. cap. 8, p. 408-518.

GENTIL, Vicente. Modificações de Processo, de Propriedades de Metais e de Projetos. *In*: GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. cap. 20, p. 220-227.

GONÇALVES, Marcelo Giglio. Elementos Finais de Controle. *In*: GONÇALVES, Marcelo Giglio. **Monitoramento e Controle de Processos**. Brasília: [s. n.], 2003. p. 79-84.

INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA (ISA). **ISA-75.01-1985**: Flow Equations for Sizing Control Valves. 2. ed. atual. North Carolina: [s. n.], 1995. 52 p. ISBN 0-87664-899-5.

LIPTÁK, Béla G. Control Valve Selection and Sizing: Application and Selection of Control Valves. *In*: PROCESS Control and Optimization. 4. ed. New York: Taylor and Francis Group, 2006. v. 2, cap. 6, p. 1051-1086. ISBN 0-8493-1081-4.

MATHIAS, Artur Cardozo. Características de Vazão. *In*: MATHIAS, Artur Cardozo. **Válvulas**. 2. ed. rev. [S. l.]: Artliber, 2008. cap. 21, p. 439-452.

MCMILLAN, Gregory K.; CONSIDINE, Douglas M. Valves, servos, motors and robots. *In: MCMILLAN, Gregory K.; CONSIDINE, Douglas M. **Process/Industrial Instruments and Control Book***. 5. ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 1999. cap. 9, p. 901-1048. ISBN 0-07-012582-1.

OLIVEIRA, Adalberto Luiz de Lima. Tipos de Válvulas de Controle. *In: OLIVEIRA, Adalberto Luiz de Lima. **Instrumentação: Elementos Finais de Controle***. [S. l.: s. n.], 1999. cap. 3, p. 7-43.

OLIVEIRA, Adalberto Luiz de Lima. Tipos de Válvulas de Controle. *In: OLIVEIRA, Adalberto Luiz de Lima. **Instrumentação: Elementos Finais de Controle***. [S. l.: s. n.], 1999. cap. 3, p. 56-74.

OLIVEIRA, Adalberto Luiz de Lima. Instrumentação: Elementos Finais de Controle: Característica de vazão de válvulas de controle. *In: OLIVEIRA, Adalberto Luiz de Lima. **Instrumentação: Elementos Finais de Controle***: Característica de vazão de válvulas de controle. [S. l.: s. n.], 1999. cap. 6, p. 48-56.

PERRY, Robert H. *et al.* Process Control. *In: PERRY'S Chemical Engineers' Handbook*. 7. ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 1997. cap. 6, p. 452-505. ISBN 0-07-049841-5.

PERRY, Robert H. *et al.* Process Control. *In: PERRY'S Chemical Engineers' Handbook*. 7. ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 1997. cap. 8, p. 539-622. ISBN 0-07-049841-5.

RIBEIRO, Marco Antônio. Construção. *In: RIBEIRO, Marco Antônio. **Válvulas de Controle e Segurança***. 5. ed. Salvador, BA: [s. n.], 1999. cap. 1, p. 20-36.

RIBEIRO, Marco Antônio. Desempenho. *In: RIBEIRO, Marco Antônio. **Válvulas de Controle e Segurança***. 5. ed. Salvador, BA: [s. n.], 1999. cap. 2, p. 37-51.

RIBEIRO, Marco Antônio. Tipos. *In: RIBEIRO, Marco Antônio. **Válvulas de Controle e Segurança***. 5. ed. Salvador, BA: [s. n.], 1999. cap. 8, p. 148-183.

SEBORG, Dale E. *et al.* Process Dynamics and Control. *In: SEBORG, Dale E. *et al.* **Process Dynamics and Control***. 2. ed. Danvers, MA: John Wiley & Sons, Inc., 2004. cap. 9, p. 215-221.

SMITH, Peter; ZAPPE, R. W. Manual Valves. *In: VALVE Selection Handbook*. 5. ed. [S. l.]: Elsevier Inc., 2004. cap. 3, p. 47-151. ISBN 0-7506-7717-1.

SMITH, J. M. *et al.* Equilíbrio Líquido/Vapor: Introdução. *In: SMITH, J. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química***. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. cap. 10, p. 236-280.

TELLES, Pedro C. Silva. Válvulas. *In*: TELLES, Pedro C. Silva. **Tubulações Industriais: Materiais, projeto, montagem**. 10. ed. [S. l.]: LTC, 2005. cap. 4, p. 38-60.

TELLES, Pedro C. Silva. Tubos: Materiais, Processos de Fabricação, Normalização Dimensional. *In*: TELLES, Pedro C. Silva. **Tubulações Industriais: Materiais, projeto, montagem**. 10. ed. [S. l.]: LTC, 2005. cap. 2, p. 4-20.