

Rafael Batista Cardoso

Automação de uma válvula globo e levantamento de sua característica de vazão

Uberlândia – MG

4 de março de 2021

Rafael Batista Cardoso

Automação de uma válvula globo e levantamento de sua característica de vazão

Projeto de fim de curso, apresentado como exigência parcial para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Mecatrônica, à Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, da Universidade Federal de Uberlândia.

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecatrônica

Uberlândia – MG
4 de março de 2021

Rafael Batista Cardoso

Automação de uma válvula globo e levantamento de sua característica de vazão

Projeto de fim de curso, apresentado como exigência parcial para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Mecatrônica, à Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC, da Universidade Federal de Uberlândia.

Trabalho aprovado. Uberlândia – MG, XX de XXXXXXXX de XXXX:

**Msc. Werley Rocherter Borges
Ferreira**
Orientador

Professor
Dr. Valério Luiz Borges

Professor
Dr. Francisco José de Souza

Uberlândia – MG
4 de março de 2021

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, William e Juliana, que me apoiaram e incentivaram durante todas as dificuldades que só vocês sabem que passei ao longo dessa caminhada, vocês criaram as condições que me permitiram chegar aqui; a meu irmão, Samuel; e meus avós, Cismaura e Abadio.

Agradeço à minha namorada, Cássia Barros, por toda a ajuda, mas além disso, pelo apoio, paciência, e por me dar alegria e motivação para a vida.

Agradeço a todos os verdadeiros amigos que conquistei durante minha caminhada, em especial, Vitor Benicio, Rômulo Monteiro, Matheus Moura e Homero Rodrigues.

“Torna-te aquilo que tu és.”
(Friedrich Nietzsche)

Resumo

Uma válvula globo manual foi automatizada com um motor de passo bipolar NEMA e sua característica de vazão estudada. Foram utilizados para o controle do motor, uma placa *Arduíno Mega 2560* e um controlador *Wotiom WD-2440*. A característica da válvula foi obtida por meio de medidas da pressão de entrada e da vazão na válvula para vários valores de abertura e subsequente ajuste dos dados. A válvula apresentou característica de abertura rápida, entretanto, diferente do que se esperava para essa característica, a relação entre coeficiente de vazão e abertura é exponencial, não quadrática. Isso permitiu concluir que, diferente do que se é aceito por vários autores, uma característica de vazão de rápida abertura pode ter outras relações além da raiz quadrática. Características exponenciais podem ser mais adequadas que quadráticas para aplicações de emergência, como alívio de pressão e aplicações de controle de sistemas de combate à incêndio.

Palavras-chave: Motor de Passo, Arduino, Controle, Bipolar, NEMA, Globo, Válvula, Coeficiente de vazão, kv, característica de vazão.

Abstract

A manual globe valve was automated with a NEMA bipolar stepper motor and its flow characteristic was studied. An *Arduino Mega 2560* and a *Wotiom WD-2440* controller were used to control the stepper. The valve characteristic was obtained by measuring the inlet pressure and flow in the valve for various opening values and subsequent adjustment of the data. The valve has quick-opening characteristic, however, different from what was expected for this characteristic, the relationship between flow coefficient and opening is exponential, not quadratic. This means that, differently from what is accepted by several authors, an opening flow characteristic can have other relations besides the quadratic root. Exponential characteristics are more suitable than quadratic ones for emergency applications, such as pressure relief and control systems for fire fighting.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Terminologia dos elementos de uma válvula globo (PASETTI, 2018).	17
Figura 2 – Formas geométricas do obturador (PASETTI, 2018).	17
Figura 3 – Exemplos de curvas características de vazão (RIBEIRO, 1999).	18
Figura 4 – Camadas planas em um fluido escoando entre duas placas planas infinitas. As camadas adjacentes às placas são chamadas camadas limite. Retirada de: < https://trenchlesstechnology.com/what-is-viscosity/ >	19
Figura 5 – Forças de atrito entre camadas de um fluido. 'O processo de exercer uma força de atrito e diminuir a velocidade da camada adjacente, acontece repetidamente até que todo o fluido esteja dividido em várias camadas, cada qual um pouco mais rápida que a anterior. Retirada de: < https://trenchlesstechnology.com/what-is-viscosity/ >	20
Figura 6 – Separação em um escoamento externo. A inércia das partículas faz a camada limite se descolar da superfície, provocando um gradiente de pressão que faz algumas moléculas irem para a zona separada, onde se tem grande turbulência e perda de energia. Retirada de: < https://en.wikipedia-on-ipfs.org/wiki/Flow_separation.html >	21
Figura 7 – Exemplos de separação de escoamento.	21
Figura 8 – Modelo físico de um motor de passo. Fonte: (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2018)	26
Figura 9 – (a) Vista lateral do rotor de um motor híbrido (ERICSSON,). (b) Vista isométrica do rotor de um motor híbrido (CONDIT; JONES, 2004).	27
Figura 10 – Estator de um motor híbrido com duas fases. Retirada de (SCARPINO, 2016).	27
Figura 11 – Inicialmente a fase A está energizada. Um sinal do controlador troca a corrente da Fase A para a Fase B, causando uma rotação de 1 passo no rotor. Retirada de (CONDIT, JONES, 2004).	28
Figura 12 – Conexões de um motor de passo bipolar de duas fases. Os terminais de cada bobina do motor são disponibilizados para conexão. Os fios preto e verde levam aos terminais de bobinas da fase A e os fios azul e vermelho a terminais das bobinas da fase B. Retirada de (CONDIT, JONES, 2004).	29
Figura 13 – Sequência de controle no modo de passo completo com 1 fase ligada.	29
Figura 14 – À esquerda, a caldeira onde a válvula era utilizada. À direita, a válvula antes de sua limpeza.	31
Figura 15 – (a) Corpo da válvula após sua limpeza; (b) válvula pintada após a limpeza.	32

Figura 16 – (a) Modelagem do castelo no SolidWorks; (b) Castelo montado na válvula instalada.	32
Figura 17 – Motor Wotion WS23-0240-2040.	33
Figura 18 – Curva de torque do motor de passo. Fonte: Anexo	33
Figura 19 – Driver WD-2404	34
Figura 20 – Bancada utilizada para caracterização da válvula	36
Figura 21 – Valores de abertura e k_v das 6 medições	37
Figura 22 – Ajuste quadrático	38
Figura 23 – Ajuste dos dados com o modelo exponencial	39
Figura 24 – Exemplo de diferenciação entre <i>abertura rápida</i> e <i>característica quadrática</i> . Retirada de (RIBEIRO, 1999)	40

Lista de tabelas

Tabela 1 – Configuração das chaves do controlador	34
Tabela 2 – Valores de vazão em função da abertura da válvula para rotação de 25Hz	52
Tabela 3 – Valores de vazão em função da abertura da válvula para rotação de 35Hz	53
Tabela 4 – Valores de vazão em função da abertura da válvula para rotação de 40 Hz	54
Tabela 5 – Valores de vazão à pressão constante de 0.4 bar	55
Tabela 6 – Valores de vazão à pressão constante de 0.5 bar	56
Tabela 7 – Valores de vazão à pressão constante de 0.6 bar	57

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
3.1	Válvulas de controle	15
3.1.1	Estrutura de uma válvula de controle e a válvula globo	16
3.2	Conceitos Preliminares	18
3.2.1	Escoamentos interno e externo	18
3.2.2	Equação da continuidade	18
3.2.3	Viscosidade e Turbulência	19
3.3	Perda de Carga em válvulas	21
3.3.1	Coefficiente de Vazão	22
3.3.2	A característica de vazão de uma válvula	22
3.4	Motores de Passo	24
3.4.1	A física básico do motor de passo	25
3.4.2	O motor de passo híbrido	26
3.4.3	Motores bipolares	28
3.4.4	Controle por passos completos (" <i>Full step</i> ")	29
4	AUTOMAÇÃO DA VÁLVULA	30
4.1	Materiais utilizados	30
4.2	Montagem do sistema	31
4.2.1	A válvula globo	31
4.2.2	Castelo	31
4.3	Eletrônica e Programação	32
4.3.1	O motor de passo	32
4.3.1.1	Escolha da velocidade do motor	33
4.3.2	O controlador WD-2404	33
4.3.3	Sensores Fim de Curso	34
4.3.4	Montagem e código	35
4.4	Levantamento da característica de vazão da válvula	35
4.4.1	Ajuste dos dados por uma regressão não linear	36
5	CONCLUSÃO	41

	APÊNDICE A – CÓDIGO PRINCIPAL PARA O CONTROLE DO MOTOR DE PASSO	42
	APÊNDICE B – BIBLIOTECA COM IMPLEMENTAÇÃO DAS CLASSES E DOS MÉTODOS UTILIZADOS NO PROGRAMA PRINCIPAL	49
	APÊNDICE C – TABELAS COM OS VALORES DAS MEDIÇÕES DE VAZÃO E PRESSÃO	52
C.0.1	Medidas com a frequência constante	52
C.0.2	Medidas à pressão constante	55
	REFERÊNCIAS	58

1 Introdução

As válvulas correspondem a aproximadamente 5% dos custos totais na implementação de uma tubulação na indústria, em termos de números de unidades, perdem apenas para as conexões de tubulações (BOJORGE, 2017). É um negócio estável avaliado em 5.4 bilhões de dólares em 2019 (AlliedMarketResearch, 2020).

Existem diversos modelos de válvulas, cada qual destinado a algum objetivo específico, como retenção, sucção ou controle de vazão. A aplicação mais comum e importante se relaciona com o controle de processos, que é realizado por válvulas controladoras de vazão, ou simplesmente válvulas de controle (RIBEIRO, 1999). As válvulas de controle podem ser modulantes, operando em qualquer posição de abertura, ou válvulas destinadas a controle “*on/off*”, operando completamente aberta ou completamente fechada (MATHIAS, 2014). O controle da vazão é obtido por meio de uma obstrução que pode ser variada abrindo-se ou fechando-se a válvula. A operação de abertura ou fechamento pode ser manual, automatizada ou automática.

A obstrução inserida pela válvula de controle causa dissipação de energia mecânica, que se reflete em uma diminuição da pressão do fluido (WHITE, 2018). As implicações dessa perda de energia se tornam mais significativas devido à grande quantidade de válvulas presentes nas instalações. Um parâmetro de projeto utilizado para quantificação da perda de carga em válvulas é o *coeficiente de vazão*, k_v , que indica o quanto a válvula permite de vazão para um determinado diferencial de pressão. Com este diferencial constante, quanto menor a abertura da válvula (maior obstrução), menor o fluxo e portanto menor o coeficiente de vazão. A relação entre k_v e abertura é chamada de *característica de vazão* da válvula de controle, ou simplesmente *característica* da válvula (MATHIAS, 2014).

Os dados de testes de perda de pressão e vazão para uma grande variedade de válvulas e conexões são fruto do trabalho de numeroso pesquisadores. Estudos extensivos no campo tem sido feitos pelo Crane (RIBEIRO, 1999). Porém, devido ao tempo requerido e alto custo destes testes, é virtualmente impossível obter dados de testes para toda e qualquer válvula de controle (CRANE, 2007). Embora alguns fabricantes disponibilizem curvas características de suas válvulas de controle, devido ao grande número de modelos, não raramente encontrar-se-ão válvulas sem sua curva característica no catálogo, bem como fabricantes que não realizam testes para qualquer modelo. Além disso, podem existir situações em que se queira controlar variáveis de processo com uma válvula que inicialmente não foi projetada para controle, e o conhecimento da curva característica da válvula é indispensável neste caso.

Para o levantamento da característica de uma válvula é necessário que se conheça,

além de sua vazão e diferencial de pressão, sua abertura a cada instante, medida em porcentagem da abertura total. Se o movimento do obturador da válvula é realizado pela rotação de um eixo roscado, então essa válvula pode ser automatizada acoplando-se um motor a esse eixo. Como deslocamento angular de uma barra roscada é diretamente proporcional ao seu deslocamento linear, conhecendo-se a rotação do motor acoplado à válvula, sabe-se também seu deslocamento linear (abertura da válvula). Uma forma de se saber o deslocamento angular do motor sem a necessidade de um laço de realimentação é com o uso de motores de passo. Motores de passo realizam deslocamentos discretos bem definidos, chamados *passos*, o que possibilita o conhecimento de sua posição apenas pela contagem desses passos.

O uso de um motor como atuador para abrir e fechar a válvula requer a construção de uma estrutura que impeça o movimento de rotação da carcaça do motor e permita seu movimento linear (abertura e fechamento da válvula). Esta configuração pode ser obtida com o uso de guias lineares instaladas em uma estrutura engastada ao castelo da válvula, conforme será descrita adiante neste trabalho.

2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é a automação de uma válvula globo e obtenção de sua característica de vazão.

Os objetivos específicos são:

1. Programação e montagem de um sistema de controle de posição de um motor de passo para abertura e fechamento de válvulas.
2. Fabricação de um castelo para suporte e acoplamento do motor de passo à válvula.
3. Levantamento e análise da característica de vazão da válvula.

3 Fundamentos teóricos

3.1 Válvulas de controle

O termo *controle* se refere a métodos utilizados para forçar alguma variável de interesse em um determinado sistema a ter um valor específico desejado (OGATA, 2010). Nesse contexto, uma *malha de controle* consiste de todos os componentes físicos e configurações necessários para ajustar automaticamente o valor da variável de processo para o valor desejado. Os elementos básicos da malha de controle são o *sensor*, que mede o valor da variável, o *controlador*, que recebe a informação do sensor e realiza cálculos para verificar a necessidade de atuação no processo e o *elemento final de controle*, que é o último elemento do laço e atua diretamente no sistema, interagindo com a variável do processo.

As plantas industriais pneumáticas e hidráulicas modernas possuem malhas de controle (podendo chegar a milhares delas) projetadas para manter as variáveis de processo (pressão, vazão, posição, velocidade, etc.) dentro de uma faixa que assegure a qualidade do produto (Emerson Automation Solutions, 1980). Durante a operação, variações indesejáveis tendem a alterar a variável controlada, que é continuamente monitorada por sensores cujos sinais são lidos pelo controlador, o qual, se necessário, aciona o elemento final de controle de forma a corrigir o distúrbio. O elemento final de controle mais comum nesses casos é a válvula de controle (outros elementos finais de controle incluem variadores de velocidade, alimentadores e bombas (ACOSTA, 2012)), que é o elemento responsável pela manipulação do fluxo de matéria e energia (Emerson Automation Solutions, 1980; PASETTI, 2018).

Por mais de um quarto de século, várias entidades de padronização tentaram definir válvula de controle, mas nenhuma definição foi universalmente aceita (DRISKELL, 1983). Algumas definições, como em (British Standards Institute, 2005) exigem que a válvula possa ser operada remotamente, outras dizem que o sinal para o atuador da válvula deve partir de um controlador automático (H. O. Trerice Co, 2001). Porém, é aceito que a válvula de controle possa ser operada também por solenoide piloto (DRISKELL, 1983) ou mesmo manualmente (DRISKELL, 1983; Emerson Automation Solutions, 1980). Certamente, não há um limite claro entre uma válvula de controle e uma válvula de bloqueio com um atuador. Embora a válvula de bloqueio não seja usada para trabalhar em posição intermediária e a maioria das válvulas de controles não seja apropriada para dar vedação total, algumas válvulas de bloqueio podem modular e algumas válvulas de controle podem vedar (RIBEIRO, 1999). Mesmo assim, há um enfoque diferente para as duas. A válvula de controle é projetada e construída para operar modulando de modo contínuo e confiável com um mínimo de histerese e atrito no engastamento da haste, a vedação total é apenas uma opção extra (RIBEIRO, 1999). A válvula de bloqueio é

projetada e construída para operar ocasional ou periodicamente. Além disso uma válvula de bloqueio totalmente aberta deve ter o mínimo de resistência ao escoamento, ou seja, deve ser um bom condutor. Por outro lado, uma válvula de controle, para ser eficiente no trabalho de controlar o fluxo, deve ser projetada para resistir ao escoamento, mesmo que quase totalmente aberta (DRISKELL, 1983).

Feitas essas observações, no escopo deste trabalho uma válvula de controle é um dispositivo utilizado para modular a vazão de fluido em uma tubulação por meio de uma obstrução, a qual pode ser alterada para permitir mais ou menos vazão; a obstrução pode ser controlada de forma manual ou automática. Em outras palavras, as válvulas de controle são destinadas ao controle de fluxo, podendo trabalhar em qualquer posição de fechamento parcial (BOJORGE, 2017), fechamento total ou abertura total.

A válvula de controle é responsável por dispor, dissipar e distribuir energia no sistema e é inevitável a perda de carga durante sua atuação. Questões a respeito de energia e seu custo são de grande importância. Disso segue então que é essencial o correto dimensionamento da válvula para o bom funcionamento do sistema, aproveitamento da energia e redução nos custos (SINES,).

3.1.1 Estrutura de uma válvula de controle e a válvula globo

Existem milhares de fabricantes de válvulas no mundo, cada um dos quais tem uma ou mais patentes para fazer seus produtos únicos e mais competitivos no mercado. Alguns fabricantes chegam a ter centenas de patentes. Apesar dessa variedade, todas as válvulas possuem podem ser classificadas de acordo com algumas características comuns (DRISKELL, 1983).

Uma válvula de controle é formada tipicamente pelo corpo da válvula, o elemento de fechamento e o atuador (Emerson Automation Solutions, 1980). O corpo da válvula é essencialmente um vaso de pressão, através do qual o fluido escoar; o elemento de fechamento é acionado através de uma haste (ACOSTA, 2012). O atuador proporciona a força motriz responsável por abrir e fechar a válvula (Emerson Automation Solutions, 1980), e pode ser de forma manual, automática ou automatizada.

Apesar de existirem outras válvulas que em teoria podem ser utilizadas para controle, a válvula globo é a mais adequada e utilizada (PASETTI, 2018), sendo muitas vezes sinônimo de válvula de controle.

VÁLVULA GLOBO

A designação “globo” é um termo genérico que se refere a válvulas cujo corpo é uma cavidade globular, dentro da qual um *obturador* acoplado a uma haste se move linear e perpendicularmente a uma *sede* (DRISKELL, 1983; British Standards Institute, 2005). A sede da válvula é onde se assenta o obturador; a posição relativa entre o obturador e a

sede é que estabelece a abertura da válvula (PASETTI, 2018), normalmente medida em porcentagem. O conjunto formado pela haste, obturador e sede é chamado de *trim* (H. O. Trerice Co, 2001). O trim é frequentemente projetado para prover uma determinada relação funcional entre a abertura da válvula e sua vazão (DRISKELL, 1983). Essa relação será discutida nas seções seguintes.

A Figura 1 mostra uma válvula globo de sede simples, a que possui maior uso na indústria (DRISKELL, 1983; ACOSTA, 2012). Nessa Figura é mostrada a terminologia dos componentes básicos de uma válvula globo. O obturador pode assumir diferentes formas, algumas das quais são ilustradas na Figura 2. Cada uma dessas formas implicará em um tipo de dependência da vazão em função da abertura válvula. Os formatos típicos fornecem características linear, parabólica, exponencial e de abertura rápida (RIBEIRO, 1999), ilustradas graficamente na Figura 3. A relação entre a abertura da válvula e a vazão é chamada de característica de vazão e é sempre definida empiricamente(PASETTI, 2018).

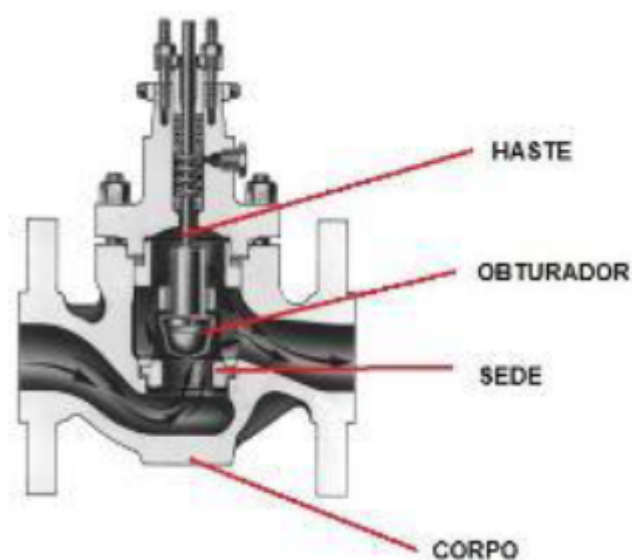


Figura 1 – Terminologia dos elementos de uma válvula globo (PASETTI, 2018).

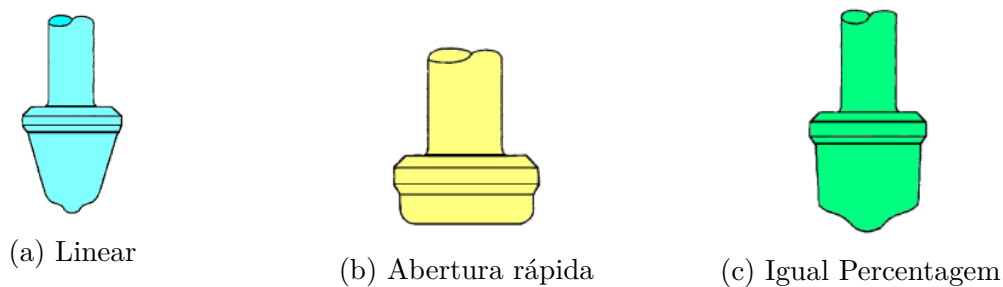


Figura 2 – Formas geométricas do obturador (PASETTI, 2018).

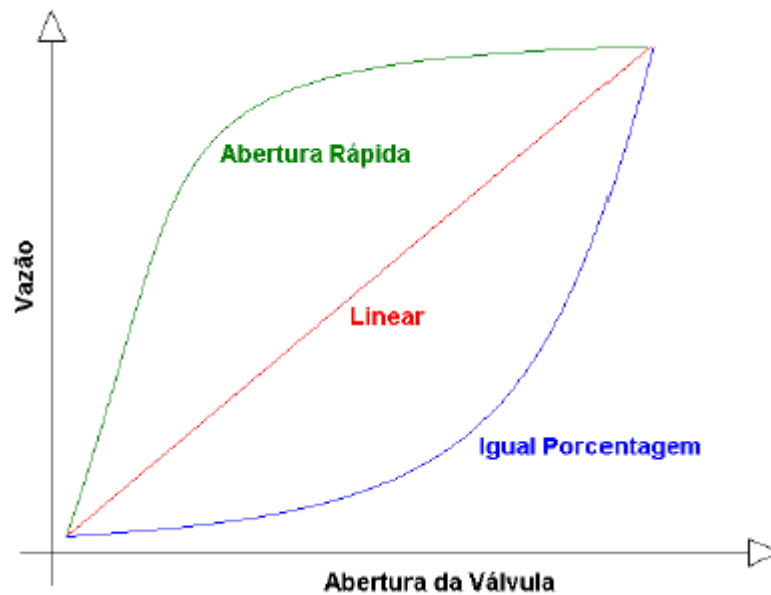


Figura 3 – Exemplos de curvas características de vazão (RIBEIRO, 1999).

3.2 Conceitos Preliminares

3.2.1 escoamentos interno e externo

Escoamentos completamente envoltos por superfícies sólidas são chamados *escoamentos internos* ou em *dutos*. Escoamentos sobre corpos imersos num fluido não contido são denominados *escoamentos externos* (Fox, Robert W.; Pritchard, Philip J.; McDonald, 2018). Neste texto, caso os adjetivos *interno* ou *externo* sejam omitidos, assume-se que se trata de escoamento interno.

Os dutos aqui considerados são sempre circulares e o termo *seção* é utilizado como sinônimo de *seção transversal*.

3.2.2 Equação da continuidade

A equação da continuidade no contexto da mecânica dos fluidos na sua forma diferencial é expressa por (Fox, Robert W.; Pritchard, Philip J.; McDonald, 2018):

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

onde ρ é a densidade do fluido considerado e V , sua velocidade.

Admitindo-se que um escoamento incompressível preenche completamente o duto pelo qual escoa, a Equação 3.1 se reduz a (Fox, Robert W.; Pritchard, Philip J.; McDonald, 2018),

$$Q_1 A_1 = Q_2 A_2 \quad (3.2)$$

onde Q e A são a vazão e a área da seção do tubo e os índices se referem a duas seções quaisquer. Portanto, a vazão, nas condições consideradas, não pode ser diferente entre as duas seções. Isso implica que qualquer perda de energia pelo fluido entre dois pontos deve causar a alteração de outra variável entre esses dois pontos. É possível mostrar (WHITE, 2018) que a perda de energia nessa situação ocasionará sempre diminuição na pressão estática do fluido.

3.2.3 Viscosidade e Turbulência

Para um fluido em movimento, uma *camada* é uma superfície formada pelo conjunto de moléculas do fluido cujas velocidades são iguais; a Figura 4 ilustra esse conceito. A camada que permanece em contato com a parede da tubulação é chamada de *camada limite*.

Se duas camadas adjacentes possuem velocidades diferentes, surge entre elas uma força de atrito (portanto oposta ao movimento) que faz com que a camada mais lenta “puxe” a mais rápida. Isso implica em uma resistência do fluido ao escoamento (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). A diferença de velocidade começa com a parede da tubulação, que exerce uma força de atrito nas moléculas em contato com ela, as quais, agora com a velocidade reduzida, exercem uma força de atrito nas moléculas de fluido adjacentes, e assim por diante, ocasionando a formação de camadas. A *viscosidade*, μ , é a grandeza física que quantifica essa resistência do fluido ao escoamento. Mais especificamente, a viscosidade determina a taxa de deformação do fluido quando sobre ele é aplicada uma tensão cisalhante (WHITE, 2018). A Figura 5 ilustra as forças de atrito em um fluido em escoamento.

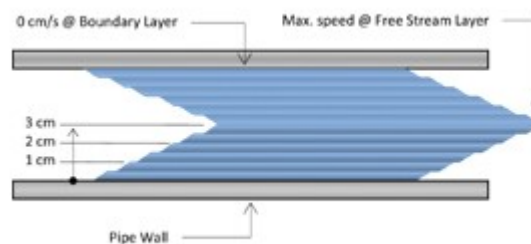


Figura 4 – Camadas planas em um fluido escoando entre duas placas planas infinitas. As camadas adjacentes às placas são chamadas camadas limite. Retirada de: <<https://trenchlesstechnology.com/what-is-viscosity/>>

A viscosidade leva a dois tipos (em relação ao campo de velocidades) de escoamento: *laminar* e *turbulento*. O escoamento é laminar se as partículas se movem de forma retilínea, formando camadas planas, ou *lâminas*, na direção do fluxo, como as ilustradas na Figura 4. O escoamento é turbulento se as partículas possuem trajetórias caóticas, devido a

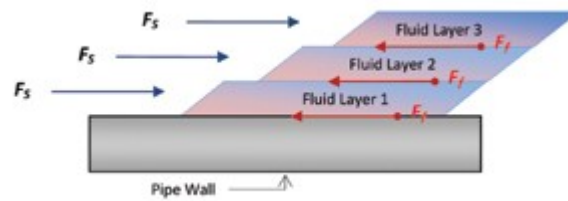


Figura 5 – Forças de atrito entre camadas de um fluido. O processo de exercer uma força de atrito e diminuir a velocidade da camada adjacente, acontece repetidamente até que todo o fluido esteja dividido em várias camadas, cada qual um pouco mais rápida que a anterior. Retirada de: <<https://trenchlesstechnology.com/what-is-viscosity/>>

flutuações aleatórias no campo de velocidades (Fox, Robert W.; Pritchard, Philip J.; McDonald, 2018).

Além das forças de atrito, estão presentes em um escoamento, forças inerciais (devidas à massa e à velocidade das partículas). A turbulência ocorre se as forças viscosas não são capazes de conter as forças inerciais perpendiculares ao movimento, que são causadas, por exemplo, por rugosidade na parede do tubo ou por vibrações (Engineering ToolBox, 2003; Fox, Robert W.; Pritchard, Philip J.; McDonald, 2018). Osborne Reynolds (1842-1912) descobriu que a razão entre as forças inerciais e viscosas é um bom indicativo para saber se o fluxo será laminar ou turbulento (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Essa razão é um número adimensional chamado *número de Reynolds*, Re ,

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (3.3)$$

onde ρ é a densidade do fluido, \bar{V} a velocidade média das partículas do fluido e D o diâmetro da tubulação.

A maioria dos escoamentos são turbulentos (ÇENGEL; CIMBALA, 2015) e esse é um fenômeno quase sempre indesejável, porém inevitável (Fox, Robert W.; Pritchard, Philip J.; McDonald, 2018). A flutuação aleatória das partículas do fluido no regime turbulento transfere momento e energia entre as linhas de fluxo; como resultado, o escoamento turbulento é associado a maiores viscosidade e transferência de calor (ÇENGEL; CIMBALA, 2015), o que implica em maior perda de energia, se comparado com um escoamento laminar nas mesmas condições. No contexto da mecânica dos fluidos, a perda de energia é usualmente expressa por unidade de massa do fluido, caso em que é chamada de *perda de carga*.

3.3 Perda de Carga em válvulas

Se um fluido escoar sobre uma superfície não retilínea, como a superfície curva da asa de um avião, a camada limite se separa da superfície, como na Figura 6. Este fenômeno é chamado *separação do escoamento* (ÇENGEL; CIMBALA, 2015) e cria uma área chamada de *zona separado*, onde há forte mistura das moléculas e dissipação de energia (Fox, Robert W.; Pritchard, Philip J.; McDonald, 2018). A separação é encontrada em outras situações, como em um alargamento da tubulação ou em válvulas. A Figura 6 mostra a formação de zonas separadas em algumas situações.

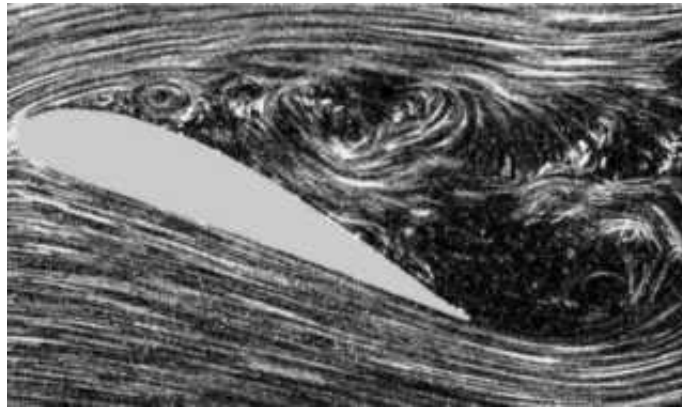
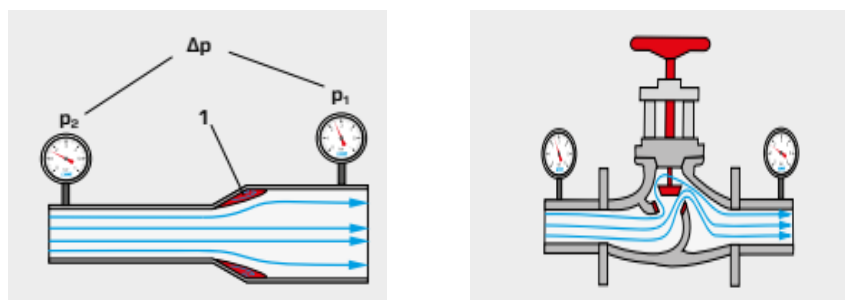


Figura 6 – Separação em um escoamento externo. A inércia das partículas faz a camada limite se descolar da superfície, provocando um gradiente de pressão que faz algumas moléculas irem para a zona separada, onde se tem grande turbulência e perda de energia. Retirada de: <https://en.wikipedia-on-ipfs.org/wiki/Flow_separation.html>

A energia dissipada em uma válvula se dá principalmente devido à separação do escoamento, que causa grande turbulência nas zonas separadas. Essas perdas, assim como as perdas causadas por outros acessórios, como curvas e variações de diâmetro, são denominadas de *perdas localizadas* e expressas pela Equação 3.4 (Fox, Robert W.; Pritchard, Philip J.; McDonald, 2018).



(a) Separação do escoamento em um alargamento da tubulação. (b) Separação do escoamento em um alargamento da tubulação.

Figura 7 – Exemplos de separação de escoamento.

$$\Delta P = K \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.4)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, v sua velocidade e K é chamado *coeficiente de resistência* ou *coeficiente de perda* e expressa a perda de energia do fluido ao passar pela válvula (CRANE, 2007).

3.3.1 Coeficiente de Vazão

A experiência mostrou que é conveniente em alguns ramos da indústria de válvula, principalmente para válvulas de controle, a utilização de outro coeficiente, denominado *coeficiente de vazão*, para quantificar a resistência de uma válvula (CRANE, 2007).

O coeficiente de vazão de uma válvula é representado por k_v e definido como: *a vazão de água, em $\frac{m^3}{h}$, entre 5 °C e 40 °C, através de uma válvula com queda de pressão de 1 bar ($10^5 Pa$)* (British Standards Institute, 2005). De posse de k_v , a vazão através da válvula pode ser obtida pela Equação 3.5 (British Standards Institute, 2005).

$$Q = k_v \sqrt{\frac{\Delta P}{d}} \quad (3.5)$$

onde d é a densidade relativa do fluido e ΔP o diferencial de pressão na válvula, medido em *bar*.

O uso do *coeficiente de vazão* foi introduzido pela empresa Masoneilan em 1944 e se tornou universalmente aceito como medida da capacidade de vazão de uma válvula (MASONEILAN,). À época, a capacidade de vazão foi definida em unidades não-SI como: *“o volume de água, medido em galões americanos, numa temperatura entre 40 °F e 100 °F, que flui por uma válvula durante 1 minuto, com queda de pressão de 1 psi”* (MASONEILAN,) e representado por C_v . A Equação 3.6 apresenta o fator de conversão entre C_v e K_v (British Standards Institute, 2005).

$$\frac{K_v}{C_v} = 0.865 \quad (3.6)$$

3.3.2 A característica de vazão de uma válvula

A capacidade de vazão de uma válvula depende de sua abertura, variando continuamente desde totalmente fechada até totalmente aberta (máximo k_v). A relação entre seu coeficiente de vazão (medido em percentagem do k_v máximo) e sua abertura (medida em percentagem da abertura máxima) é chamada de *característica inerente* e é determinada pelo perfil do obturador, as mais comuns são: linear, igual percentagem e abertura rápida (MATHIAS, 2014). A maioria das válvulas globo permite a troca do obturador para alterar

a característica da válvula (Emerson Automation Solutions, 1980). À relação entre a vazão e abertura da válvula quando ela está instalada em um sistema específico, onde a queda de pressão não é mantida constante, dá-se o nome de *característica instalada* (MATHIAS, 2014).

A planta na qual a válvula é inserida é composta por: transmissor, controlador, válvula, processo e algum outro componente. Essa combinação, na maioria dos casos, é não linear. A solução é inserir uma válvula cujo característica de vazão instalada combinada com o restante da malha, deixe a planta linear. Portanto, o objetivo da caracterização de vazão é auxiliar a compensar a não linearidade do processo (MATHIAS, 2014; RIBEIRO, 1999).

3.4 Motores de Passo

Um motor de passo é um dispositivo eletromecânico que converte um sinal elétrico em um movimento angular discreto (noção de passo) (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2018). Se um pulso elétrico é adequadamente aplicado ao motor, seu eixo rotaciona um determinado ângulo, chamado de *ângulo de passo* ou simplesmente *passo* (ERICSSON,). A maioria dos motores possui passos de 30°, 15°, 7.5°, 2.5° ou 1,8° (SCARPINO, 2016). O movimento ocorre pela interação de um campo magnético gerado por bobinas no estator com um ímã ou material ferromagnético, presente no rotor, o qual se movimenta de modo a se posicionar no menor estado de energia para o sistema (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2018).

Devido às suas simplicidade e exatidão no posicionamento, os motores de passo são populares entre os dispositivos elétricos que trabalham com controle de posição (SCARPINO, 2016) e medição (CONDIT; JONES, 2004). Relógios analógicos, robôs de manufatura, impressoras (2D e 3D), CNCs e bombas de infusão médicas são alguns dispositivos cujo funcionamento depende desses dispositivos (CONDIT; JONES, 2004; SCARPINO, 2016). Várias características, comuns a todos os motores de passo e atreladas à simplicidade e à precisão citadas acima, os tornam adequados para essas e outras aplicações. Essas características incluem (CONDIT; JONES, 2004; ERICSSON,)

1. **Ausência de escovas** - comutador e escova, dois componentes presentes em motores convencionais, são elementos muito propensos a falhas, além de criarem arcos elétricos que são indesejáveis ou perigosos a algumas aplicações.
2. **Independência da carga** - motores de passo se movimentam a uma determinada velocidade independente da carga de trabalho, desde que não ultrapasse o torque para o qual foi projetado.
3. **Posicionamento em malha aberta** - motores de passo se movem em deslocamentos discretos, ou passos. Desde que o motor funcione nas suas especificações de torque, a posição do eixo é conhecida a todo momento sem a necessidade de realimentação. O posicionamento em malha aberta faz os motores de passo mais simples e baratos para se controlar.
4. **Torque estático** - motores de passo possuem torque total de forma estática (se as bobinas forem mantidas energizadas).
5. **Boa exatidão e repetibilidade** - motores de passo possuem uma exatidão de 3% a 5% em cada passo e esse erro não é cumulativo de um passo para o outro.
6. - **Boa resposta** - excelente resposta à inicialização, à parada e à reversão do movimento.

7. **Baixa rotação** - é possível uma baixa rotação síncrona com a carga acoplada diretamente ao eixo, sem uso de redutor.

Essas características fazem os motores de passo serem adequados para (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2018),

1. Situações em que um controle de malha aberta é mais adequado.
2. Para operações em que há grande alternância do sentido de rotação.
3. Operações de avanço e para frequentes.
4. Quando a taxa cíclica é relativamente pequena
5. Sempre que as posições devem ser mantidas por um determinado tempo (torque estático).

OPERAÇÃO EM MALHA ABERTA

A principal vantagem com respeito ao controle é a possibilidade de ser operado em malha aberta e com boa exatidão (ERICSSON,). A malha aberta elimina a necessidade de sensores e outros dispositivos caros utilizados para realimentação, como encoders ópticos. A posição angular do eixo é obtida pela contagem do número de pulsos elétricos enviados ao motor¹ (ERICSSON,) .

3.4.1 A física básico do motor de passo

Para se compreender bem os parâmetro que influenciam a performance de um motor de passo é necessário ter conhecimento a respeito da física que o governa. A Figura 19 mostra um modelo físico desse dispositivo. Nete modelo, o motor é representado por uma resistência elétrica R (fios das bobinas), uma indutância L (bobinas) e um fator $k_t\omega$, que representa o torque e a velocidade do motor (tensão utilizada para rotacionar uma carga a uma certa velocidade). A tensão aplicada ao motor e a corrente que o percorre são representadas por U e I , respectivamente.

A Equação 3.7 expressa o comportamento do motor representado na Figura 19 (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2018).

$$U = RI + k_t\omega(t) + L\frac{dI}{dt} \quad (3.7)$$

onde:

¹ É assumido que não ocorre perda de passos, evento no qual um sinal é enviado ao motor, mas o movimento não é realizado. A perda de passos pode ocorrer se as especificações do motor não forem seguidas e se um controlado de qualidade ruim for utilizado.

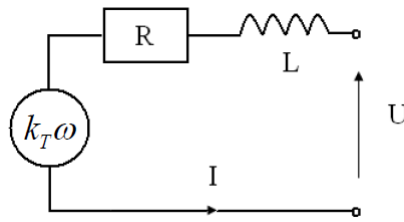


Figura 8 – Modelo físico de um motor de passo. Fonte: (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2018)

- RI é a queda de tensão no resistor;
- $k_t\omega(t)$ é a tensão para compensar a força contra-eletromotriz (k_t é a constante de torque e $\omega(t)$ a velocidade);
- $L\frac{dI}{dt}$ a tensão armazenada na bobina.

O torque disponibilizado pelo motor é diretamente proporcional à corrente, que é expressa pela Equação 3.8 (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2018).

$$I = \frac{U - k_t\omega(t) - L\frac{dI}{dt}}{R} \Rightarrow I = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) - \frac{k_t\omega(t)}{R} \quad (3.8)$$

A Figura mostra a corrente nas bobinas em função do tempo para um caso ideal onde o torque no eixo é nulo (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2018). A presença do indutor cria um atraso para que a corrente alcance o valor máximo. Esse atraso se reflete em um tempo de espera mínimo entre duas comutações consecutivas das bobinas para que se tenha tempo para a corrente alcançar seu máximo valor e conseqüentemente o motor disponibilizar o torque máximo. Quanto maior a velocidade, menor tempo entre comutações e menor o valor da corrente que se atinge, o que resulta em uma diminuição no torque dinâmico do sistema. A curva que relaciona torque e velocidade é fornecida pelo fabricante na folha de dados do motor.

3.4.2 O motor de passo híbrido

Os motores de passo podem ser de três tipos quanto às suas características construtivas (CONDIT; JONES, 2004): motores ímã permanente, motores relutância variável e motores híbridos. Motores ímã permanente são baratos (SCARPINO, 2016), mas possuem uma resolução angular pobre (tipicamente 7.5° e 15°) (ERICSSON,), motores relutância variável possuem excelente resolução angular, mas torque tão baixo que os tornam inadequados para grande parte dos sistemas (SCARPINO, 2016). Os motores híbridos são uma combinação dos dois primeiros modelos, possuindo um bom torque e uma boa resolução angular.

O rotor deste motor é dentado e possui um ímã axialmente magnetizado e concêntrico com o eixo (CONDIT; JONES, 2004). Os dentes do rotor proveem um caminho com menor relutância para o fluxo magnético e são responsáveis pela boa resolução angular. O campo magnético do ímã, em adição ao campo gerado pelas bobinas, é responsável pelo alto torque gerado por este motor (SCARPINO, 2016; CONDIT; JONES, 2004). A Figura 9 ilustra um rotor de um motor de passo híbrido e a Figura 10, o estator de um motor híbrido de duas fases (A e B).

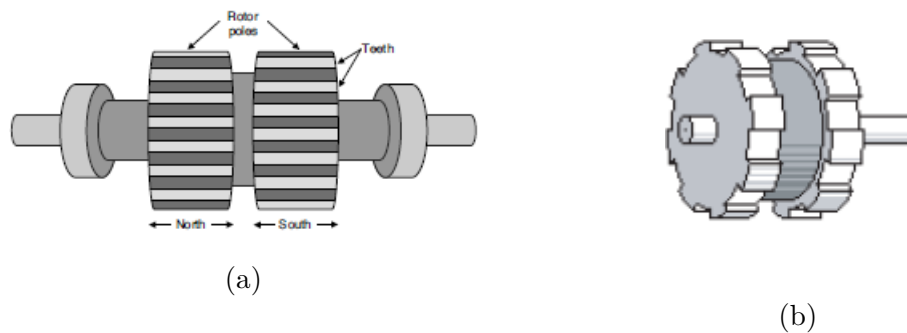


Figura 9 – (a) Vista lateral do rotor de um motor híbrido (ERICSSON,). (b) Vista isométrica do rotor de um motor híbrido (CONDIT; JONES, 2004).

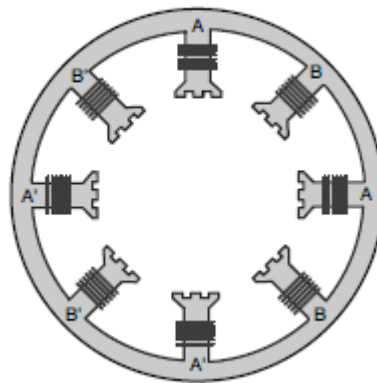


Figura 10 – Estator de um motor híbrido com duas fases. Retirada de (SCARPINO, 2016).

O rotor da Figura 10 possui dois polos magnéticos salientes e axialmente dispostos que possuem dentes radialmente defasados de meio passo (OMEGA Engineering, 2018). Um ímã circular separa os dois polos, através dos quais passa um fluxo magnético constante (OMEGA Engineering, 2018). O estator é feito de aço laminado. O motor mostrado na Figura 10 possui 8 enrolamentos arranjados em dois grupos de quatro enrolamentos em série. Cada grupo é chamado de *fase*.

Os polos do rotor são magnetizados de tal forma que um seja polo sul e o outro, norte. Cada polo possui seus dentes, que são dispostos de tal forma que os dentes de um fique entre os dentes do outro. O ângulo entre dois dentes consecutivos, um de cada polo,

define o passo do motor; quanto maior a quantidade de dentes, melhor a resolução angular. O motor da Figura 9 possui dois polos, mas outros motores podem possuir mais. Aumentar a quantidade de polos aumenta o torque do motor, mas também aumenta seu tamanho e seu peso (SCARPINO, 2016).

No estator da Figura 10, cada enrolamento possui 3 dentes; em um motor real pode haver muito mais (SCARPINO, 2016). Se uma bobina é energizada para produzir um polo norte, seus dentes atraem os do polo sul do rotor e vice-versa.

OPERAÇÃO

Durante a operação, cada fase do motor recebe uma corrente positiva, negativa ou não recebe corrente. Quando um enrolamento é energizado, seus dentes atraem os dentes de um dos polos do rotor. Após a comutação das fases, o enrolamento adjacente é energizado e o rotor gira para alinhar seus dentes com os do novo enrolamento energizado. A Figura 11 ilustra uma comutação entre fases e a rotação de 1 passo.

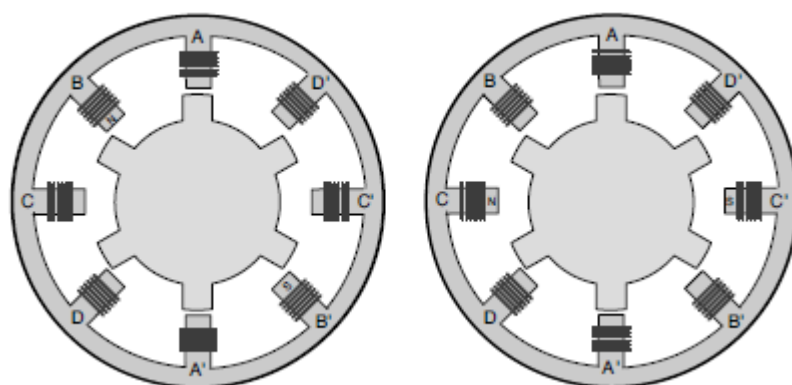


Figura 11 – Inicialmente a fase A está energizada. Um sinal do controlador troca a corrente da Fase A para a Fase B, causando uma rotação de 1 passo no rotor. Retirada de (CONDIT, JONES, 2004).

3.4.3 Motores bipolares

Um motor de passo *bipolar* de duas fases possui 4 fios disponíveis, conectados internamente como mostrado na Figura 12 (CONDIT; JONES, 2004).

Os fios de motores bipolares geralmente são encontrados nas cores mostradas na Figura 12, entretanto isso não segue qualquer convenção (SCARPINO, 2016). Se não for conhecida a disposição dos fios, o primeiro lugar a se consultar é sua folha de dados, normalmente disponibilizadas pelo fabricante. Caso não seja possível, pode-se determinar as fases com o uso de um ohmímetro.

A corrente elétrica nas bobinas de um motor em ligação bipolar é bidirecional (pode fluir nos dois sentidos). Na Figura 12, se a corrente vai do fio preto para o verde, A assume polo norte e A', sul; caso contrário, A assume polo sul e A', norte. Normalmente, uma

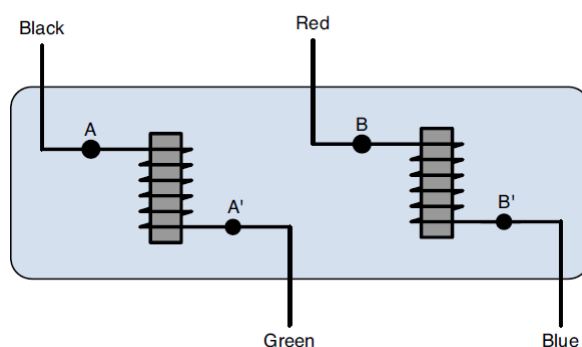


Figura 12 – Conexões de um motor de passo bipolar de duas fases. Os terminais de cada bobina do motor são disponibilizados para conexão. Os fios preto e verde levam aos terminais de bobinas da fase A e os fios azul e vermelho a terminais das bobinas da fase B. Retirada de (CONDIT, JONES, 2004).

ponte H é utilizada para se inverter o sentido da corrente na bobina (CONDIT; JONES, 2004).

3.4.4 Controle por passos completos (“Full step”)

Existem técnicas, chamadas de *modos de controle*, que melhoram a resolução angular dos motores de passo, diminuindo, entretanto, seu torque (SCARPINO, 2016). O modo de *passos completos*, ou “Full step”, é o modo de controle que não altera sua resolução angular, aproveitando ao máximo o torque disponível (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2018). Outros possíveis modos são o de *meio passo* e *micropassos*.

No modo “full step” cada fase do motor é energizada por vez, portanto as fases A e B nunca recebem corrente ao mesmo tempo. A Figura 13 mostra como é a sequência de sinais do controlador quando opera neste modo.

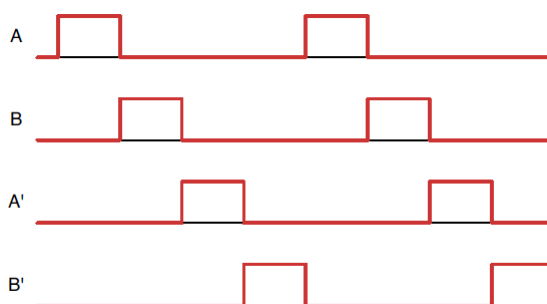


Figura 13 – Sequência de controle no modo de passo completo com 1 fase ligada.

A cada sinal de controle (comutação das fases), o rotor gira 1 passo pra se alinhar com a nova fase energizada, conforme ilustrado na Figura 11.

4 Automação da válvula

4.1 Materiais utilizados

1. Válvula Globo 1"
2. Chapa de aço inoxidável;
3. Parafusos e porcas diversos;
4. Barra roscada em aço inoxidável;
5. Acoplamento flexível 5 mm/8 mm;
6. 2 patins lineares 15 mm;
7. 2 trilhos para patim linear 15 mm;
8. Lixadeira com discos de corte e “*flap*”;
9. Furadeira de bancada;
10. Prensa dobradeira de chapas;
11. Motor de passo Wotiom WS23-0240-2040;
12. Controlador Wotiom WD-2440;
13. 2 Fontes 12V;
14. Arduino Mega 2560;
15. 2 sensores fim de curso;
16. 2 botões normalmente abertos;
17. Display OLED 128x32;
18. Conectores (“*jumper*s”);

4.2 Montagem do sistema

4.2.1 A válvula globo

A válvula globo utilizada foi concedida como doação para o Laboratório de Fenômenos de Transporte da Universidade Federal de Uberlândia. A válvula era utilizada em uma caldeira flamotubular para descarga de fundo e não se encontrava em condições de uso devido à grande quantidade de sujeira e ferrugem. A Figura 14 mostra a caldeira de onde a válvula foi retirada e sua condição inicial. Foi realizada uma reforma da válvula, procedendo com sua limpeza, pintura e substituição das gaxetas de vedação, chegando-se ao resultado final, mostrado na Figura 15.



Figura 14 – À esquerda, a caldeira onde a válvula era utilizada. À direita, a válvula antes de sua limpeza.

O motor de passo foi acoplado ao eixo da válvula por meio de um acoplamento flexível $5mm/8mm$. Para isso, o volante da válvula foi retirado e um rebaixo de 8 mm foi feito no eixo da válvula.

4.2.2 Castelo

Devido ao movimento linear que o motor sofre ao abrir ou fechar a válvula, um sistema para travamento da rotação do motor e permissão do movimento linear foi fabricado. Nessa etapa, foi seguida a metodologia de projeto sugerida por Norton, em seu livro *Projeto de Máquinas*, listando uma gama de possibilidades construtivas, algumas das quais chegaram a ser fabricadas e testadas, até se chegar ao modelo final, apresentado na Figura ???. O castelo é composto de dois patins acoplados a trilhos, compondo um

guia linear, que trava o movimento de rotação do motor ao mesmo tempo que permite o movimento de subida (abertura) e descida (fechamento).

Na fabricação deste item, foi utilizada uma prensa dobradeira de chapas, furadeira de bancada, lixadeira e chicote para polimento das chapas de aço inox.

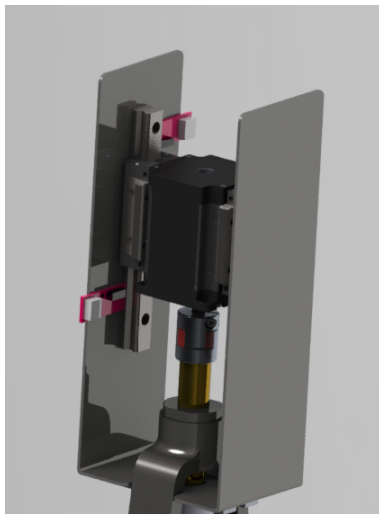


(a)



(b)

Figura 15 – (a) Corpo da válvula após sua limpeza; (b) válvula pintada após a limpeza.



(a)



(b)

Figura 16 – (a) Modelagem do castelo no SolidWorks; (b) Castelo montado na válvula instalada.

4.3 Eletrônica e Programação

4.3.1 O motor de passo

O motor de passo utilizado é um NEMA 23 bipolar e possui um torque estático de $24 \text{ kgf} \times \text{cm}$, caso em que a corrente nas bobinas deve ser de 2 A. A Figura 17 este motor.



Figura 17 – Motor Wotion WS23-0240-2040.

4.3.1.1 Escolha da velocidade do motor

A velocidade de trabalho do motor de passo foi escolhida utilizando-se sua curva *torque × velocidade*, disponibilizada na sua folha de dados e reproduzida da Figura 18. A aplicação não requer alta velocidade, por isso optou-se por uma velocidade que produz um torque próximo ao torque estático do motor. Foi utilizada uma velocidade de $30rpm$. Essa velocidade é configurada via software, implementando um atraso entre dois passos consecutivos do motor.

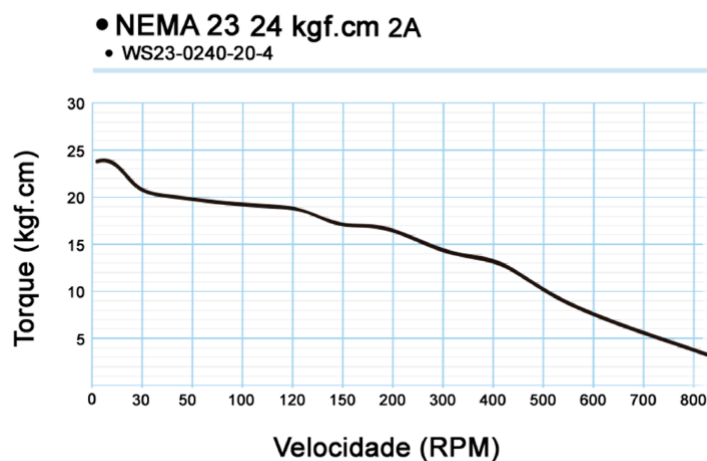


Figura 18 – Curva de torque do motor de passo. Fonte: Anexo

4.3.2 O controlador WD-2404

O controlador WD-2404 controla motores com corrente até 4 A. A corrente a ser fornecida às bobinas do motor e o modo de controle utilizado são configurados por 6 chaves presentes no controlador e as configurações disponíveis estão em sua folha de dados.

A configuração das chaves do controlador para uma corrente de 2A e modo de passos completos ficou:

Tabela 1 – Configuração das chaves do controlador

S1	S2	S3	S4	S5	S6
ON	ON	OFF	ON	OF	OFF



Figura 19 – Driver WD-2404

O controlador WD-2404 possui 3 pares de entrada: PUL+/PUL-, ENA+/ENA- e DIR+/DIR-. As entradas DIR são responsáveis pelo sentido de rotação do motor, as entradas ENA determinam se as bobinas se mantêm energizadas após a rotação e as entradas PUL são responsáveis por gerar os pulsos responsáveis pela comutação das bobinas do motor. As três entradas negativas são mantidas sempre aterradas. Se DIR+ recebe sinal positivo, o eixo gira em um sentido, se recebe sinal 0, gira no outro. A cada pulso aplicado em PUL+, o motor incrementa um passo (na descida do pulso). Se ENA+ é mantida com nível lógico alto, então o driver mantém a corrente no motor, mantendo um torque estático. Para essa aplicação não é necessário torque após a abertura da válvula, por isso ENA+ é mantida aterrada quando não são enviados pulsos para PUL+, gerando menos aquecimento e maior economia de energia.

4.3.3 Sensores Fim de Curso

Os sensores de fim de curso são utilizados com duas finalidades. Primeiro, por uma questão de segurança, garantem que ao final do percurso do obturador, o motor não continue aplicando torque. Segundo, servem como referência para o sistema iniciar e finalizar a contagem de passos.

4.3.4 Montagem e código

Foi utilizada a placa de prototipagem *Arduíno Mega 2650* para controle do motor. Foram utilizados dois paradigmas de programação: o funcional e o orientado a objetos. O código é composto pelo programa principal (arquivo .c) e uma biblioteca com as classes e os métodos utilizados (arquivo .cpp). O código completo é disponibilizado nos apêndices A e B.

A biblioteca implementa três classes: *Passo*, *velocidade* e *step*. A primeira recebe o número de passos que o motor deve dar e os números dos pinos PUL, ENA e DIR do controlador. A segunda classe define a velocidade do motor por meio de uma pausa entre dois passos consecutivos. A terceira é responsável por fazer o motor girar a quantidade de passos desejada.

Toda vez que o programa for iniciado no Arduino, a válvula é totalmente fechada até atingir o fim de curso inferior (linha 111), para que se possa ter uma referência para o início da contagem dos passos. O envio dos comandos para abertura e fechamento são realizados por meio de botões (linhas 159 a 234) e o valor da abertura é mostrado em um display OLED.

Duas interrupções foram configuradas (linhas 100 e 108) para os sensores de final de curso. Estes são normalmente fechados e as interrupções são acionadas na descida do sinal (parâmetro “*FALLING*” da interrupção). Ao serem acionadas, as interrupções param o movimento de abertura ou de fechamento da válvula.

4.4 Levantamento da característica de vazão da válvula

Para obter a característica da válvula, o diferencial de pressão e a vazão na válvula foram medidos para várias aberturas. Com essas grandezas, o coeficiente de vazão pode ser calculado pela Equação 3.5. Essas medidas foram realizadas na bancada de testes mostrada na Figura 20, que é composta por:

- Reservatório de água;
- Motobomba schneider BC-92 T;
- Inversor de frequência WEG CFW10;
- Manômetro analógico;
- Medidor de vazão magnético MAG 600.

O inversor de frequência controla a rotação da motobomba, o que possibilita obter diferentes vazões e pressões no recalque. O manômetro indica a pressão na entrada da

válvula; na saída, a pressão é zero, pois a água é liberada para o ambiente. A perda de carga na tubulação de recalque é desprezível devido ao seu pequeno comprimento.



Figura 20 – Bancada utilizada para caracterização da válvula

Foram realizadas seis medições, três com a frequência da bomba constante e três com a pressão de recalque constante, cada uma com 22 aberturas diferentes (de 0 a 100%). As tabelas com os resultados estão disponíveis no apêndice C.

4.4.1 Ajuste dos dados por uma regressão não linear

Os valores de *abertura* e coeficiente de vazão das seis medições foram plotados no gráfico de dispersão apresentado na Figura 21 para analisar como as duas variáveis se relacionam. Os dados indicam uma tendência de abertura rápida, pois k_v cresce rapidamente e após cerca de 50% de abertura se estabiliza. Este resultado era esperado devido ao formato do obturador da válvula, mostrado na Figura 14, que se assemelha ao formato ilustrado na Figura 2.

A relação matemática esperada para uma característica de abertura rápida é quadrática, como na Equação 4.1 (vide (MATHIAS, 2014), (BOJORGE, 2017)). Todavia, esse modelo não consegue descrever a relação entre x e k_v , conforme mostra o ajuste quadrático dos dados expresso na Figura 22. Isso parece indicar que nem sempre uma abertura rápida implica em uma relação quadrática, como se amplamente encontrado na

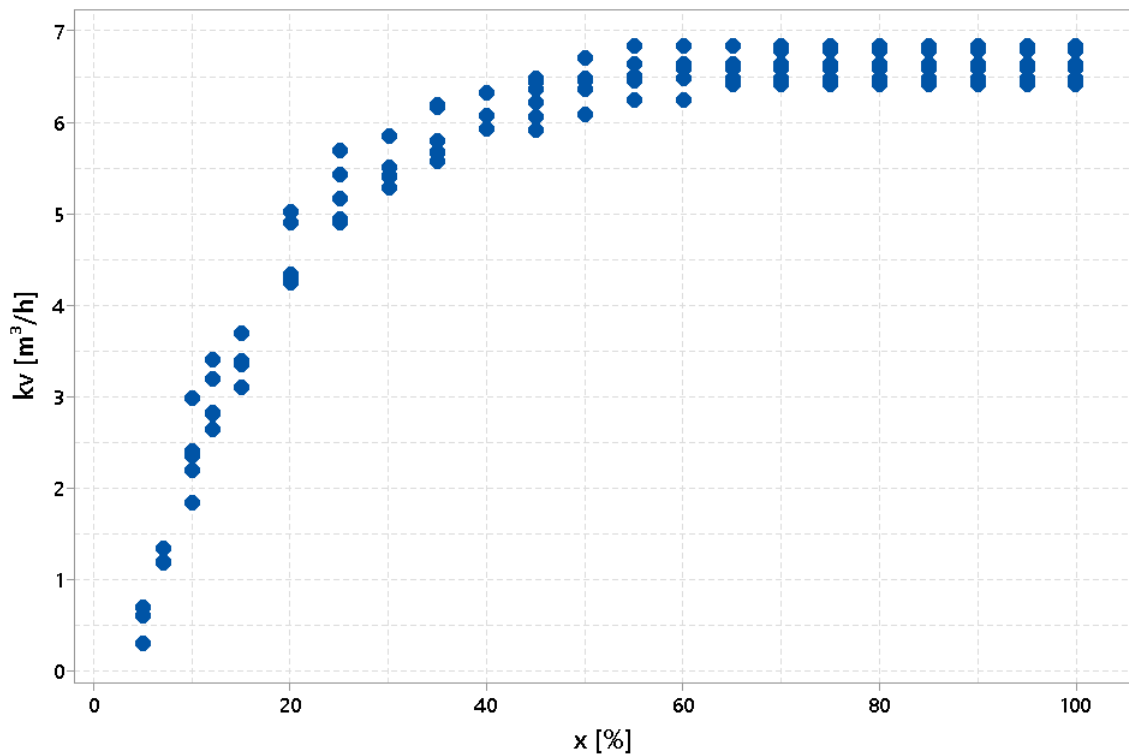


Figura 21 – Valores de abertura e k_v das 6 medições

literatura. Fez-se necessária, portanto, a busca de um novo modelo matemático para a válvula de abertura rápida estudada.

$$k_v = K \times \sqrt{x} \quad (4.1)$$

Os dados na Figura 21 mostram que o coeficiente de vazão apresenta um rápido crescimento e após uma abertura de cerca de 50% se estabiliza. Uma função que apresenta essa característica é a função exponencial. A estabilização indicada pelos dados é sinal de uma assíntota horizontal. Um modelo com essas características é expresso pela Equação 4.2.

$$k_v = a - b \times \exp(-c \times x) \quad (4.2)$$

onde a , b e c são os parâmetros a serem encontrados na regressão; x é a abertura da válvula, medida em percentagem da abertura total e k_v é o coeficiente de vazão em $\frac{m^3}{h}$.

A regressão dos dados com o modelo exponencial da Equação 4.2 resultou na Equação 4.3, cujo gráfico é mostrado na Figura 23. Este ajuste se mostrou mais adequado

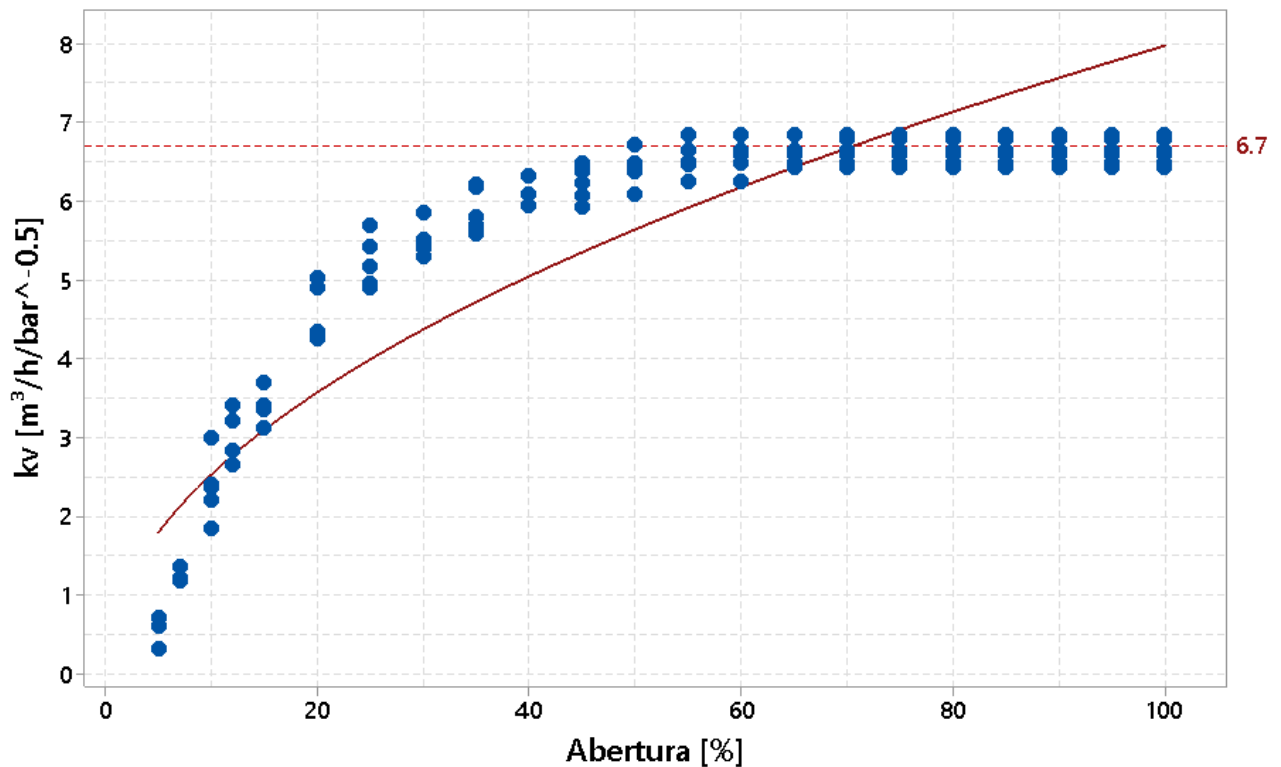


Figura 22 – Ajuste quadrático

que o modelo quadrático para descrever a característica de vazão da válvula.

$$k_v = 6.7 - 8.7 * \exp(-0.07 \times x) \quad (4.3)$$

Apesar de difundido na literatura que válvulas de abertura rápida possuem característica de vazão quadráticas, diferente dos modelos linear e igual percentagem, a característica de rápida abertura não é definida em norma (Spirax Sarco, 2021) (PASETTI, 2018), permitindo portanto, que a característica exponencial encontrada possa ser classificada como rápida abertura. Após esse resultado, uma pesquisa mais profunda encontrou alguns poucos lugares onde se é feita uma distinção entre as características de abertura rápida e quadrática (vide (RIBEIRO, 1999; Engineering ToolBox, 2003; CONTROLS,). A Figura 24 mostra a diferença entre as duas características.

Apesar dessa possível variação na relação matemática da característica de rápida abertura, alguns aspectos sempre estão presentes neste modelo. É o único com ganho da válvula decrescente (MATHIAS, 2014); é a característica que proporciona a maior taxa de fluxo, pois a interferência do obturador com o escoamento é a menor possível; um aumento adicional na abertura reduz as mudanças na taxa de fluxo de tal forma que a partir de certo ponto a vazão é estabilizada (sensibilidade reduzida), possibilitando a passagem de

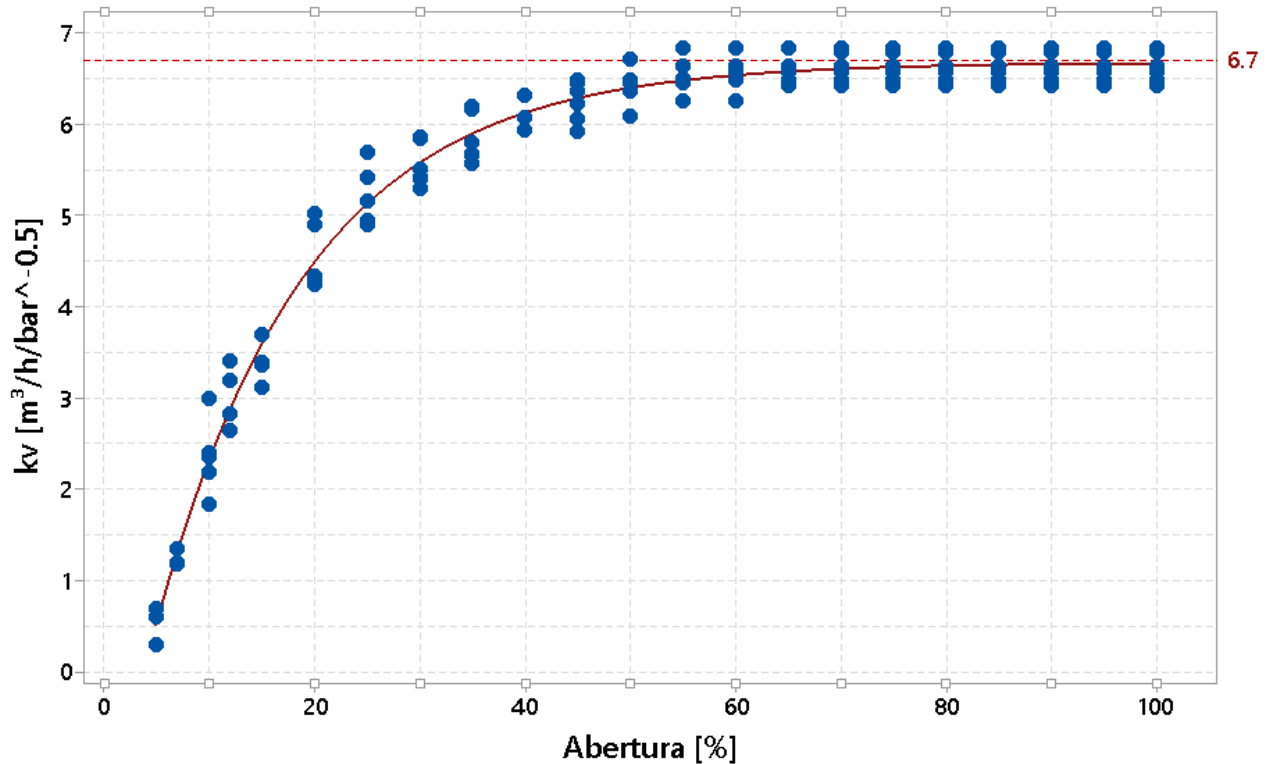


Figura 23 – Ajuste dos dados com o modelo exponencial

quase a totalidade da vazão com pouca abertura (cerca de 25% para (PASETTI, 2018), 20% pela Figura 24 (RIBEIRO, 1999) ou 40% para (MATHIAS, 2014)).

Todas esses pontos que caracterizam uma válvula de abertura rápida são encontrados na curva da Figura 23. Seu ganho é decrescente (concavidade para baixo). Até 20% de abertura a curva se aproxima de uma reta e com 25% atinge 70% de sua capacidade máxima; a partir de 60% de abertura, a válvula praticamente atinge sua máxima capacidade: quase não há variação da vazão.

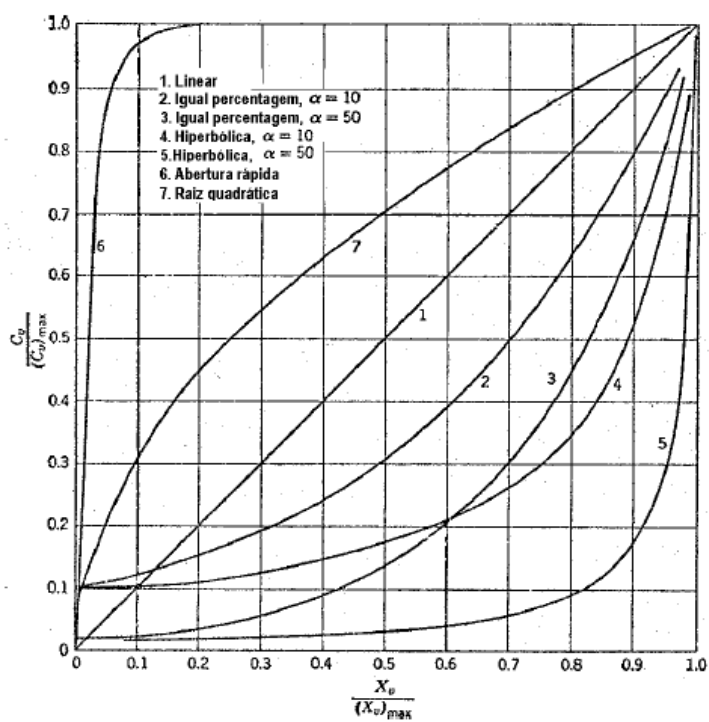


Figura 24 – Exemplo de diferenciação entre *abertura rápida* e *característica quadrática*. Retirada de (RIBEIRO, 1999)

5 Conclusão

Os resultados dos testes de vazão mostraram que a válvula estudada possui uma característica de vazão com propriedades de abertura rápida e possui uma relação exponencial. Isso, juntamente com o fato da característica de rápida abertura não ser definida em norma, implica que, diferente do que se é amplamente considerado, essa característica não é necessariamente quadrática. Além disso, os resultados obtidos, combinados com os aspectos qualitativos de uma válvula de abertura rápida, indicam que o mais adequado não seja diferenciar *abertura rápida* de *característica quadrática*, mas sim incluir a característica quadrática na classificação de rápida abertura, que, por sua vez, pode conter outras relações.

A válvula estudada é particularmente adequada para uso em processos que necessitam de controles biestáveis, quando devem operar completamente abertas ou fechadas (on/off), pois nesse tipo de característica o ganho é demasiado grande e a partir de certa abertura a vazão é praticamente estabilizada (sensibilidade próxima de zero), sendo inadequada para controle modulante (MATHIAS, 2014; Engineering ToolBox, 2003). Talvez justamente por isso (controle on/off), não se é exigida em norma uma forma específica para sua curva, bastando que satisfaça a condição de rápido estabelecimento de uma grande vazão.

A rápido estabelecimento de uma vazão próxima da total é particularmente útil em sistemas de alívio de pressão (controle à montante) (MATHIAS, 2014). Não coincidentemente, a válvula era utilizada na descarga de fundo de uma caldeira flamotubular. Válvulas com essa característica também são utilizadas em sistemas de prevenção de incêndio, onde um grande fluxo de água deve ser permitido o mais rápido possível.

APÊNDICE A – Código principal para o controle do motor de passo

```

1  /*****
2  * INCLUSAO DE BIBLIOTECAS
3  *****/
4  #include "Passo.h"
5  #include <ButtonEvents.h>
6  #include <Arduino.h>
7  #include <U8g2lib.h>
8  #include <SPI.h>
9  #include <Wire.h>
10 /*****/
11
12 /*****
13 * VARIAVEIS GLOBAIS RELATIVAS A LOGICA DE CONTROLE
14 *****/
15 const int stepsPerRevolution = 200; // Uma revolucao do motor
    possui 200 passos
16 const byte PUL = 53; // Pino conectado a entrada PUL do driver
17 const byte DIR = 49; // Pino conectado a entrada DIR do driver
18 const byte ENA = 45; // Entrada ENABLE do driver (define se a
    bobina e ou nao energizada)
19 const byte INTERRUPTION1 = 18; // Pino do sensor de fim de curso
    inferior
20 const byte INTERRUPTION2 = 19; // Pino do sensor de fim de curso
    superior
21 int total_passos;
22 int passos; // Armazena a posicao do motor medida em
    passos (0 passos corresponde a abertura 0)
23 /*****/
24
25 /*****
26 * VARIAVEIS UTILIZADAS NO COMANDO DOS BOTOES
27 *****/
28 const byte pin_abre = 4;
29 const byte pin_fecha = 8;
30 ButtonEvents botao_abre;

```

```
31 ButtonEvents botao_fecha;
32 /*****/
33
34 /*
35      * OBJETO QUE REPRESENTA O DISPLAY OLED (DEFINIDO NA BIBLIOTECA
36      * U8g2lib.h)
37      *****/
38 U8G2_SSD1306_128X32_UNIVISION_F_HW_I2C u8g2(U8G2_R0, /* reset=*/
39      U8X8_PIN_NONE, /* clock=*/ SCL, /* data=*/ SDA);
40 /*
41      *****/
42 // Cria o objeto Passo da classe Passo (criada na biblioteca
43      Passo.cpp)
44 Passo Passo(stepsPerRevolution, PUL, DIR, ENA);
45
46 // Esta funcao nao esta sendo utilizada, mas serve para contar
47      quantos passos existem entre a abertura total e zero
48 int calibra()
49 {
50     int total_passos;
51     Passo.step(1000); //Potitivo: abre
52     total_passos = Passo.step(-1000);
53     return total_passos;
54 }
55
56 /*****
57      * SETUP DO SISTEMA
58      *****/
59 void setup()
60 {
61     /*****
62      * Setup das variAveis utilizadas na lOgica do programa
63      *****/
64     Passo.velocidade(10);
65     passos = 0; // A valvula deve iniciar totalmente fechada
66     otalmente fechada
```

```
63  /*****/
64
65  /*****
66   * Setup do driver
67   *****/
68  pinMode(ENA, OUTPUT);
69  /*****/
70
71  /*****
72   * Setup dos botões
73   *****/
74  pinMode(pin_abre, INPUT_PULLUP);
75  pinMode(pin_fecha, INPUT_PULLUP);
76  botao_abre.attach(pin_abre);
77  botao_fecha.attach(pin_fecha);
78  /*****/
79
80  /*
81   *****/
82  * Setup do display LCD E DA COMUNICACAO SERIAL (CASO QUEIRA
83   SER UTILIZADA)
84   *****/
85   */
86  Serial.begin(9600);
87  Serial.setTimeout(10);
88  Serial.print("teste");
89  u8g2.begin();
90  u8g2.enableUTF8Print();
91  /*
92   *****/
93   */
94  /*****
95   * Configura a interrupcao gerada pelo fim de curso inferior
96   *****/
97  const byte interruptPin1 = 18;
98  pinMode(interruptPin1, INPUT_PULLUP);
99  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(18), interruption1,
100   FALLING);
101  /*****/
```

```
98
99  /******
100  * Configura a interrupCAo gerada pelo fim de curso superior
101  * *****/
102  const byte interruptPin2 = 19;
103  pinMode(interruptPin2, INPUT_PULLUP);
104  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(19), interruption2,
105                FALLING);
106  /******
107  /******
108  * SETUP DA VALVULA (E INICIADA TOTALMENTE FECHADA
109  * *****/
110  digitalWrite(ENA, LOW);
111  Passo.step(-700); // Sempre inicia a valvula totalmente aberta;
112  /******
113  }
114  /****** FIM DO SETUP *****/
115
116
117  /******
118  * ISR_endstop_inferior
119  * *****/
120  void interruption1() {
121    Passo.endstop = 1;
122    if (Passo.endstop) digitalWrite(26, HIGH);
123    //passos = 0;
124  }
125  /******
126
127  /******
128  * ISR_endstop_inferior
129  * *****/
130  void interruption2() {
131    Passo.endstop = 1;
132    if (Passo.endstop) digitalWrite(26, HIGH);
133    //passos = 700;
134  }
135  /******
136
137
138  /*
```

```
*****
139 * LACO QUE FICA SENDO EXECUTADO ENQUANTO O SISTEMA ESTIVER
    LIGADO
140 *****
    */
141 void loop()
142 {
143     digitalWrite(ENA, HIGH); // Desliga as bobinas do motor (nao ha
        torque estatico)
144     botao_abre.update(); // Verifica se o botao para abrir foi
        pressionado
145     botao_fecha.update(); // Verifica se o botao para fecharr foi
        pressionado
146
147     /*****
148     * Imprime a abertura da valvula no LCD
149     *****/
150     u8g2.setFont(u8g2_font_unifont_t_chinese2);
151     u8g2.setFontDirection(0);
152     u8g2.clearBuffer();
153     u8g2.setCursor(0, 15);
154     u8g2.print("Abertura:");
155     u8g2.setCursor(0, 30);
156     u8g2.print(passos/7);
157     u8g2.sendBuffer();
158
159     /*****
160     * O que fazer quando o botao_abre for pressionado
161     *****/
162     if (botao_abre.tapped() == true) {
163         if (passos >= 700) {} // Se a valvula estiver totalmente
            aberta, nada sera feito
164         else {
165             digitalWrite(ENA, LOW);
166             passos = passos + Passo.step(7);
167             digitalWrite(ENA, HIGH);
168             Serial.println("tap");
169             Serial.println(passos);
170             /*****
171             * Imprime a abertura da valvula no LCD
172             *****/
```

```
173     u8g2.setFont(u8g2_font_unifont_t_chinese2);
174     u8g2.setFontDirection(0);
175     u8g2.clearBuffer();
176     u8g2.setCursor(0, 15);
177     u8g2.print("Abertura:");
178     u8g2.setCursor(0, 20);
179     u8g2.print(passos/7);
180     u8g2.sendBuffer();
181 }
182 }
183
184 if (botao_abre.held() == true) {
185     while (!digitalRead(pin_abre)) {
186         if (passos >= 700) {break;}
187         digitalWrite(ENA, LOW);
188         passos = passos + Passo.step(1);
189         digitalWrite(ENA, HIGH);
190         Serial.println("held");
191         Serial.println(passos);
192         if (passos == 700) {break;}
193     }
194 }
195
196 /******
197  * 0 que fazer quando o botao_fecha for pressionado
198  *****/
199 if (botao_fecha.tapped() == true) {
200     if (passos <= 0) {}
201     else {
202         digitalWrite(ENA, LOW);
203         passos = passos - Passo.step(-7);
204         digitalWrite(ENA, HIGH);
205         Serial.println("tap");
206         Serial.println(passos);
207         /******
208          * Imprime a abertura da valvula no LCD
209          *****/
210         u8g2.setFont(u8g2_font_unifont_t_chinese2);
211         u8g2.setFontDirection(0);
212         u8g2.clearBuffer();
213         u8g2.setCursor(0, 15);
214         u8g2.print("Abertura:");
```



```
215     u8g2.setCursor(0, 20);
216     u8g2.print(passos/7);
217     u8g2.sendBuffer();
218   }
219 }
220
221 if (botao_fecha.held() == true) {
222   while (!digitalRead(pin_fecha)) {
223     if (passos <= 0) {break;}
224     digitalWrite(ENA, LOW);
225     passos = passos - Passo.step(-1);
226     digitalWrite(ENA, HIGH);
227     Serial.println("held");
228     Serial.println(passos);
229     if (passos == 0) {break;}
230
231   }
232 }
233 }
234 }
```

APÊNDICE B – Biblioteca com implementação das classes e dos métodos utilizados no programa principal

```

1 #include "Passo.h"
2 #include <Arduino.h>
3
4 // Pinos do motor: 1->pulso; 2->direcao; 3->enable:
5 Passo::Passo(int number_of_steps, int motor_pin_1, int
   motor_pin_2, int motor_pin_3)
6 {
7     this->step_number = 0;
8     this->direction;
9     this->last_step_time = 0;
10    this->number_of_steps = number_of_steps;
11
12    this->motor_pin_1 = motor_pin_1;
13    this->motor_pin_2 = motor_pin_2;
14
15    // Setup dos pinos
16    pinMode(this->motor_pin_1, OUTPUT);
17    pinMode(this->motor_pin_2, OUTPUT);
18    pinMode(this->motor_pin_3, OUTPUT);
19
20 }
21
22 /* Define o tempo entre dois pulsos consecutivos para que o motor
   gire na velocidade desejada
23  * 60 -> converte para segundos
24  * 10^6 -> converte para microssegundos
25 */
26 void Passo::velocidade(long vel)
27 {
28     this->step_delay = 60L * 1000L * 1000L / this->number_of_steps
   / vel;
29 }
30

```

```

31  /*
32  * Move o motor steps_to_move passos . Se o numero e negativo,
33  * o motor move na direcao oposta.
34  */
35  int Passo::step(int steps_to_move)
36  {
37
38      int steps; // Conta os passos
39      int steps_left = abs(steps_to_move); // Quantos passos restam
40      if (endstop) {steps_left = 0;}
41
42      if (steps_to_move > 0 && !digitalRead(21)) { steps_left = 0; }
43      if (steps_to_move < 0 && !digitalRead(20)) { steps_left = 0; }
44
45      // Determina a direcao com base no sinal de "steps_to_move"
46      if (steps_to_move > 0) { this->direction = 1; }
47      if (steps_to_move < 0) { this->direction = 0; }
48
49      steps = 0;
50      deu_passos = 0;
51      // A cada vez que e executado esse laço, um passo e dado e
52      // decrementa-se 1 em "steps_left"
53      while (steps_left > 0)
54      {
55          if (endstop) {steps_left = 0;}
56          deu_passos = 1;
57          unsigned long now = micros();
58          // O proximo passo e dado apenas se o tempo necessario (delay
59          // ) foi passado
60          if (now - this->last_step_time >= this->step_delay)
61          {
62              //PORTE = B00000000;
63              this->last_step_time = now;
64              // Incrementa ou decrementa o numero de passos,
65              // dependendo da direcao:
66              if (this->direction == 1)
67              {
68                  digitalWrite(this->motor_pin_2, HIGH);
69                  this->step_number++;
70                  if (this->step_number == this->number_of_steps) {
71                      this->step_number = 0;
72                  }

```

```
71     }
72     else
73     {
74         digitalWrite(this->motor_pin_2, LOW);
75         if (this->step_number == 0) {
76             this->step_number = this->number_of_steps;
77         }
78         this->step_number--;
79     }
80     // decrement the steps left:
81     steps_left--;
82     //PORTE = B00000100;
83
84     // Essas duas linhas juntas formam um pulso. Nao foi
85     // encontrada na folha de dados do controlador, informacao
86     // sobre
87     // o tempo necessario que uma entrada deveria permanecer
88     // alta para ser reconhecida. O tempo gasto entre as duas
89     // linhas
90     // abaixo foi suficiente.
91     digitalWrite(motor_pin_1, HIGH);
92     digitalWrite(motor_pin_1, LOW);
93     steps++;
94     //if (!digitalRead(52) || !digitalRead(53)) steps_left = 0;
95 }
96 if (endstop) {steps_left = 0;}
97 }
98 }
99 }
```

APÊNDICE C – Tabelas com os valores das medições de vazão e pressão

C.0.1 Medidas com a frequência constante

Tabela 2 – Valores de vazão em função da abertura da válvula para rotação de 25Hz

Abertura [%]	$\Delta P (\pm 0,1)$ [bar]	Q ($\pm 0,1$) [m ³ /h]	kv [m ³ /h]	σ_{k_v}
5	0.55	0.5	0.7	0.1
7	0.55	1.0	1.3	0.1
10	0.5	1.7	2.4	0.2
12	0.5	2.0	2.8	0.2
15	0.5	2.1	3.0	0.2
20	0.4	2.7	4.3	0.3
25	0.4	2.9	4.6	0.3
30	0.35	3	5.1	0.4
35	0.35	3.1	5.2	0.4
40	0.35	3.2	5.4	0.4
45	0.35	3.2	5.4	0.4
50	0.35	3.3	5.6	0.4
55	0.35	3.3	5.6	0.4
60	0.35	3.3	5.6	0.4
65	0.35	3.3	5.6	0.4
70	0.35	3.3	5.6	0.4
75	0.35	3.3	5.6	0.4
80	0.35	3.3	5.6	0.4
85	0.35	3.3	5.6	0.4
90	0.35	3.3	5.6	0.4
95	0.35	3.3	5.6	0.4
100	0.35	3.3	5.6	0.4

Tabela 3 – Valores de vazão em função da abertura da válvula para rotação de 35Hz

Abertura [%]	$\Delta P (\pm 0,1)$ [bar]	Q ($\pm 0,1$) [m ³ /h]	kv [m ³ /h]	σ_{k_v}
5	1	0.3	0.3	0.1
7	1.0	1.0	1.0	0.1
10	0.95	1.3	1.3	0.1
12	0.85	2.6	2.8	0.1
15	0.75	3.4	3.9	0.2
20	0.65	3.8	4.7	0.2
25	0.6	4.1	5.3	0.3
30	0.6	4.4	5.7	0.3
35	0.55	4.5	6.1	0.3
40	0.55	4.6	6.2	0.3
45	0.5	4.6	6.5	0.4
50	0.5	4.6	6.5	0.4
55	0.5	4.7	6.6	0.4
60	0.5	4.7	6.6	0.4
65	0.5	4.7	6.6	0.4
70	0.5	4.7	6.6	0.4
75	0.5	4.7	6.6	0.4
80	0.5	4.7	6.6	0.4
85	0.5	4.7	6.6	0.4
90	0.5	4.7	6.6	0.4
95	0.5	4.7	6.6	0.4
100	0.5	4.7	6.6	0.4

Tabela 4 – Valores de vazão em função da abertura da válvula para rotação de 40 Hz

Abertura [%]	ΔP ($\pm 0,1$) [bar]	Q ($\pm 0,1$) [m ³ /h]	kv [m ³ /h]	σ_{k_v}
5	1.3	0.3	0.3	0.1
7	1.2	1.3	1.2	0.1
10	1.1	2.3	2.2	0.1
12	1.0	3.2	3.2	0.1
15	0.85	4.1	4.4	0.2
20	0.8	4.5	5.0	0.2
25	0.75	4.7	5.4	0.2
30	0.7	4.9	5.9	0.2
35	0.65	5.0	6.2	0.3
40	0.65	5.1	6.3	0.3
45	0.65	5.2	6.4	0.3
50	0.6	5.2	6.7	0.3
55	0.6	5.3	6.8	0.3
60	0.6	5.3	6.8	0.3
65	0.6	5.3	6.8	0.3
70	0.6	5.3	6.8	0.3
75	0.6	5.3	6.8	0.3
80	0.6	5.3	6.8	0.3
85	0.6	5.3	6.8	0.3
90	0.6	5.3	6.8	0.3
95	0.6	5.3	6.8	0.3
100	0.6	5.3	6.8	0.3

C.0.2 Medidas à pressão constante

Tabela 5 – Valores de vazão à pressão constante de 0.4 bar

Abertura [%]	Frequência ($\pm 0,1$) [Hz]	Q ($\pm 0,1$) [m ³ /h]	kv [m ³ /h]	σ_{kv}
5	20.7	1	1.6	0.2
7	21.4	1.5	2.4	0.2
10	22.3	1.7	2.7	0.2
12	21.3	2.2	3.4	0.2
15	24.5	2.4	3.8	0.2
20	26.1	2.9	4.6	0.3
25	27.0	3.2	5.1	0.3
30	27.7	3.4	5.4	0.3
35	28.4	3.6	5.7	0.3
40	28.7	3.7	5.9	0.3
45	28.7	3.7	5.9	0.3
50	28.8	3.7	5.9	0.3
55	28.9	3.8	6.0	0.3
60	29.1	3.8	6.0	0.3
65	29.1	3.8	6.0	0.3
70	29.1	3.8	6.0	0.3
75	29.1	3.8	6.0	0.3
80	29.1	3.8	6.0	0.3
85	29.1	3.8	6.0	0.3
90	29.1	3.8	6.0	0.3
95	29.1	3.8	6.0	0.3
100	29.1	3.8	6.0	0.3

Tabela 6 – Valores de vazão à pressão constante de 0.5 bar

Abertura [%]	$\Delta P (\pm 0,1)$ [bar]	Q ($\pm 0,1$) [m ³ /h]	kv [m ³ /h]	σ_{kv}
5	23.2	0.5	0.7	0.1
7	23.7	0.8	1.2	0.2
10	24.4	1.3	1.8	0.2
12	23.3	1.9	2.6	0.2
15	26.4	2.2	3.1	0.2
20	28.9	3	4.2	0.3
25	30.9	3.5	4.9	0.3
30	32.1	3.9	5.5	0.3
35	33.0	4.1	5.8	0.3
40	33.5	4.3	6.1	0.3
45	34.0	4.4	6.2	0.3
50	34.4	4.5	6.4	0.3
55	34.4	4.5	6.4	0.3
60	34.4	4.5	6.4	0.3
65	34.4	4.5	6.4	0.3
70	34.4	4.5	6.4	0.3
75	34.4	4.5	6.4	0.3
80	34.4	4.5	6.4	0.3
85	34.4	4.5	6.4	0.3
90	34.4	4.5	6.4	0.3
95	34.4	4.5	6.4	0.3
100	34.4	4.5	6.4	0.1

Tabela 7 – Valores de vazão à pressão constante de 0.6 bar

Abertura [%]	ΔP ($\pm 0,1$) [bar]	Q ($\pm 0,1$) [m ³ /h]	kv [m ³ /h]	σ_{k_v}
5	26.4	0.5	0.6	0.1
7	26.9	0.1	1.2	0.1
10	27.4	1.4	1.8	0.2
12	26.5	2.0	2.6	0.0
15	29.7	2.4	3.1	0.2
20	33.5	3.6	4.6	0.3
25	35.3	4.1	5.3	0.3
30	36.6	4.5	5.8	0.3
35	37.3	4.7	6.1	0.3
40	37.9	4.8	6.2	0.3
45	38.4	4.9	6.3	0.3
50	38.7	5.0	6.5	0.3
55	39.1	5.1	6.6	0.4
60	39.5	5.1	6.6	0.4
65	39.5	5.2	6.7	0.4
70	39.5	5.2	6.7	0.4
75	39.5	5.2	6.7	0.4
80	39.5	5.2	6.7	0.4
85	39.5	5.2	6.7	0.4
90	39.5	5.2	6.7	0.4
95	39.5	5.2	6.7	0.4
100	39.5	5.2	6.7	0.1

Referências

- ACOSTA, S. M. *Elementos Finais de Controle*. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. 176 p. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/camaral/oi/instrumentacao-industrial>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.
- BOJORGE, N. *TEQ141 – Sistema de Controle e Instrumentação*. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2017. 79 p. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/11/Aula09{_}Instrumen{_}Valvulas{_}2sem2017>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 16 e 36.
- British Standards Institute. Industrial-process control valves — BS EN 60534-1:2005. v. 1, n. 1, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 22.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. 3th. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015. v. 3. 1016 p. ISBN 9788580554915. Disponível em: <<https://www.grupoa.com.br/mecanica-dos-fluidos-3ed-p990049?tsid=34>>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 21.
- CONDIT, R.; JONES, D. W. Stepping Motors Fundamentals. Chandler, Arizona, EUA, p. 22, mar 2004. Disponível em: <<https://www.microchip.com/wwwAppNotes/AppNotes.aspx?appnote=en012151>>. Citado 6 vezes nas páginas 7, 24, 26, 27, 28 e 29.
- CONTROLS, B. G. *Valves: The difference between equal percentage & linear flow*. Disponível em: <<https://www.buildingcontrolsgroup.com/news-events/valves-the-difference-between-equal-percentage-linear-flow/>>. Citado na página 38.
- CRANE. General Engineering Data. *The Fundamentals of Piping Design*, p. 219–230, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 22.
- Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. Stepper motor basics. 001, Schönaich, Böblingen, Alemanha, p. 13, mar 2018. Disponível em: <<https://www.faulhaber.com/en/support/technical-support/motors/motor-application-notes/>>. Citado 5 vezes nas páginas 7, 24, 25, 26 e 29.
- DRISKELL, L. *Control-Valve Selection and Sizing*. [S.l.]: Instrument Society of America, 1983. 508 p. ISBN 9780876646281. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.
- Emerson Automation Solutions. *Control Valve Handbook*. 5th. ed. Marshalltown, IA, EUA: Emerson Automation Solutions, 1980. ISBN N/A. Disponível em: <<https://www.emerson.com/en-us/automation/valves-actuators-regulators/control-valves/control-valve-handbook>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 23.
- Engineering ToolBox, . *Control Valve Flow Characteristics*. 2003. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/control-valves-flow-characteristics-d{_}485.h>. Citado 3 vezes nas páginas 20, 38 e 41.
- ERICSSON, L. Stepper Motor Basics. p. 1–6. Disponível em: <<http://solarbotics.net/>>. Citado 5 vezes nas páginas 7, 24, 25, 26 e 27.

- Fox, Robert W.; Pritchard, Philip J.; McDonald, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 8^a. ed. Rio de Janeiro - RJ: Grupo GEN, 2018. 724 p. ISBN 9788521634812. Disponível em: <<https://www.grupogen.com.br/catalog/product/view/id/8557/s/introducao-a-mecanica-dos-fluidos/category/627/>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 20 e 21.
- H. O. Tererice Co. What is a Control Valve? *What is a Control Valve?*, p. 71–76, 2001. Disponível em: <http://www.cpinc.com/Trerice/Control/control{_}71{_}>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.
- MASONEILAN. *Control Valve Sizing Handbook*. [S.l.: s.n.]. 36 p. Citado na página 22.
- MATHIAS, A. C. *Válvulas: Industriais, Segurança e Controle*. 2^a. ed. Esta obra apresenta de forma clara e abrangente os conceitos físicos da matéria, desenvolvendo o conteúdo até as aplicações na engenharia. Isso prova aos alunos a importância prática de dominar os fundamentos da mecânica de fluidos. A grande variedade de: Artliber Editora Ltda, 2014. 552 p. ISBN 8588098415/9788588098411. Disponível em: <https://artliber.com.br/index.php?route=product/product&product{_}id=53&search>. Citado 7 vezes nas páginas 12, 22, 23, 36, 38, 39 e 41.
- OGATA, K. *Modern Control Engineering*. 5th. ed. Prentice Hall, 2010. v. 39. 1174 p. ISSN 00196061. ISBN 9780136156734. Disponível em: <<https://www.pearson.com/us/higher-education/program/Ogata-Modern-Control-Engineering-5th-Edition/PGM100186.html>>. Citado na página 15.
- OMEGA Engineering. *Introduction to step motors*. Norwalk, CT, EUA: Omega Engineering, 2018. Disponível em: <<https://www.omega.com/en-us/technical-reference>>. Citado na página 27.
- PASETTI, G. *Válvulas de Controle*. Florianópolis: Instituto Federal Catarinense, 2018. 40 p. Disponível em: <<http://professor.luzerna.ifc.edu.br/giovani-pasetti/instrumentacao/>>. Citado 6 vezes nas páginas 7, 15, 16, 17, 38 e 39.
- RIBEIRO, M. A. *Válvulas de Controle e Segurança*. 5^a. ed. Salvador - BA: [s.n.], 1999. 267 p. Citado 10 vezes nas páginas 7, 8, 12, 15, 17, 18, 23, 38, 39 e 40.
- SCARPINO, M. *Motors for Makers : A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines*. 1th. ed. Indianapolis, IN, EUA: Que Publishing, 2016. 317 p. ISBN 9780134032832. Disponível em: <<https://www.pearson.com/store/p/motors-for-makers-a-guide-to-steppers-servos-and-other-electrical-machines/P100000189139?viewAll=true>>. Citado 6 vezes nas páginas 7, 24, 26, 27, 28 e 29.
- SINES, J. Ask an Engineer. Lacey, Washington, U.S. Disponível em: <<http://kb.eng-software.com/eskb/ask-an-engineer>>. Citado na página 16.
- Spirax Sarco. *Control valve characteristics*. 2021. 1 p. Disponível em: <<https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/control-hardware-electric-pneumatic-actuation/control-valve-characteristics>>. Citado na página 38.
- WHITE, F. M. *Mecânica dos Fluidos*. 7th. ed. Porto Alegre: AMGH, 2018. 864 p. ISBN 9788580556070. Disponível em: <<https://www.grupoa.com.br/eb-mecanica-dos-fluidos-8ed-p988848?tsid=34>>. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 19.