



**Paulo Marcelino
Botelho Soares**

**Desenvolvimento de uma eletroválvula
proporcional de baixo consumo energético para
águas domésticas**



**Paulo Marcelino
Botelho Soares**

**Desenvolvimento de uma eletroválvula
proporcional de baixo consumo energético para
águas domésticas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Jorge Augusto Fernandes Ferreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Vítor António Ferreira da Costa, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (orientador)

Doutora Graça Raquel Veiga Vaz

Engenheira da Bosch Termotecnologia S.A.

Agradecimentos / Acknowledgements

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Jorge Ferreira e Professor Vítor Costa, por todo o apoio, disponibilidade e conhecimento que me transmitiram ao longo da dissertação. Agradeço também, ao Professor Marco Santos pela preciosa ajuda que me deu na otimização de parâmetros da válvula. Agradeço também, ao Professor António Ramos e ao Engenheiro António Festas, por toda a ajuda que me deram na conceção e fabrico do protótipo desenvolvido. Agradeço, também, à Dra. Raquel Vaz, em representação da Bosch-TT pelo acompanhamento do trabalho.

Agradeço aos meus Pais, não só pela oportunidade que me proporcionaram mas também por todos os princípios e ensinamentos que sempre me incutiram e que fazem de mim, quem hoje sou. Agradeço também, de uma forma especial, à minha namorada, por me apoiar e ajudar sempre que necessito.

Agradeço a todos os meus Amigos e Colegas que me acompanharam ao longo do meu percurso na Universidade de Aveiro.

Por último agradeço à Universidade de Aveiro e em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica, a todos os seus professores e funcionários pelas excelentes condições que me proporcionaram durante o curso.

Esta dissertação e todo o meu percurso até aqui, não seriam possíveis sem o contributo de cada uma das pessoas aqui mencionadas.

Palavras-chave

Modelação; Desenvolvimento; Válvula Proporcional; Baixo Consumo Energético; MatLab; Simulink

Resumo

A regulação do caudal de água nos processos de aquecimento de águas domésticas é um fator muito importante. Neste sentido, a presente dissertação propõe-se desenvolver e testar um protótipo de válvula proporcional que procura simultaneamente ter uma performance superior ao nível da regulação do caudal e ser mais eficiente a nível energético. A solução desenvolvida utiliza alguns dos princípios das servo-válvulas hidráulicas, por forma a realizar uma amplificação da potência do atuador. O desenvolvimento desta válvula foi feito recorrendo às ferramentas de modelação e simulação em ambiente MatLab/Simulink™. Para além do desenvolvimento concetual, também foi construído um protótipo físico, para averiguar a validade dos resultados obtidos em ambiente simulado.

Keywords

Modelling; Development; Proportional Valve; Low Energy Consumption; MatLab; Simulink

Abstract

The water flow regulation is a key factor in domestic water heating processes. This master dissertation aims to develop and test a prototype of a high performance proportional valve for the regulation of the flow of water while presenting a low energy consumption. The development of this water valve is made using modelling and simulation tools such as MatLab/Simulink™. Besides the conceptual modelling, a prototype was built to test and validate the simulation results.

Conteúdo

I	Enquadramento	1
1	Introdução	3
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia de trabalho utilizada	4
1.4	Guia de leitura	5
2	Revisão do estado da arte	7
2.1	Regulação de caudal	7
2.1.1	Compensação de pressão	9
2.1.2	Controlo em malha fechada	10
2.1.3	Mapeamento de válvulas	10
2.2	Atuação de válvulas	11
2.2.1	Atuação por solenóide	11
2.2.2	Atuação por motor de passos	13
2.2.3	Atuação servo hidráulica	14
2.2.4	Atuações não convencionais	15
2.3	Sensores	16
2.4	Aspetos construtivos em válvulas	19
2.4.1	Materiais utilizados em válvulas	20
2.5	Soluções comerciais existentes	21
II	Modelação e simulação de sistemas da válvula	23
3	Modelação e modelos	25
3.1	Terminologia e conceitos	25
3.2	Modelação de sistemas físicos	26
3.2.1	Sistemas fluidicos	26
3.2.2	Sistemas eletromagnéticos	30
3.2.3	Sistemas mecânicos	33
3.3	Implementação em Simulink	36
4	Pré-estudo de soluções possíveis	37
4.1	Conceito 1 - Compensador mecânico de pressão	37
4.2	Conceito 2 - Controlo em malha fechada com sensorização	42
4.3	Conceito 3 - Servopilotagem com compensação mecânica de pressão	46

4.4	Comparação e análise das soluções propostas	53
III	Desenvolvimento do protótipo de válvula	55
5	Modelação e simulação do protótipo	57
5.1	Desenvolvimento concetual	57
5.2	Modelação	59
5.3	Especificações e resultados das simulações	62
6	Conceção e fabrico do protótipo	65
6.1	Proposta de protótipo	65
6.2	Fabrico e montagem	69
7	Testes experimentais ao protótipo	71
7.1	Metodologia experimental	71
7.2	Resultados experimentais	72
7.3	Análise de resultados	72
7.4	Proposta de melhoria	74
IV	Considerações finais	79
8	Conclusões e sugestões de trabalho futuro	81
8.1	Conclusões	81
8.2	Trabalho futuro	83
	Anexos	87
A	Desenhos de fabrico	89

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de uma válvula	3
1.2	Planificação e calendarização das tarefas	5
2.1	Diagrama de uma válvula proporcional	8
2.2	Compensação de pressão de forma mecânica	9
2.3	Controlo em malha fechada	10
2.4	Controlo de válvula por mapeamento	11
2.5	Tipos de Solenóides	12
2.6	Tipos de motores de passos	13
2.7	Tipo de controlo dos motores de passo	14
2.8	Tipos de servo-válvulas	15
2.9	Tipos de caudalímetros	17
2.10	Diagrama de um LVDT	19
2.11	Configurações do êmbolo. Figura retirada de [11].	20
3.1	Diagrama de sistemas presentes na válvula	26
3.2	Escoamento através de um orifício	27
3.3	Segmento de círculo	29
3.4	Relação área do orifício/deslocamento do êmbolo	30
3.5	Circuito de um LVDT. Figura retirada de [17].	30
3.6	Dimensões características de um LVDT	31
3.7	Representação simplificada de um solenóide	33
3.8	Comportamento do modelo de solenóide implementado	34
3.9	Êmbolo compensador	35
3.10	Exemplo da implementação de um volume de controlo em Simulink	36
4.1	Conceito com compensação de pressão mecânica	38
4.2	Diagrama do modelo	38
4.3	Válvula sem o compensador mecânico para uma posição de êmbolo $x=1.5\text{mm}$	39
4.4	Válvula com o compensador mecânico para uma posição de êmbolo $x=1.5\text{mm}$	40
4.5	Proposta de protótipo para o conceito 1	41
4.6	Conceito com controlo em malha fechada	43
4.7	Diagrama do modelo	44
4.8	Dados das simulações realizadas	45
4.9	Conceito com controlo em malha fechada	47
4.10	Diagrama do modelo	48
4.11	Diagrama de corpo livre	48
4.12	Resultados das simulações realizadas	49

4.13	Êmbolo de pilotagem posicionado em $x=-0.3$ mm	50
4.14	Proposta de protótipo para o conceito 3	51
4.15	Proposta de protótipo para o conceito 3	52
5.1	Conceito 4, de válvula pilotada	58
5.2	Diagrama do modelo	60
5.3	Diagrama de Forças	61
5.4	Variação do caudal de saída para diferentes pressões de entrada	64
5.5	Perda de carga na válvula em função do caudal de saída	64
6.1	Vista explodida do protótipo	66
6.2	Vista simplificada em corte	68
6.3	Peças do protótipo	69
6.4	Protótipo montado	70
7.1	Esquemas explicativos	73
7.2	Esquemas explicativos	74
7.3	Diagrama do modelo	75
7.4	Área do orifício regulador em função do curso do respetivo órgão	76
7.5	Variação do caudal de saída para um pressão de entrada de 3 bar	77

Abreviaturas

Bosch-TT	Bosch-TermoTecnologia. 1, 4, 57
LVDT	Transformador diferencial linear variável. iii, 18, 29, 31, 32, 36, 81
PTFE	Politetrafluoretileno. 21, 65, 83
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno. 21
PVC	Policloreto de vinila. 21

Índices

o	Orifício. 8, 28
in	Entrada. 27, 30, 31
out	Saída. 27, 31
f	Fugas. 28
<i>máx</i>	Máximo. 29
<i>min</i>	Mínimo. 29
p	Primário. 30, 31, 32
s	Secundário. 30, 31, 32
mag	Magnética. 33

Lista de Símbolos

Re	Número de Reynolds. 8, 28
ρ	Massa volúmica. 8, 26, 27, 28, 62
v	Velocidade. 8, 26, 27, 28
D_H	Diâmetro hidráulico. 8, 28
μ	Viscosidade dinâmica. 8, 28
A	Área. 8, 27, 28, 29, 35
C_d	Coefficiente de descarga. 8, 28, 62
ΔP	Diferencial de pressão. 8, 28
\dot{Q}	Caudal. 8, 27, 28
m	Massa. 26, 33, 35
t	Tempo. 26, 27, 30, 31, 32
V	Volume. 26, 27
n	Normal. 26
β	Coefficiente de compressibilidade isotérmica. 26, 27, 62
P	Pressão. 26, 27, 28, 35
δ	Coefficiente de escoamento laminar. 28
g	Condutância de fugas. 28
C	Curso do êmbolo. 29

E	Tensão elétrica. 30, 31, 32
R	Resistência elétrica. 30, 31, 32, 33
I	Intensidade da corrente. 30, 31, 32, 33
L	Indutância. 30, 31, 32, 33
M	Indutância mútua. 30, 31, 32
μ_0	Permeabilidade no vázio. 31, 32, 62
G	Condutância magnética. 31
N	Número de espiras do enrolamento. 31, 32, 33
F	Força. 33
B	Atrito. 35
K	Constante de rigidez. 35

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre os diferentes tipos de atuação	11
3.1	Parâmetros utilizados na validação do modelo.	34
5.1	Requisitos de projeto	57
5.2	Parâmetros dos orifícios	62
5.3	Parâmetros do modelo	62
5.4	Parâmetros do Solenóide	63
5.5	Constantes físicas utilizadas	63
6.1	Lista de peças	67
6.2	Caraterísticas da mola	68

Parte I

Enquadramento

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A água é um bem essencial, indispensável a toda a atividade humana. Em Portugal, cada habitante consome em média 198[1] litros de água por dia. Este consumo refere-se à água utilizada em máquinas de lavar, atividades de cozinha, rega de jardins e águas quentes sanitárias. Deste consumo, a maior fatia são as águas quentes sanitárias, maioritariamente utilizadas nos duches e lavatórios.

A água quente sanitária é uma necessidade essencial no quotidiano das pessoas, pelo que esta área se encontra em constante desenvolvimento. Atualmente existem diversos equipamentos capazes de aquecer a água para fins domésticos, como os esquentadores a gás, os termo-acumuladores elétricos ou as bombas de calor. Apesar de terem princípios de funcionamento diferentes, os equipamentos enunciados anteriormente partilham entre si uma necessidade comum, que é a regulação do caudal de água que estão a aquecer. O caudal de água é um fator chave para garantir que o processo de aquecimento é feito de forma constante e eficiente. Para além dos requisitos implícitos, existem outros relacionados com a performance destas válvulas que quando são cumpridos permitem tornar o processo de aquecimento de água mais eficiente. Dada a sua relevância, existem diversas melhorias que podem ser implementadas nestas válvulas, tornando o seu desenvolvimento um desafio aliciente.

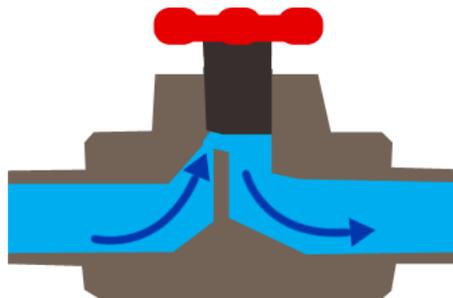


Figura 1.1: Diagrama de uma válvula

1.2 Objetivos

A regulação do caudal de água constituiu um fator importante para o aumento da eficiência dos processos de aquecimento desta mesma água. Neste sentido, o trabalho desenvolvido nesta dissertação procura melhorar a performance e o consumo energético das válvulas reguladoras de caudal de água. A investigação e o desenvolvimento de válvulas para controlar fluidos é uma área que já se encontra bastante explorada, e na qual trabalham muitas empresas e pessoas. No entanto, os maiores avanços tecnológicos verificam-se essencialmente nas válvulas para controlo de fluidos hidráulicos a altas pressões, normalmente utilizadas em aplicações de elevada exigência e precisão.

Em aplicações menos exigentes são utilizadas válvulas estranguladoras, mais simples, mas que apresentam uma performance inferior, resultando muitas vezes numa regulação incorreta ou com oscilações no caudal de água. A performance destas válvulas pode ser melhorada com a introdução de alguns dos princípios utilizados em válvulas tecnologicamente mais avançadas. No entanto, deve-se ter em conta se a melhoria da performance justifica o aumento de complexidade e de custo que lhe estão associados. É por isso importante estabelecer um compromisso entre os diversos fatores, para que seja possível chegar a uma solução que apresente um desempenho adequado e uma complexidade e custo baixos. O tema desta dissertação resulta de uma parceria entre a Universidade de Aveiro e a Bosch-TT. Neste sentido, esta dissertação foi acompanhada também pela Dra. Raquel Vaz, em representação da Bosch-TT. Esta colaboração ajudou a balizar as características e especificações que a válvula a ser desenvolvida deve ter.

O principal objetivo desta dissertação de mestrado é **desenvolver, prototipar e testar** um novo conceito de válvula reguladora de caudal para baixas pressões, na qual se verifique o seguinte:

1. Exista uma linearidade entre o sinal elétrico aplicado e o caudal que a válvula se encontra a regular.
2. O consumo elétrico do atuador e instrumentação da válvula seja baixo.

1.3 Metodologia de trabalho utilizada

Sendo que a principal ênfase deste trabalho é o desenvolvimento, de raiz, de um componente novo, é importante existir uma metodologia de trabalho inerente que permita atingir os resultados em tempo útil. Neste sentido este trabalho encontra-se dividido em quatro fases essenciais:

1. **Pesquisa bibliográfica e pré-estudo concetual** - Consiste na pesquisa dos princípios e tecnologias utilizadas nas válvulas reguladoras de caudal. Esta pesquisa permite gerar várias ideias para o funcionamento da válvula. Com base nas várias ideias iniciais, é desenvolvido um conjunto de pré-modelos simplificados que ajudam a compreender qual é a tecnologia que apresenta os melhores resultados.
2. **Modelação e desenvolvimento do conceito** - Após a realização do pré-estudo é possível definir qual é o conceito que melhor se adequa às necessidades da válvula desejada. Esse conceito é trabalhado sob a forma de um modelo que permite realizar simulações. Desta forma é possível estudar o comportamento da válvula

durante o seu funcionamento. Para que o modelo criado seja válido, e os seus resultados satisfatórios, é necessário ter em conta todos os fatores e fenómenos presentes durante o funcionamento real da válvula. Esta etapa é extremamente importante porque permite definir todos os parâmetros construtivos e de controlo da válvula.

3. **Conceção e fabrico de um protótipo** - Na etapa anterior foi possível definir os parâmetros construtivos e de controlo da válvula pelo que, nesta etapa, o principal objetivo é o desenho e fabrico de um protótipo funcional de uma válvula reguladora de caudal. Este protótipo é construído com base nos parâmetros obtidos na modelação e simulações realizadas na etapa anterior.
4. **Testes experimentais ao protótipo construído** - Nesta etapa pretende-se testar experimentalmente o protótipo construído. Estes testes são realizados numa bancada com instrumentação adequada, por forma a obter resultados acerca do comportamento real da válvula. Isto permite estabelecer uma comparação entre os dados experimentais e os dados obtidos durante as simulações realizadas anteriormente. Esta comparação ajuda a compreender se o modelo idealizado é realmente válido e que aspetos deste podem ser melhorados.

Por forma a garantir que existe uma racionalização do tempo disponível para cada fase de desenvolvimento descrita anteriormente, foi estabelecido um planeamento que é apresentado na Figura 1.2. No fim desta dissertação espera-se ter um protótipo funcional de uma válvula reguladora de caudal que cumpra, com um desempenho satisfatório, os objetivos enunciados anteriormente.

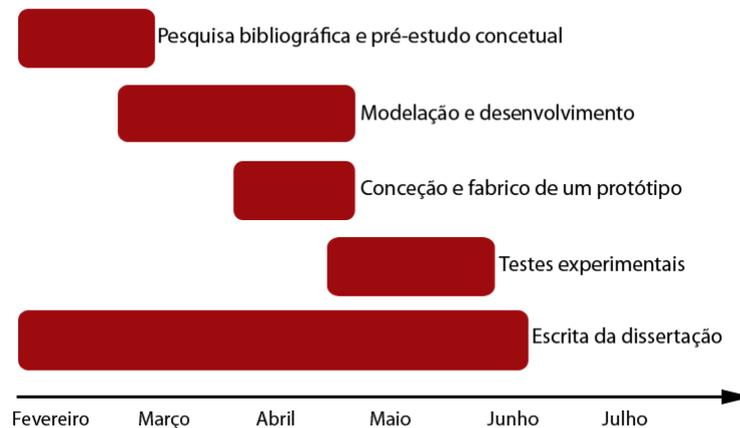


Figura 1.2: Planificação e calendarização das tarefas

1.4 Guia de leitura

Esta dissertação é composta por 8 Capítulos, que estão organizados em 4 partes principais. O Capítulo 1 introduz o tema desenvolvido nesta dissertação e apresenta

os principais objetivos que devem ser cumpridos. O Capítulo 2 é a revisão do estado da arte, onde essencialmente se faz um levantamento acerca das tecnologias e métodos existentes e que se podem aplicar ao desenvolvimento de válvulas. Este exercício permitiu compreender de uma forma mais aprofundada, o desafio levantado pelo problema em análise.

O Capítulo 3 intitulado, modelação e modelos, inclui a teoria acerca dos fenómenos físicos que estão presentes num sistema como uma válvula proporcional. Neste Capítulo estudam-se os modelos matemáticos que vão ser utilizados para analisar e simular os conceitos de válvulas que forem desenvolvidos ao longo da dissertação. No Capítulo 4 realiza-se um pré-estudo de soluções possíveis para os problemas que a válvula a desenvolver se propõe resolver. Este pré-estudo parte de ideias concetuais, que são modeladas de uma forma simples mas enquadrada com a válvula que se pretende desenvolver. As soluções propostas são comparadas entre si, sendo que a partir desta comparação se selecionou a solução mais adequada.

O Capítulo 5 aborda a modelação e simulação da solução selecionada a partir do pré-estudo. O modelo da válvula foi desenvolvido o mais possível, sendo que se realizaram diversas simulações para estudar o seu comportamento. Também neste Capítulo é feita a parametrização da válvula, onde são definidas todas as dimensões e constantes. Resumidamente, neste Capítulo é desenvolvido o projeto concetual da válvula. O Capítulo 6 apresenta a conceção e o fabrico do protótipo que foi construído para testar e validar os resultados obtidos no Capítulo cinco.

O Capítulo 7 relatam os testes experimentais feitos ao protótipo da válvula. No primeiro é descrito o procedimento experimental utilizado, bem como algumas nuances que foi necessário ter em conta. Ainda no Capítulo 7 é feita a análise dos resultados experimentais obtidos, sendo estabelecida uma comparação entre os resultados da simulação e os resultados experimentais.

No Capítulo 8 são descritas as conclusões que foram retiradas a partir de todo o trabalho desenvolvido durante esta dissertação. Também são realçados alguns aspetos que poderiam ter sido abordados de forma diferente, ou que influenciaram os resultados obtidos. Deste modo, é possível observar que a presente dissertação não encerra em si uma solução permanente para os problemas colocados, mas é um contributo para o desenvolvimento deste tipo de válvulas, que pode ser melhorado e expandido.

Capítulo 2

Revisão do estado da arte

Em alguns sistemas, a regulação de caudal é um dos aspetos mais importantes para o seu correto funcionamento. Esta regulação pode ser feita colocando uma resistência hidráulica no circuito, ou por movimento de um volume fixo. Em geral a colocação de uma resistência hidráulica é uma das formas mais utilizadas para a variação de caudais a baixas pressões.

Por outras palavras, colocar uma resistência num circuito, corresponde a colocar uma válvula que regula o caudal. Se esta válvula permitir variar o caudal de forma contínua, então trata-se de uma válvula proporcional. Estas válvulas podem apresentar-se sob diferentes formas, com diferentes tipos de atuação e de controlo. Porém, uma válvula proporcional é sempre composta pelo seu corpo, por um êmbolo ou parte móvel e por um atuador, como se mostra na Figura 2.1. O corpo vai ser a base que aloja todos os restantes componentes que constituem a válvula. O êmbolo desloca-se num curso definido fazendo variar a área do orifício de passagem do fluido, o que por sua vez varia o caudal de fluido. O componente responsável pelo movimento do êmbolo é o atuador, que pode ser mecânico, elétrico, pneumático ou hidráulico.

Existem diversas válvulas proporcionais, com diferentes tamanhos e características, que dependem essencialmente do processo onde a válvula estiver inserida. Num equipamento de aquecimento de águas domésticas espera-se encontrar uma válvula que seja compacta, eficiente e que tenha um consumo energético baixo. Existem diversas tecnologias que podem ser utilizadas para desenvolver uma válvula com as características desejadas, as quais são abordadas nas secções seguintes.

2.1 Regulação de caudal

A regulação de caudal de um fluido pode ser conseguida através da variação da área de um orifício de passagem. A variação da área faz-se pelo movimento de um elemento, geralmente um êmbolo, atuado por um dos métodos que serão abordados mais à frente. Para poder conceber e dimensionar uma válvula deste género é importante perceber quais são as variáveis que influenciam o caudal, pelo que é necessário pensar sobre alguns conceitos de mecânica dos fluidos.

Existem diversas variáveis que caracterizam e influenciam o comportamento de um fluido que flui numa conduta. De uma forma genérica pode-se observar que as camadas de fluido que se encontrem em contacto com as paredes da tubagem vão ter uma velocidade

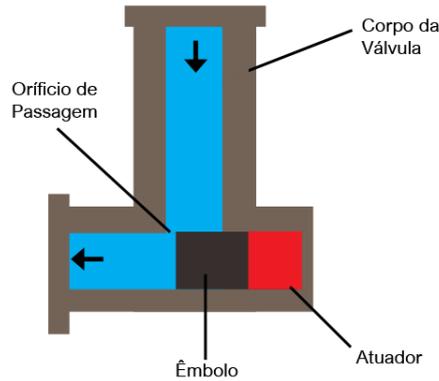


Figura 2.1: Diagrama de uma válvula proporcional

menor do que as camadas de fluido que se encontrem ao centro da conduta. Isto leva a que exista uma relação entre as forças viscosas e as forças de inércia do escoamento, que vão caracterizar o caudal ao longo da conduta. A teoria básica de mecânica de fluidos estabelece dois tipos de regime para um escoamento, o regime laminar e o regime turbulento. A relação entre as forças descritas anteriormente permite definir a fronteira entre os tipos de regime que um escoamento pode ter. Esta relação adimensional é conhecida por número de Reynolds definido pela Equação 2.1. Encontra-se demonstrado experimentalmente que para condutas fechadas, o regime de um escoamento é laminar se o número de Reynolds for inferior a 2300, e é turbulento se o número de Reynolds for superior a 4000. Um número de Reynolds que se encontre entre os limites anteriores corresponde a um escoamento de regime misto [2].

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu} \quad (2.1)$$

Como foi referido anteriormente, a regulação do caudal faz-se pela variação da área do orifício, sendo que em regime turbulento esta pode ser descrita de acordo com a Equação 2.2. Esta expressão não é válida para o regime laminar, contudo, numa válvula proporcional de água pode-se assumir que o regime do escoamento é turbulento, visto que a velocidade do escoamento é alta e a viscosidade dinâmica da água é relativamente baixa. Pela Equação 2.2 constata-se que a variação do caudal depende da área do orifício (A_o), de um coeficiente de descarga (C_d) e de uma diferença de pressões (ΔP). Em geral, esta diferença de pressões não se mantém constante pelo que o caudal passa a ser uma função da área e da diferença de pressões. O ideal seria que o caudal dependesse apenas da variação de área, isto é, que fosse independente das variações de pressão que existam no circuito [3]. Mais adiante são abordadas algumas técnicas que garantem que a diferença de pressões no orifício se mantém constante ao longo do tempo.

Existem diversas formas de controlar o caudal por forma a garantir que seja o desejado, como a implementação de um controlador em malha fechada ou pelo mapeamento da válvula. Estas estratégias de controlo são descritas ao longo das próximas secções,

para que se percebam as suas características, vantagens e desvantagens.

$$\dot{Q}_o = A_o C_d \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (2.2)$$

2.1.1 Compensação de pressão

A regulação do caudal é mais simples de realizar caso a diferença de pressões seja mantida constante. Esta compensação pode ser realizada diretamente no controlador do caudal ou pode ser feita de forma independente pela adição de mais alguns componentes mecânicos. A implementação da compensação no controlador da válvula apresenta algumas desvantagens, pelo que uma solução mecânica constitui uma alternativa interessante a ter em conta.

As variações de pressão podem ocorrer a montante ou a jusante da válvula e ambas têm influência na resposta e na regulação do caudal através do orifício. Para contornar esta situação pode adicionar-se um êmbolo que limita o caudal consoante as pressões a montante e a jusante do orifício. A compensação de pressão pode ser feita tendo em conta as variações à entrada ou à saída da válvula. Para uma melhor compreensão deste conceito é explicada a compensação tendo em conta as variações de pressão à saída, de acordo com a Figura 2.2a. Nesta observa-se que dada uma regulação ao orifício, se houver uma descida da pressão P_2 , o êmbolo ir-se-á deslocar para a direita. Com isto o caudal diminui e conseqüentemente a pressão P_2 aumenta, sendo assim feita a compensação. Pelo contrário, se houver um aumento da pressão P_2 , o êmbolo ir-se-á deslocar para a esquerda, aumentando o caudal e diminuindo a pressão P_2 . A compensação segundo as variações à entrada está esquematizada na Figura 2.2b e funciona de forma semelhante ao que foi descrito anteriormente.

Este tipo de mecanismo de compensação aumenta a complexidade construtiva da válvula, sendo também necessário fazer um correto dimensionamento do sistema para que este funcione de forma adequada. Em contrapartida, a performance dinâmica deste sistema é elevada, sendo a resposta a variações de pressão é muito rápida e precisa.

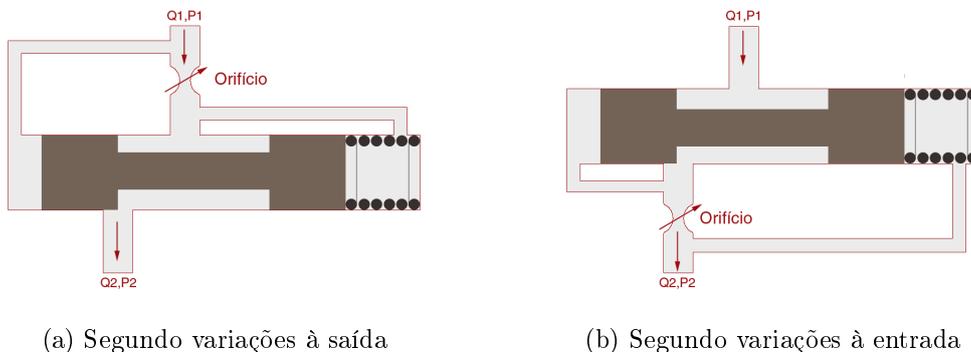


Figura 2.2: Compensação de pressão de forma mecânica

2.1.2 Controlo em malha fechada

O controlo em malha fechada garante que o caudal regulado pela válvula é, de facto, o caudal desejado para um dado processo. A implementação deste tipo de controlo requer que se conheça o valor do caudal à saída da válvula, sendo necessário ter um transdutor que meça o caudal à saída da válvula. No caso de uma válvula proporcional, o caudal pode ser medido através de um caudalímetro ou pode ser determinado indiretamente através da Equação 2.2, em que seria necessário medir a diferença de pressão entre a entrada e a saída da válvula.

Sabendo o valor do caudal à saída, com a implementação de um controlador é possível ajustar a válvula até que o caudal de saída seja o desejado. Este controlador pode ser um tradicional PID ou então um controlador mais sofisticado, se necessário. Ainda assim este, pode ser maior quando comparado com outro tipo de controladores possíveis de implementar.

Este método de controlo é bastante utilizado em diversos sistemas, incluindo válvulas proporcionais reguladoras de caudal. No entanto, deve-se ter em conta que a necessidade de ter um caudalímetro ou sensores de pressão constitui um aumento da complexidade e de custo. No caso de se usar um caudalímetro é também preciso ter em conta que o mesmo aumenta a perda de carga global da válvula.

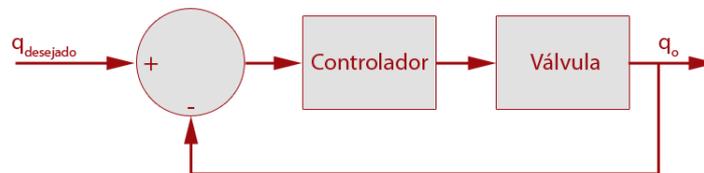


Figura 2.3: Controlo em malha fechada

2.1.3 Mapeamento de válvulas

Este tipo de controlo requer um trabalho experimental prévio, que consiste em adquirir as curvas que relacionam o caudal à saída da válvula e a posição do êmbolo. Sabendo estes valores é possível construir uma tabela que fica embebida no controlador da válvula, sendo que para um determinado caudal corresponde uma posição do êmbolo, se se mantiverem as mesmas condições de pressão. Este tipo de controlo é bastante simples e permite obter uma solução com um custo e complexidade relativamente baixos.

Apesar deste tipo de controlo ser uma solução simples e eficaz é necessário ter em conta alguns aspetos, nomeadamente no que diz respeito ao levantamento experimental das relações caudal/área do orifício. Este levantamento deve ser feito nas condições de funcionamento da válvula, para que os valores obtidos sejam semelhantes aos do funcionamento real da válvula. Ainda assim, vai existir algum desvio entre os valores, que vai resultar inevitavelmente numa diferença entre o caudal desejado e o caudal real que a válvula regula [4].

Para além do que já foi referido, é necessário garantir que o atuador cumpre com o sinal que lhe foi dado. Isto depende do tipo de atuador que for selecionado para equipar a válvula. No caso de um motor de passos esta questão não é muito relevante, visto este

tipo de atuador apresentar uma boa repetibilidade. Ainda assim, é possível implementar um controlo em malha fechada para a posição do atuador, sendo que é necessário utilizar sensores de posição. Fica claro que este tipo de controlo tem duas possíveis fontes de erro, que podem contribuir para uma redução da performance da válvula. Ainda assim, devido à simplicidade e ao reduzido custo, este tipo de controlador constitui uma solução interessante para ser aplicada numa válvula proporcional de caudal.

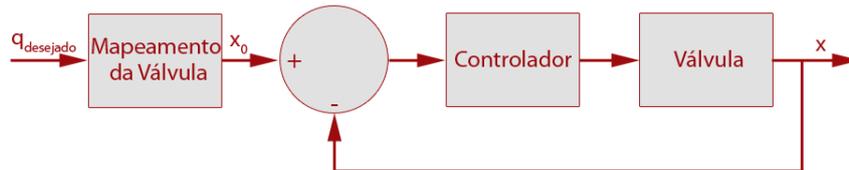


Figura 2.4: Controlo de válvula por mapeamento

2.2 Atuação de válvulas

Os atuadores são elementos funcionais que controlam um processo, a partir de um sinal que recebem do controlador. Idealmente, os atuadores devem ter um consumo energético reduzido e devem operar com níveis de tensão baixos, para que possam ser facilmente controlados [5].

No caso das válvulas proporcionais o atuador é responsável por movimentar o êmbolo, que por sua vez aumenta ou diminui a área de passagem do orifício que regula o caudal. Depreende-se então que o atuador deve ter uma resposta rápida, para que consiga variar o caudal de forma adequada às solicitações que são efetuadas à válvula. Os atuadores mais apropriados para serem aplicados em válvulas proporcionais são os motores de corrente contínua, motores de passos e os solenóides. Para além destes existem também atuadores que utilizam propriedades especiais de alguns materiais, e que, apesar de ainda não serem muito utilizados, no futuro poderão vir a ser soluções importantes. A Tabela 2.1 apresenta, de forma resumida, uma comparação entre os diferentes tipos de atuação possíveis para uma válvula proporcional.

Tabela 2.1: Comparação entre os diferentes tipos de atuação

	Solenóide	Motor de Passo	Assistidas Hidraulicamente	Piezo Elétrico
Potência (W)	5 ... 40	5 ... 20	0 ... 8	0 ... 2
Deslocamento (mm)	0 ... 50	-	0 ... 5	0 ... 0.05
Resposta Dinâmica	Alta	Baixa	Alta	Alta
Histerese (%)	0 ... 5	0 ... 5	0 ... 5	0 ... 30

2.2.1 Atuação por solenóide

Os solenóides são largamente utilizados na atuação de válvulas direcionais, e também de algumas válvulas proporcionais. Estes são compostos por um enrolamento que quando

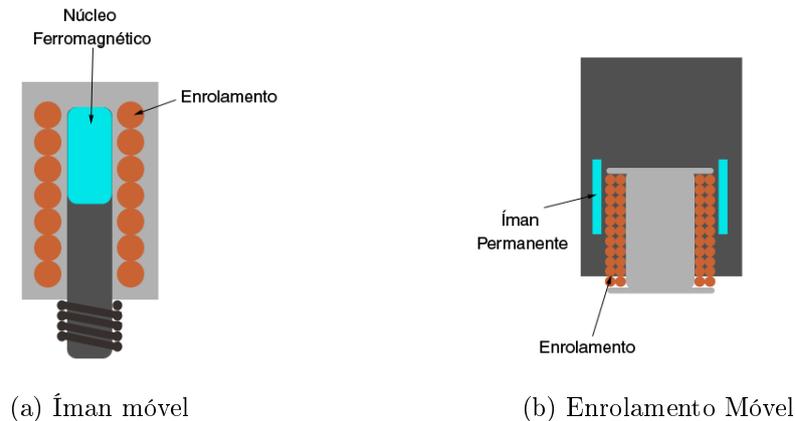


Figura 2.5: Tipos de Solenóides

é percorrido por uma corrente elétrica gera um campo magnético que faz deslocar um núcleo ferromagnético. Em termos de construção existem dois tipos de solenóides, os de íman permanente móvel ou os de enrolamento móvel. As características de cada um deste tipo de solenóides são ligeiramente diferentes, contudo, o princípio de funcionamento é o mesmo para ambos. Como o próprio nome indica, nos solenóides de íman permanente móvel este é que se desloca linearmente. Pelo contrário, nos solenóides de enrolamento móvel, este é que se desloca linearmente.

Os solenóides de íman permanente móvel encontram-se bastante desenvolvidos, pelo que o seu custo é relativamente baixo. São bastante fáceis de implementar na atuação de uma válvula e têm uma boa resposta em frequência até aos 150 Hz [5]. Conseguem atingir cursos elevados na atuação mas apresentam consumos energéticos relativamente altos. Ao contrário dos solenóides de enrolamento móvel, os solenóides de íman permanente móvel apenas conseguem exercer força num sentido, pelo que têm que ter uma mola para assegurar o retorno à posição inicial.

Os solenóides de enrolamento móvel são bastante precisos e apresentam uma boa resposta dinâmica, sendo capazes de responder em frequência até aos 200 Hz [5]. Conseguem exercer força em ambos os sentidos, bastando para tal que se invertam os pólos da alimentação. Em geral, este tipo de solenóides apresenta um consumo energético relativamente baixo, o que os torna uma solução interessante para a atuação de válvulas. Pode-se afirmar que os solenóides de enrolamento móvel permitem fazer um controlo mais preciso e linear, ao passo que os solenóides de íman permanente móvel são menos precisos e por isso podem ser utilizados em aplicações menos exigentes.

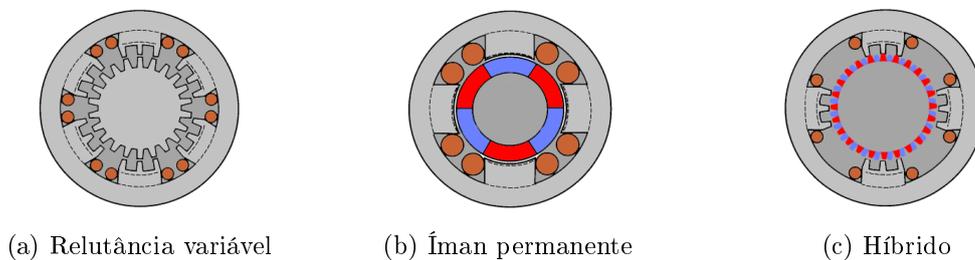
Relativamente ao controlo, os solenóides podem ser controlados por corrente ou por tensão. O método mais convencional é o controlo por tensão, que assegura que o solenóide tem uma potência constante. Isto leva a que, em certos regimes de funcionamento, o solenóide esteja a ser sobre-alimentado, e conseqüentemente, aqueça. O aumento de temperatura faz com que a resistência elétrica aumente, o que por sua vez aumenta a potência que o solenóide necessita e, portanto, o consumo elétrico acaba por aumentar. Pode-se assim concluir que o controlo por tensão é ineficiente. Para ativar um solenóide é necessária muita energia e, portanto, muita corrente. Contudo, após atingir a posição desejada o solenóide necessita de uma corrente inferior para se manter nessa posição. Este facto leva a que o controlo mais eficiente seja o controlo por corrente, no qual a

corrente é ajustada ao longo do tempo, reduzindo assim a potência consumida. Isto é possível à custa de um aumento de complexidade do circuito de controlo do solenóide, pelo que pode ser uma desvantagem a nível de custo da solução implementada.

2.2.2 Atuação por motor de passos

Os motores de passos são motores elétricos que funcionam com corrente contínua. O princípio de funcionamento deste tipo de motores é semelhante ao dos motores de corrente contínua convencionais. Porém, os motores de passos apresentam um movimento discreto, isto é, giram incrementalmente. Assim, uma das principais características deste tipo de motores é o seu número de passos. Na atuação de válvulas proporcionais, o número de passos dita a resolução do movimento do êmbolo que é possível obter e, consequentemente, a regulação do caudal.

Atualmente existem 3 tipos principais de motores de passos, os motores de relutância variável, os motores de íman permanente, e os híbridos. Os motores de relutância variável têm um rotor de material ferromagnético e um estator com vários enrolamentos. Quando é aplicada uma diferença de potencial a um par de enrolamentos opostos, a corrente elétrica que por eles passa, gera um campo magnético que atrai o rotor, fazendo-o girar. Os motores mais comuns são os de íman permanente, por serem mais baratos. Nestes, o rotor é um íman permanente com muitos pólos e o estator tem apenas um par de enrolamentos. Este tipo de motor de passos tem um número de passos menor e, portanto, uma resolução inferior. Por fim, os motores de passos híbridos são uma combinação dos anteriores, sendo que utilizam o rotor dos motores de relutância variável e têm um íman permanente colocado axialmente [6].



(a) Relutância variável

(b) Íman permanente

(c) Híbrido

Figura 2.6: Tipos de motores de passos

Os motores de passos podem ser controlados de forma unipolar ou bipolar. A principal diferença entre estes dois tipos de controlo reside no facto de no controlo unipolar a alimentação ser feita no meio de cada par de enrolamentos, como se pode ver na Figura 2.7. Assim, no controlo unipolar é aplicada tensão a metade do enrolamento de cada vez, ao passo que no controlo bipolar a tensão é aplicada a cada enrolamento por completo. Por utilizar o enrolamento completo, o controlo bipolar oferece um binário maior, comparativamente ao controlo unipolar. Contudo, este necessita de um circuito mais complexo e com mais componentes, ao passo que o controlo unipolar utiliza um circuito mais simples.

Uma outra característica dos motores de passos é o binário que são capazes de desenvolver. Este binário é máximo quando o motor está fixo numa posição, com uma corrente elétrica aplicada. No entanto, este tipo de motores são capazes de manter uma posição sem necessitar de corrente elétrica, mas com um binário inferior. Esta é uma

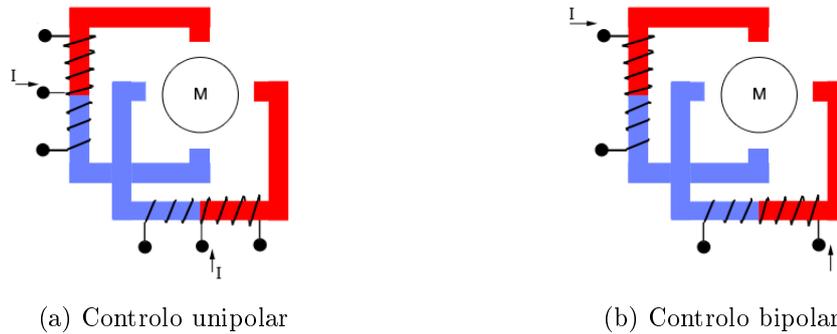


Figura 2.7: Tipo de controle dos motores de passo

das vantagens deste tipo de atuadores, que não apresentam consumo energético quando estão fixos numa posição, o que é algo interessante e desejável numa válvula proporcional. Também, apresentam uma boa repetibilidade, podendo ser controlados em malha aberta, o que os torna uma solução de baixo custo. No entanto, os motores de passo apresentam uma resposta em frequência relativamente baixa quando comparados com outro tipo de atuadores. Isto é, têm uma baixa capacidade de resposta a variações na carga a que estão sujeitos. Para além disto, os motores de passos são, geralmente, pouco compactos, sendo o seu tamanho proporcional ao binário que são capazes de desenvolver. Estes dois últimos pontos constituem características indesejáveis na atuação de uma válvula proporcional.

2.2.3 Atuação servo hidráulica

A atuação servo hidráulica aproveita a pressão do fluido para exercer uma força no êmbolo e movimentá-lo. Isto leva a que haja uma redução do consumo energético da válvula, visto que apenas é necessário regular um caudal de pilotagem. Este tipo de atuação aparece associado a válvulas de alta performance, onde o controlo de posição ou velocidade são críticos como, por exemplo, na indústria aeronáutica.

Como foi referido anteriormente, as servo-válvulas utilizam um caudal de pilotagem, que por sua vez atua sobre um êmbolo. Trata-se de um estágio de amplificação, sendo que as servo-válvulas podem ter um, dois ou até mesmo três estágios de amplificação. Visto que é a pressão do fluido que atua sobre a válvula, fica claro que este tipo de válvulas apresenta um melhor comportamento a pressões elevadas e típicas de sistemas óleo-hidráulicos que se encontram em maquinaria pesada. Este tipo de válvulas utiliza ainda controlo em malha fechada, por forma a garantir que a posição do êmbolo é a desejada. Assim, pode-se observar um comportamento linear na relação entre o sinal de entrada e a abertura da válvula.

Atualmente existem três tipos de atuações servo hidráulicas possíveis. A atuação servo hidráulica por êmbolo, por *flapper nozzle* ou por *jet pipe*. Na primeira, existe um êmbolo, atuado por um solenóide, que desvia o caudal de pilotagem para uma das câmaras de controlo do êmbolo principal, fazendo variar a posição de abertura da válvula. No caso de se tratar de um sistema *flapper nozzle*, o caudal de cada uma das câmaras é regulado por um único balancé que quando diminui o caudal de uma câmara, aumenta o caudal da outra. Por fim, a atuação por *jet pipe* tem um tubo flexível, por onde passa o caudal de pilotagem, que é direcionado para cada uma das câmaras. Estes dois últimos

tipos de construção das servo-válvulas podem ser vistos na Figura 2.8.

Em suma, pode concluir-se que as servo válvulas têm como pontos fortes o baixo consumo e uma boa resposta em frequência. No entanto, são válvulas bastante complexas construtivamente, pelo que são mais dispendiosas. Oferecem um melhor desempenho com pressões mais elevadas, não tendo sido concebidas para sistemas de baixa pressão como os de águas domésticas. Ainda assim o seu princípio de funcionamento pode ser adaptado de forma a aproveitar algumas das vantagens que estas válvulas oferecem.

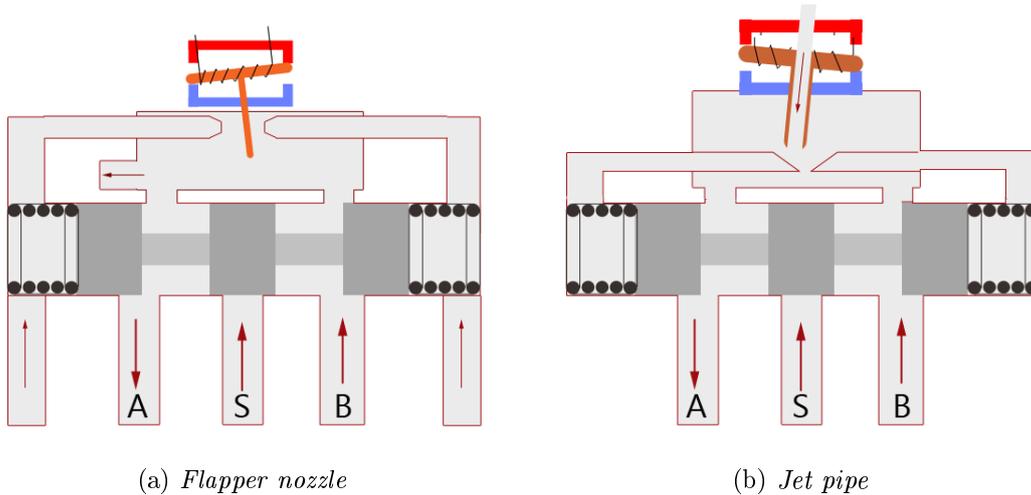


Figura 2.8: Tipos de servo-válvulas

2.2.4 Atuações não convencionais

Até aqui foram vistos os tipos de atuação mais comuns e que se encontram em diversas válvulas proporcionais. Contudo, existem outros tipos de atuação, que se baseiam em princípios de funcionamento alternativos, e que, por isso, são soluções diferentes. A este nível existem inúmeros sistemas de atuação inovadores, com características promissoras, todavia, nesta secção apenas são abordadas tecnologias que já foram testadas em laboratório e que demonstraram poder ser implementadas à escala industrial.

2.2.4.1 Materiais com memória de forma

A investigação acerca dos materiais e suas propriedades levou à descoberta de que certas ligas metálicas apresentam memória de forma. Isto é, após deformadas são capazes de voltar à forma original através de uma variação na sua temperatura. Este comportamento super elástico deve-se a uma mudança de fases que ocorre na estrutura cristalina dos materiais. Esta mudança de fase dá-se com o aumento da temperatura e acontece entre as fases martensítica e austenítica dos materiais [5].

Existem dois possíveis tipos de memória de forma. A primeira, em que o material é deformado por uma carga e volta ao seu estado inicial por aquecimento, e a segunda, em que o material oscila entre dois estados de deformação por aquecimento e arrefecimento. O aumento e a diminuição de temperatura podem ser feitos por qualquer um dos três mecanismos de transferência de calor, embora no aquecimento sejam comumente utilizadas resistências elétricas.

O efeito de memória de forma pode ser observado em metais nobres, especificamente em ligas de Cobre e ligas de Titânio e Níquel. Estas são ligas estáveis e que resistem muito bem à corrosão, daí serem preferencialmente utilizadas visto que a durabilidade é um fator importante num atuador. Este tipo de atuadores tem um consumo energético reduzido, contudo, apenas conseguem atuar em cursos relativamente pequenos. Também o facto de necessitarem de variações de temperatura faz com que tenham alguma histerese, o que não é desejável numa válvula proporcional. Assim, este tipo de atuação pode ser pertinente quando utilizado na pilotagem de válvulas onde os caudais envolvidos são mais pequenos.

2.2.4.2 Materiais piezoelétricos

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie. Este efeito baseia-se na relação que alguns materiais apresentam entre a carga elétrica e a deformação elástica. Isto é, quando é aplicada uma diferença de potencial a um material piezoelétrico, este deforma-se elasticamente. Esta relação permite que estes materiais possam ser utilizados como atuadores, ou até mesmo como sensores em certos processos. Existem diversos materiais que têm um efeito piezoelétrico, contudo, os mais utilizados são os cristais de quartzo.

Este efeito apresenta um consumo energético muito reduzido, e os deslocamentos que apresenta, são também bastante reduzidos, da ordem dos μm . Outro fator que pode constituir uma desvantagem, é que o efeito piezoelétrico é atenuado por variações de temperatura e interferências de campos eletromagnéticos, pelo que este tipo de atuadores apresenta uma baixa repetibilidade em malha aberta [7].

2.3 Sensores

Uma das formas possíveis de regular o caudal de uma válvula é pela implementação de um controlador em malha fechada. Como já foi visto anteriormente, o controlo em malha fechada pressupõe a aquisição de um sinal de referência. É, por isso, pertinente abordar os tipos de sensores existentes, e a forma como estes podem ser utilizados para estabelecer o controlo da válvula.

Medição de caudal

Visto que o sinal que é desejado controlar é o caudal, a utilização de um caudalímetro permite implementar um controlador de forma direta. Os caudalímetros são, como o próprio nome sugere, sensores que fazem a leitura de um caudal. No entanto, existem várias maneiras de realizar a medição de um caudal. As duas formas principais de medir um caudal são, pela medição da velocidade do escoamento ou, alternativamente, pela taxa de movimentação de um volume conhecido.

A medição da velocidade do escoamento pode ser feita com a colocação de um elemento móvel, como por exemplo uma pequena turbina no escoamento. A força do escoamento vai impelir às lâminas da turbina, fazendo com que esta tenha uma dada rotação. Deste modo é possível estabelecer uma relação entre a velocidade do escoamento e a velocidade de rotação da turbina, que permite determinar o caudal do escoamento. Se a turbina for feita com um material ferro magnético, pode utilizar-se um sensor de Hall

para determinar a velocidade de rotação da turbina. Esta técnica é bastante utilizada e pode ser implementada de muitas formas, tendo em conta a velocidade do fluido que é necessário medir.

A medição por movimentação de um volume de fluido constante utiliza um princípio de funcionamento diferente daquele que foi descrito anteriormente. Esta técnica baseia-se num pistão rotativo que desloca um volume de fluido por cada rotação. Assim, quanto maior o caudal mais voltas o pistão dá por unidade de tempo, e com isto pode determinar-se o caudal do escoamento. No entanto, em geral, os sensores de caudal apresentam alguns erros nas medições que realizam, devido à variação de factores como a pressão, a temperatura ou a viscosidade do fluido. É também necessário ter em conta que, devido à natureza deste tipo de sensores e por interferirem diretamente no escoamento, estes vão causar uma perda de carga adicional no escoamento [8].

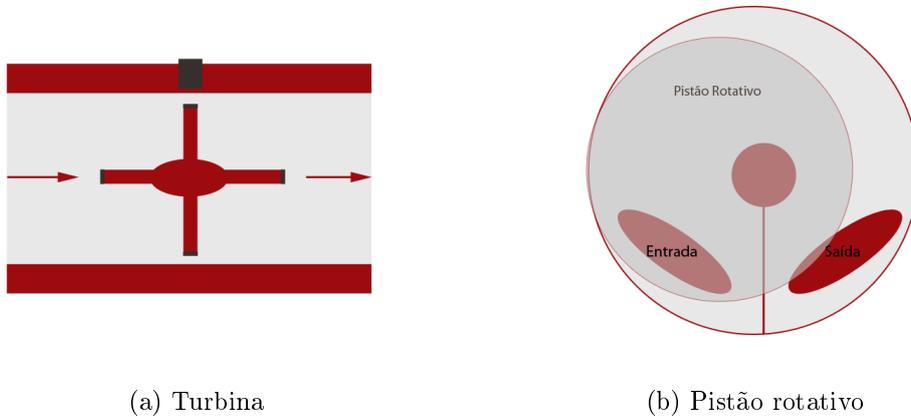


Figura 2.9: Tipos de caudalímetros

Medição de pressão

Como já foi analisado anteriormente, o caudal em regime turbulento que atravessa um orifício pode ser determinado pela expressão 2.2. Pode observar-se que para um dado instante, sabendo a área de passagem e a diferença de pressão entre a entrada e a saída do orifício, é possível determinar o caudal. Esta é uma forma indireta de medir o caudal, sem interferir com o escoamento.

Atualmente existem diversas tecnologias utilizadas na medição de pressão. Uma das mais utilizadas baseia-se na relação que existe entre a deformação mecânica e a resistência elétrica de alguns materiais. Certos materiais, apresentam uma variação na sua resistência elétrica quando sofrem uma deformação elástica devida a uma carga externa. Contudo, esta variação na resistência elétrica é bastante baixa, pelo que o sinal de tensão que é possível gerar é também muito baixo. Para que seja possível utilizar este sinal num controlador é necessário utilizar alguma instrumentação adicional, que se resume essencialmente a uma ponte de *Wheatstone* e um amplificador operacional.

Outro tipo de tecnologia utilizada na medição de pressão baseia-se no efeito piezo-elétrico que alguns materiais apresentam. Os materiais mais utilizados são os cristais de Quartzo ou de Turmalina. Quando sofrem uma deformação mecânica, este tipo de

materiais apresenta uma carga elétrica que permite a aquisição de um sinal de tensão. À semelhança do que foi descrito anteriormente, também neste tipo de sensores é necessário utilizar instrumentação adicional para que o sinal de tensão seja compatível com o controlador elétrico.

Os sensores de pressão podem constituir uma solução alternativa ao uso de sensores do tipo caudalímetro para a leitura do caudal. Em geral, os sensores de pressão são sensíveis à variação de temperatura pelo que, para além da instrumentação necessária para adquirir o sinal de tensão, é preciso também adicionar alguns componentes que façam a compensação da temperatura. Atualmente os sensores de pressão já trazem os circuitos de instrumentação de forma integrada, pelo que a sua utilização é simples e direta. No entanto este acréscimo de complexidade faz com que os sensores de pressão tenham um custo elevado, o que os torna uma solução pouco apelativa em aplicações menos exigentes.

Medição de posição

Nas válvulas controladas por valores pré-definidos (mapeamento de válvulas), a relação caudal-posição do êmbolo é conhecida, pelo que o sinal de referência que é controlado diretamente é a posição do êmbolo. Neste sentido, a utilização de sensores de posição é bastante importante para que se consiga estabelecer um controlo em malha fechada da posição do êmbolo.

É possível estabelecer uma divisão clara entre os sensores de posição, podendo estes ser de posição angular ou linear. No caso das válvulas os mais adequados são os sensores de posição linear, sendo que a este nível, existem diversos tipos de sensores com diferentes princípios de funcionamento. Alguns sensores utilizam a variação de resistência elétrica, à semelhança de um potenciómetro, outros utilizam os princípios da ótica e transmissão de luz, e também existem os que se baseiam nos princípios do magnetismo. Aquele que apresenta o melhor compromisso entre vantagens e desvantagens é o transformador diferencial linear variável, o que o torna o sensor preferencialmente utilizado em válvulas.

O transformador diferencial linear variável (LVDT) é composto por 3 enrolamentos e um corpo móvel ferromagnético. Os enrolamentos encontram-se dispostos como mostra a Figura 2.10, sendo que um deles é o primário e os outros dois são os secundários. O primário é excitado com uma corrente alternada sinusoidal, e consoante a posição do núcleo móvel cada um dos enrolamentos secundários vai ter uma tensão induzida nos seus pólos. Assim, quando o núcleo móvel está na posição central ($x=0$) a tensão à saída do secundário é nula. Quando o núcleo móvel se desloca na direção positiva o fluxo magnético que atravessa o enrolamento da direita é maior e, conseqüentemente, a tensão induzida. Se o núcleo móvel se deslocar no sentido contrário, é o enrolamento da esquerda que tem uma tensão induzida maior. Como os dois enrolamentos secundários estão ligados em série, as suas tensões induzidas subtraem-se, e na prática o sinal de tensão que o controlador elétrico irá adquirir varia linearmente numa gama de valores, sendo por isso possível estabelecer uma relação entre este sinal e a posição do êmbolo [9].

Devido ao seu princípio de funcionamento, estes sensores apresentam uma resolução que se pode considerar quase infinita, desde que se tenha implementada a correta instrumentação para detetar a variação dos níveis de tensão. Para além disto, são bastante robustos e fiáveis, e apresentam muito pouco desgaste, visto que os seus componentes não têm contacto entre si.

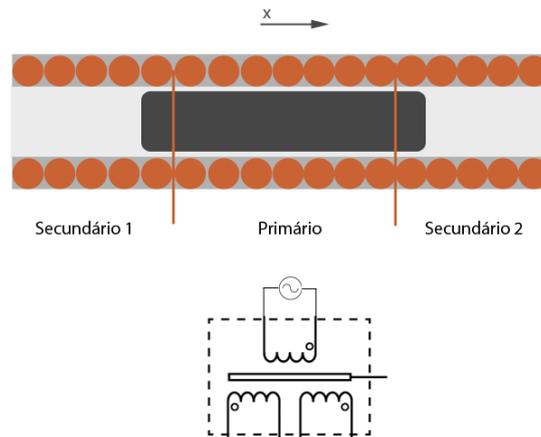


Figura 2.10: Diagrama de um LVDT

2.4 Aspectos construtivos em válvulas

Até aqui foram abordados os aspectos relacionados com a atuação e o controle de válvulas proporcionais. Estes aspectos são uma parte importante no processo de desenvolvimento de uma válvula, contudo, existem outros aspectos, relacionados com a construção da válvula que também são importantes e influenciam a sua eficiência global. As válvulas proporcionais reguladoras de caudal podem ser utilizadas nos mais variados processos e ambientes pelo que, na fase de desenvolvimento é necessário ter em conta um conjunto de fatores que ajudam a determinar uma série de opções que podem ser tomadas durante o desenvolvimento da válvula. A seleção de materiais e o dimensionamento devem ter em conta fatores como a pressão de trabalho, o caudal nominal, as fugas admissíveis e em especial a variação de área do orifício com a posição do êmbolo.

Existem diversas formas de dispor e dimensionar o êmbolo que faz a regulação do caudal. O êmbolo é um elemento regulador do caudal da válvula, contudo, este elemento nem sempre tem de ser um êmbolo. Algumas válvulas utilizam uma esfera com um furo, cuja rotação faz variar o caudal que passa pela válvula. Este tipo de regulação é mais encontrada em válvulas on-off, visto que a regulação proporcional deste tipo de válvulas é complexa e ineficiente.

Nas válvulas reguladoras de caudal a configuração mais comum é com um êmbolo, cujo deslocamento faz variar a área do orifício. No entanto, o êmbolo pode ser colocado de diversas formas, sendo por isso, necessário ter em conta alguns pontos importantes. Durante o funcionamento da válvula, o êmbolo vai estar sujeito a várias forças. As forças que se exercem na direção axial do êmbolo são vencidas pela atuação do mesmo, contudo, as que se exercem na direção radial causam esforços de flexão no êmbolo. Estes esforços afetam o deslocamento do êmbolo, pelo que prejudicam a regulação do caudal. Para contrariar este efeito o êmbolo deve ter guiamento ao longo do seu movimento. Este guiamento pode ser feito na haste do êmbolo, como mostra a Figura 2.11c, ou pode ser feito lateralmente com uma gaiola, como mostra a Figura 2.11b.

As dimensões do êmbolo dependem, essencialmente, do caudal nominal máximo e das

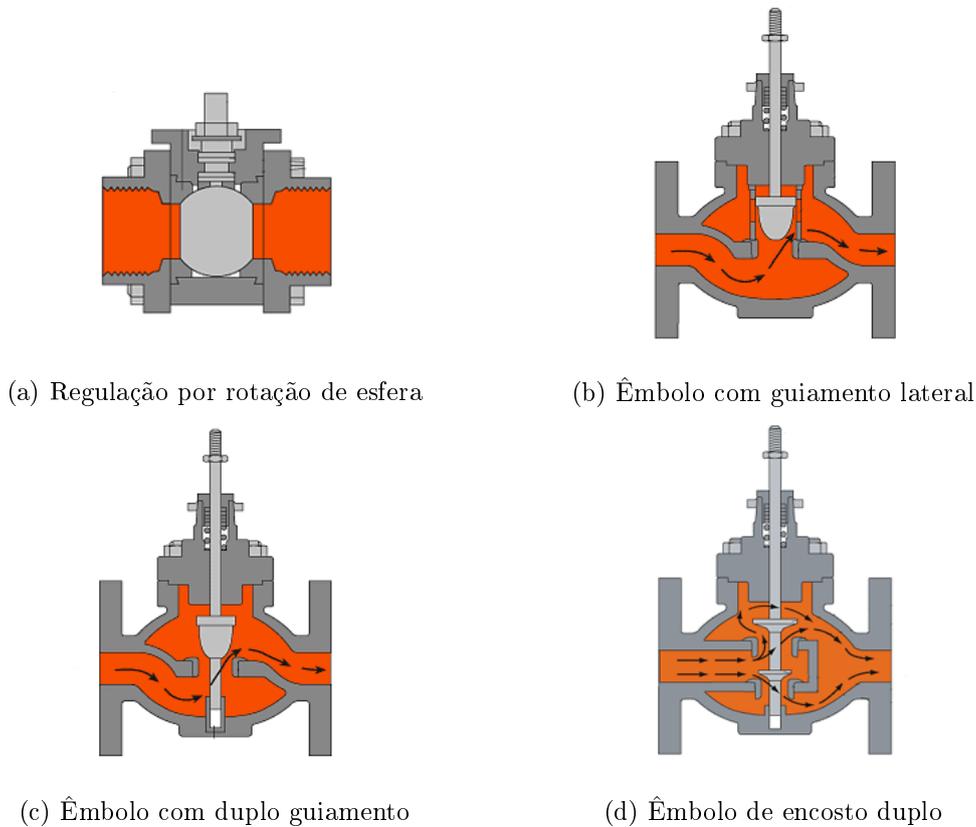


Figura 2.11: Configurações do êmbolo. Figura retirada de [11].

pressões de funcionamento da válvula. Com estes dois parâmetros pode-se determinar qual a área máxima e respetivo curso que permitem obter o caudal desejado. Quando se desejam ter caudais elevados e um êmbolo com um curso pequeno, pode-se utilizar uma solução como da Figura 2.11d. Nesta figura pode-se observar que para o mesmo êmbolo existem dois orifícios reguladores de caudal. Deste modo, o êmbolo tem um duplo encosto e guiamento, o que lhe confere um movimento estável e, conseqüentemente, uma boa resposta. Este tipo de solução é bastante utilizada em válvulas que têm uma pressão de funcionamento elevada, como são, por exemplo, os circuitos óleo-hidráulicos [10].

Como já foi visto anteriormente, o caudal pode depender apenas da variação da área do orifício, caso exista a compensação de pressão. Por sua vez, a área do orifício varia com o deslocamento do êmbolo, pelo que existe uma relação entre a área do orifício e o deslocamento do êmbolo. Idealmente esta relação deve ser o mais linear possível, por forma a garantir que o ganho do caudal se mantém constante ao longo de toda a gama de caudais de funcionamento.

2.4.1 Materiais utilizados em válvulas

Em qualquer projeto de desenvolvimento em que seja necessário construir algo, a seleção dos materiais adequados constitui uma etapa importante. No caso de uma válvula reguladora de caudal existem diversos critérios que devem ser tidos em conta quando se seleciona um material para a sua construção. Neste campo deve-se ter em conta as

características do fluido cujo caudal a válvula vai regular, a pressão e a temperatura de funcionamento. Estes três fatores influenciam diretamente o comportamento da válvula, bem como a sua resistência e durabilidade. Para além disto, se a válvula for controlar processos relacionados com a confeção de alimentos é necessário ter em conta as características higiénicas do material.

Os materiais metálicos são os mais utilizados na construção de válvulas, em especial em válvulas para ambientes industriais. Existem diversos materiais metálicos, que podem ser agrupados em diversos tipos. Um tipo de materiais metálicos bastante utilizado são os ferros fundidos. Devido à sua natureza permitem o fabrico por fundição e têm uma excelente resistência à temperatura pelo que são recomendados para válvulas de grande dimensão, que necessitem de regular fluidos a altas temperaturas. O outro tipo de metais também bastante utilizado são as ligas de aço, que em geral apresentam uma excelente resistência mecânica. Os aços austeníticos apresentam não só uma excelente resistência mecânica como também, resistem muito bem ao aumento de temperatura. Contudo, este tipo de ligas apresenta uma baixa resistência à corrosão, que é algo que aparece naturalmente, com a passagem de fluidos como a água. Este problema pode ser atenuado com a galvanização ou revestimento polimérico das superfícies.

Para além das ligas metálicas já referidas, existem também as ligas de latão que são bastante utilizadas em válvulas e acessórios de canalização de instalações domésticas. Estas ligas metálicas apresentam uma resistência mecânica e térmica mais baixa, quando comparadas com as ligas de aço, sendo que apresentam um comportamento melhor à corrosão. Tal justifica serem bastante utilizadas em instalações domésticas onde a durabilidade é um requisito importante.

Por fim, como alternativa aos materiais metálicos surgem os polímeros, que também são dos mais indicados para válvulas de baixa pressão e temperatura. No entanto, os polímeros apresentam como principal vantagem o facto de não sofrerem corrosão. Para além disto, este tipo de materiais permite obter válvulas pelo processo de injeção, com custos de fabrico reduzidos. Os polímeros mais utilizados são o PTFE, geralmente designado por *Teflon*. Também são bastante utilizados o ABS ou o PVC.

2.5 Soluções comerciais existentes

As válvulas proporcionais são um elemento crucial no controlo de processos, pelo que existem diversas soluções disponíveis para responder às necessidades do mercado. Por isto, é pertinente analisar as soluções existentes que mais se aproximam dos objetivos deste trabalho e assim perceber quais são as tecnologias e características mais comuns.

Uma das soluções existentes é a *DeltaP Valve* criada pela *Flow Control Industries*. Esta série de válvulas opera com pressões até aos 5 bar e a maior válvula consegue fornecer um caudal máximo de 30 litros por minuto. Uma das características mais interessantes destas válvulas é que garantem a compensação de pressão com um sistema mecânico, sem necessitarem de sensores adicionais. O corpo e as partes móveis desta válvula são feitos em latão e em aço inoxidável, tornando-a numa solução robusta e fiável. O atuador não vem incluído nesta válvula, pelo que é adaptado depois pelo utilizador [12].

Uma outra solução disponível são as válvulas da série *E22*, criadas pela *Numatics*. Estas são válvulas de alta performance, destinadas ao controlo de processos onde a precisão é fundamental. À semelhança da solução descrita anteriormente, esta série de válvulas

também garante a regulação de caudal independente das variações de pressão. Porém, estas válvulas utilizam sensores de pressão para estabelecer um controle em malha fechada, e assim estabelecer a regulação do caudal. A atuação é feita por solenóide, pelo que esta válvula tem uma resposta rápida e uma repetibilidade alta [13].

Parte II

Modelação e simulação de sistemas da válvula

Capítulo 3

Modelação e modelos

3.1 Terminologia e conceitos

Um sistema físico não evolui baseado num conjunto de fenómenos que podem ser observados e controlados. Este conjunto de fenómenos tem uma fronteira sobre a qual interage com o ambiente em seu redor. Estas interações realizam-se através de entradas e saídas, sendo que o sistema varia as suas saídas, em função das suas entradas e do seu estado interno. Os fenómenos físicos presentes num sistema podem ser de natureza fluidica, eletromagnética, mecânica ou até mesmo termodinâmica.

A modelação matemática permite estudar e analisar o comportamento de um sistema físico. Um modelo é uma representação simplificada de um sistema físico, na medida em que não pode representar todos os fenómenos presentes nesse sistema, mas apenas a parte que é relevante para o estudo que se pretende realizar. A utilização de modelos permite estudar o comportamento de um sistema numa qualquer situação de funcionamento, sem ter que lidar diretamente com as consequências que aconteceriam na realidade. Desta forma é possível evitar a complexidade, os custos, o tempo, o perigo e a irreversibilidade inerentes à realidade [14].

A construção do modelo de um sistema físico requer que se estabeleçam compromissos. Um modelo é sempre uma simplificação e idealização de um sistema, no entanto, é necessário ter em mente que para que os resultados desse modelo sejam válidos, este deve ser representativo do sistema em causa. Posto isto, pode depreender-se que a criação de modelos é uma tarefa complexa e requer um conhecimento profundo do sistema físico que se pretende modelar.

Todos os sistemas físicos são dependentes do tempo, pelo que os fenómenos associados a estes sistemas são geralmente descritos por equações diferenciais e algébricas. As ferramentas de modelação e simulação permitem resolver estas equações e, assim, obter o comportamento de um dado sistema ao longo do tempo. Para além disto, permitem analisar e experimentar parâmetros em sistemas não lineares, para os quais não existem métodos analíticos adequados. Neste sentido, existem diversas aplicações e linguagens que permitem construir modelos e realizar simulações. Algumas destas ferramentas são direcionadas a áreas de estudo específicas, ao passo que outras permitem construir modelos de sistemas multi-físicos. Os modelos utilizados nesta dissertação foram criados no software *Simulink*TM da Mathworks, que é uma plataforma que se baseia em diagramas de blocos e que permite criar modelos multi-físicos de uma forma simples e interativa.

3.2 Modelação de sistemas físicos

Uma válvula reguladora de caudal é um sistema que compreende 3 principais tipos de fenómenos físicos. Estes são os fenómenos de natureza fluídica, os de natureza eletromagnética e os de natureza mecânica. A modelação de cada um destes fenómenos permite estabelecer o modelo da válvula reguladora de caudal, e assim estudar o seu comportamento ao longo do tempo. A componente fluídica está relacionada com a forma como o escoamento de fluido se comporta através da válvula. A componente eletromagnética aborda os atuadores ou sensores que sejam utilizados para controlar a válvula. Por último, a componente mecânica descreve a forma como os êmbolos se deslocam, levando em consideração as forças que atuam sobre eles.

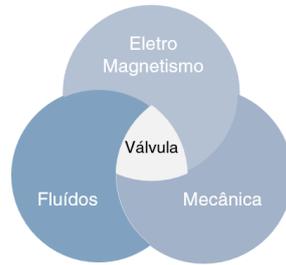


Figura 3.1: Diagrama de sistemas presentes na válvula

3.2.1 Sistemas fluídicos

Sendo o principal objetivo desta dissertação o desenvolvimento de uma válvula reguladora de caudal, os sistemas de natureza fluídica são uma parte muito importante a ter em consideração durante a modelação. Isto é, para que o modelo construído seja válido e permita obter conclusões fiáveis, é necessário ter em conta o comportamento real dos escoamentos. Neste sentido, é importante rever e aprofundar algum conhecimento de Mecânica de Fluídos. Alguns destes conceitos já foram introduzidos na Secção 2.1, pelo que nesta secção será dada mais ênfase às equações matemáticas que descrevem o comportamento destes sistemas e à forma como se aborda a parte fluídica no modelo.

Nos sistemas fluídicos existem duas principais variáveis que descrevem o comportamento do sistema ao longo do tempo. Essas variáveis são a pressão e o caudal. Em geral, a pressão não se mantém constante ao longo do sistema, no entanto o caudal poderá ou não ser constante. Por isso, torna-se importante dividir o sistema em vários volumes de controlo. Um volume de controlo é uma zona do sistema que pode ser descrita por uma pressão, por um volume interno e pelos caudais que entram e que saem desse volume de controlo. O valor da pressão varia consoante o caudal que atravessa o volume de controlo e este volume, por sua vez depende do caudal que entra e que sai do volume de controlo. Se o caudal de saída for inferior ao de entrada, então o volume do volume de controlo aumenta. Se, pelo contrário, o caudal de saída for superior ao de entrada, então o volume do volume de controlo diminui. Desta forma e aplicando o princípio de conservação de massa a um dado volume de controlo, tem-se que:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int \rho dV + \int_{sc} \rho(\vec{v}\vec{n})dS \quad (3.1)$$

Sendo que o fluido utilizado neste modelo é a água, pode assumir-se que esta é apenas ligeiramente compressível, pelo que o módulo de compressibilidade pode ser definido por $\beta = \rho(dP/d\rho)$. Com isto, e manipulando a Expressão 3.1, é possível chegar à Expressão 3.2. Esta é a expressão utilizada nos modelos para descrever a evolução da pressão num volume de controlo, tendo em conta a variação do seu volume interno e o somatório dos caudais de entrada e saída. Contudo, também é necessário definir como são calculados os caudais no modelo. Nos modelos realizados durante esta dissertação adotou-se uma metodologia em que o caudal de entrada de um volume de controlo é calculado no próprio volume de controlo. Deste modo, o caudal de saída desse volume de controlo é ditado pelo caudal de entrada do volume de controlo a jusante.

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V}{\beta} \frac{dP}{dt} = \sum \dot{Q}_{in} + \sum \dot{Q}_{out} \quad (3.2)$$

Antes de determinar como se pode calcular o caudal num orifício é importante perceber que este será diferente consoante a natureza do escoamento. A forma como as partículas de fluido se comportam quando encontram um orifício não é igual para todos os escoamentos, pelo que é necessário ter em conta o tipo de escoamento presente. Como já foi explicado na Secção 2.1, existem dois regimes de escoamento, o laminar e o turbulento, pelo que o caudal num orifício será diferente em cada um deles.

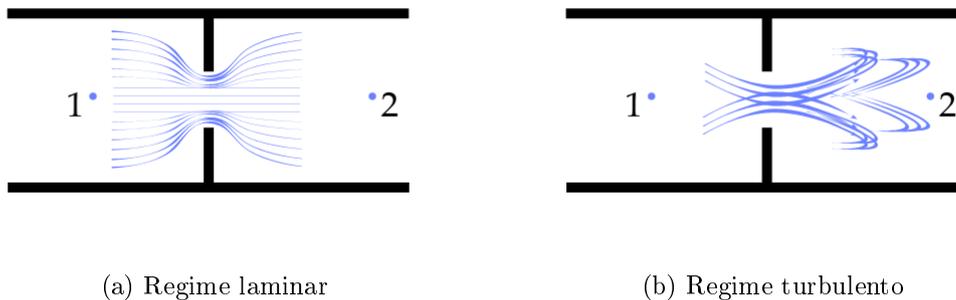


Figura 3.2: Escoamento através de um orifício

Caudal turbulento num orifício

A Figura 3.2b mostra o comportamento de um escoamento em regime turbulento quando este atravessa um orifício. Este faz com que as partículas de fluido sejam aceleradas num jato entre os pontos 1 e 2. A área deste jato de partículas é menor do que a área do orifício e varia com a distância a que as partículas estão do orifício. Experimentalmente sabe-se que a energia do fluido entre os pontos 1 e 2 não se mantém, isto é, existe uma perda. No entanto, se se assumir que o princípio de conservação de energia se verifica, sabe-se que entre os pontos 1 e 2, existe uma componente associada à energia cinética do fluido e uma componente associada à pressão do fluido. A componente gravítica pode ser ignorada, visto que não existe uma diferença de alturas de considerar na válvula.

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2}{\rho}(P_1 - P_2) \quad (3.3)$$

Pode-se assumir que a velocidade v_2 é bastante maior do que a velocidade v_1 , visto que se a área A_2 é menor do que a área A_1 e, o caudal é o mesmo.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (3.4)$$

Combinando as expressões anteriores (3.3,3.4), e assumindo ainda que a área do jato de fluido é aproximadamente a área do orifício, é possível chegar à seguinte expressão para o caudal [3]:

$$\dot{Q}_o = A_o C_d \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (3.5)$$

Deste modo pode observar-se que o caudal é uma função da área do orifício, de um coeficiente de descarga e da diferença de pressões entre os pontos 1 e 2. O coeficiente de descarga é um fator empírico que tem em conta a geometria do orifício, que tipicamente toma o valor de 0.7.

Caudal laminar num orifício

Num regime laminar as forças viscosas de fluido são maiores que as forças de inércia, pelo que o escoamento se desenvolve de uma forma organizada, na qual as camadas de fluido se mantém paralelas ao longo do escoamento. Em geral, este regime de escoamento ocorre para velocidades reduzidas e, conseqüentemente, para baixos números de Reynolds. Para estas situações já foi demonstrado experimentalmente que é possível estabelecer uma relação entre o coeficiente de descarga e o número de Reynolds do escoamento [3; 15]. Esta relação é dada pela Expressão 3.6, onde se pode observar que o coeficiente de descarga depende do número de Reynolds do escoamento e de δ , que é um coeficiente de escoamento laminar que depende essencialmente da geometria do orifício. Combinando a expressão 3.6 e a expressão 3.5 é possível obter a expressão 3.7, que descreve o caudal num orifício. Se se tratar de um caudal de fuga, pode simplificar-se esta expressão e considerar apenas um único fator, g , que é a condutância de fugas.

$$C_d = \delta \sqrt{Re} \quad (3.6)$$

$$\dot{Q}_o = \frac{2\delta^2 D_H A_o}{\mu} (P_1 - P_2) \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_f = g \Delta P \quad (3.8)$$

Em geral, nos sistemas de águas domésticas as velocidades de escoamento são relativamente altas, pelo que os regimes de escoamento são turbulentos. A expressão maioritariamente utilizada nos modelos é a expressão 3.5. Todavia, existem algumas situações onde é necessário considerar-se um caudal laminar, e em especial se se tratar de um caudal de fuga.

Área do orifício

Como visto anteriormente, uma das variáveis da qual depende o caudal num orifício é a sua área. Em geral esta área varia com o movimento de um êmbolo. Numa situação ideal a relação entre este movimento e a variação da área do orifício seria linear, contudo, esta situação nem sempre se verifica. Daí a importância de compreender os tipos de orifício que se podem utilizar, e como estes podem ser introduzidos nos modelos.

O formato de orifício mais comumente utilizado é o formato circular. Neste formato a área do orifício varia de acordo com um segmento de círculo, pelo que é necessário estabelecer relação entre a variação da área e o movimento do êmbolo. O segmento pode ser representado geometricamente como se apresenta na Figura 3.3. Esta área pode ser determinada pela dupla integração em x e em y ao longo dos limites definidos geometricamente, tal como se apresenta na Expressão 3.9 [16]. Resolvendo este duplo integral é possível chegar a uma expressão que relaciona o deslocamento do êmbolo com a área de abertura da válvula, e que é apresentada na Expressão 3.10. No entanto, a relação entre a variação da área do orifício circular com o curso de um êmbolo não é linear. Isto faz com que o comportamento da válvula não seja constante ao longo do curso da válvula. A alternativa é utilizar um orifício em anel, ou seja, em que a área do orifício varia de forma anelar. Para além disto, falando em termos mecânicos, o orifício em anel permite garantir a vedação completa no orifício, quando o êmbolo está no curso máximo. A área de um orifício em anel foi calculada, utilizando as Equações 3.11 e 3.12. A Figura 3.4 apresenta a relação entre a variação da área do orifício com o curso do êmbolo para os formatos circular, retangular e em anel. Com isto, pode observar-se que o formato em anel tem uma relação mais linear entre a variação da área e o deslocamento do êmbolo, comparativamente ao orifício circular.

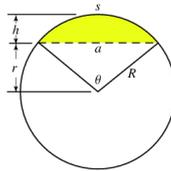


Figura 3.3: Segmento de círculo

$$A = \int_{-R\sin(\theta/2)}^{R\sin(\theta/2)} \int_{R\cos(\theta/2)}^{\sqrt{R^2-x^2}} dy dx \quad (3.9)$$

$$\frac{A(x)}{A} = \frac{1}{\pi} \left[\cos^{-1} \left(1 - \frac{2x}{D} \right) - 2 \left(1 - \frac{2x}{D} \right) \sqrt{\frac{x}{D} - \left(\frac{x}{D} \right)^2} \right] \quad (3.10)$$

$$A(x) = \pi \left(\frac{D_{\text{máx}}^2}{2} - \frac{D(x)^2}{2} \right) \quad (3.11)$$

$$D(x) = \frac{D_{\text{máx}} - D_{\text{min}}}{C} x + D_{\text{min}} \quad (3.12)$$

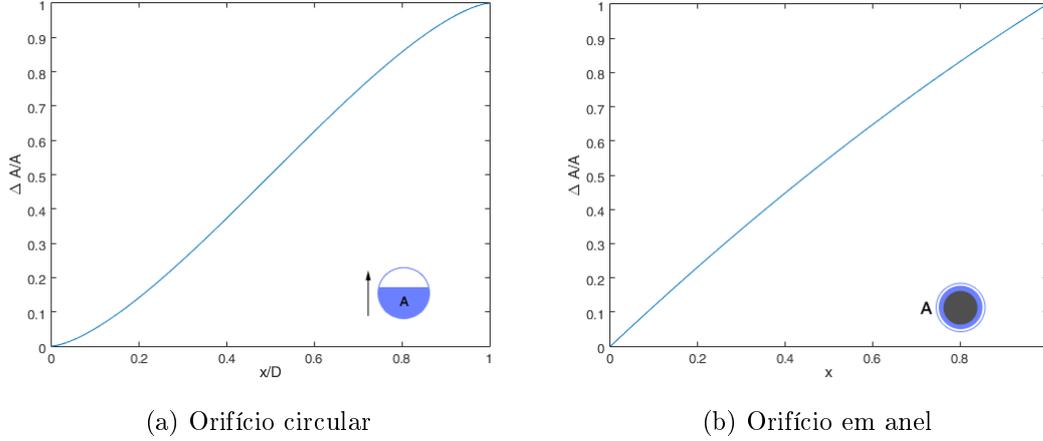


Figura 3.4: Relação área do orifício/deslocamento do êmbolo

3.2.2 Sistemas eletromagnéticos

Modelação de um LVDT

Um dos sensores mais utilizados para determinar uma posição linear é o LVDT. O princípio de funcionamento deste sensor já foi explicado na Secção 2.3, pelo que nesta secção será dada uma ênfase maior à modelação deste tipo de sensores. Um modelo deste género é composto por uma parte elétrica referente à corrente que circula nos enrolamentos, por uma parte magnética referente à indução eletromagnética que ocorre nos enrolamentos, e a uma parte geométrica que está relacionada com as dimensões do sensor. Existem diversas maneiras de construir este modelo, no entanto, uma que é simples e direta consiste em dividir o modelo nas componentes eletromagnética e geométrica referidas anteriormente [17]. Assim, começando pela componente elétrica, na Figura 3.5 é apresentado o circuito elétrico de um LVDT. Aplicando a lei das malhas a cada um dos circuitos do enrolamento primário e secundário é possível obter as seguintes expressões:

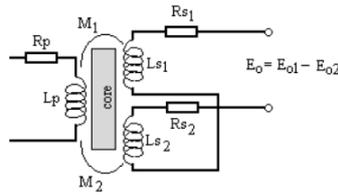


Figura 3.5: Circuito de um LVDT. Figura retirada de [17].

$$E_{in} = R_p I_p + L_p \frac{dI_p}{dt} + M_1 \frac{dI_p}{dt} - M_2 \frac{dI_p}{dt} \quad (3.13)$$

$$0 = R_s I_s + L_{s,1} \frac{dI_{s,1}}{dt} + L_{s,2} \frac{dI_{s,2}}{dt} + M_1 \frac{dI_p}{dt} - M_2 \frac{dI_p}{dt} \quad (3.14)$$

É possível observar que, para além das tensões devidas à resistência do circuito, também existem tensões relacionadas com as indutâncias próprias e mútuas dos enrola-

mentos e que são proporcionais à variação de corrente no circuito. Desenvolvendo estas expressões, 3.13 e 3.14, é possível chegar a uma expressão que relaciona a intensidade de corrente no enrolamento secundário com os restantes parâmetros e variáveis do sensor:

$$\frac{d^2 I_s}{dt^2} X + \frac{dI_s}{dt} Y + I_s R_s R_p = \frac{dI_s}{dt} (M_1 - M_2) \quad (3.15)$$

Em que:

$$X = L_p(L_{s,1} + L_{s,2}) - (M_1 - M_2)^2 \quad (3.16)$$

$$Y = L_s R_s + R_p(L_{s,1} + L_{s,2}) \quad (3.17)$$

Sabe-se também que, a tensão à saída do LVDT é uma função da resistência de carga do circuito secundário e da intensidade de corrente que o atravessa num dado instante. Com isto, e com o que foi analisado anteriormente, é possível escrever a equação diferencial que relaciona a tensão de entrada do LVDT com a tensão medida à saída.

$$\frac{d^2 E_{out}}{dt^2} X + \frac{dE_{out}}{dt} Y + E_{out} R_s R_p = \frac{dE_{in}}{dt} (M_1 - M_2) R_L \quad (3.18)$$

As relações apresentadas anteriormente correspondem à parte elétrica do sensor, e têm em conta as tensões que aparecem em cada enrolamento devido à indutância presente no circuito. No entanto, para que o modelo fique completo, é necessário estabelecer uma relação destes parâmetros elétricos com os parâmetros magnéticos e geométricos de um sensor deste tipo. Na referência [18] foi utilizada a teoria de circuitos magnéticos para criar um modelo matemático que permitisse determinar as indutâncias magnéticas deste sensor com base nas suas dimensões geométricas. Sabe-se por isso que num LVDT existem diversos fluxos magnéticos, que levam à existência de condutâncias magnéticas. As principais condutâncias magnéticas presentes num LVDT, devem-se ao fluxo magnético que atravessa os enrolamentos secundários e podem ser determinadas de acordo com as expressões 3.19 e 3.20, em que $r = \frac{2\mu_0\pi}{\ln(D/d)}$ [18].

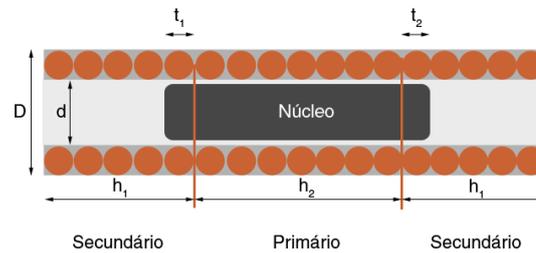


Figura 3.6: Dimensões características de um LVDT

$$G_{s,1} = t_1 r \quad (3.19)$$

$$G_{s,2} = t_2 r \quad (3.20)$$

Conhecendo as condutâncias magnéticas do circuito dos enrolamentos secundários é possível determinar as indutâncias própria e mútuas, induzidas por cada um dos enrolamentos que compõem este circuito.

$$L_p = N_p^2(G_{s,1} // G_{s,2}) \quad (3.21)$$

$$M_{s,1} = \frac{N_p N_s r t_1^2}{4h_1} \quad (3.22)$$

$$M_{s,2} = \frac{N_p N_s r t_2^2}{4h_2} \quad (3.23)$$

$$L_{s,1} = \left(\frac{N_{s,1}}{h_2} \right)^2 \frac{r(t_1 + t_2)t_1^3}{16t_2} \quad (3.24)$$

$$L_{s,2} = \left(\frac{N_{s,2}}{h_2} \right)^2 \frac{r(t_1 + t_2)t_2^3}{16t_1} \quad (3.25)$$

Combinando as equações 3.18, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25 é possível criar um modelo matemático que, com base numa tensão de excitação devolve uma tensão de saída cuja amplitude varia com a posição do núcleo. Com isto tem-se o modelo de um LVDT, que pode ser utilizado como sensor de posição de um órgão móvel de uma válvula.

Modelação de um solenóide

O solenóide é um dos atuadores possíveis para garantir o movimento do órgão móvel de uma válvula. Tal como foi visto na Secção 2.2.1, este tipo de atuadores é composto por uma bobine que, quando percorrida por uma corrente eléctrica gera um campo magnético que faz deslocar um núcleo ferromagnético. Deste modo é possível gerar um deslocamento linear em função da tensão fornecida ao solenóide. A Figura 2.5b apresenta uma representação simplificada do solenóide.

Como foi explicado anteriormente, a corrente que percorre a bobine é responsável por gerar a força magnética do solenóide. A força magnética que o solenóide é capaz de exercer depende da relutância do circuito magnético e, conseqüentemente, da indutância da bobine. Neste modelo considerou-se que apenas o espaçamento de ar oferecia relutância no circuito magnético [19]. Esta é uma aproximação razoável, visto que a relutância oferecida pelos materiais metálicos é bastante inferior àquela que o ar oferece. Neste modelo, a relutância magnética é tanto maior quanto maior for o deslocamento do núcleo, visto que deste modo o espaçamento de ar é maior. De uma forma geral, a indutância de um circuito tem uma relação inversa à relutância do circuito, pelo que, neste caso, a indutância diminui com o deslocamento do núcleo. Uma das formas de modelar um solenóide consiste em considerar que este se aproxima a um circuito eléctrico com um elemento resistivo e um elemento indutivo ideal em série. Aplicando a lei das malhas é possível chegar à Equação 3.26, na qual o segundo membro tem três termos. O primeiro termo é a perda resistiva do circuito, o segundo termo é a tensão induzida no circuito devido à variação da intensidade de corrente e o terceiro termo é a força contra eletromotriz, causada pelo movimento do núcleo ferromagnético [19].

$$E = RI + L(x) \frac{dI}{dt} + I \frac{dL(x)}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (3.26)$$

A indutância varia com a relutância do circuito, que conseqüentemente varia com a posição do núcleo ferromagnético que faz aumentar ou diminuir o espaçamento de ar no solenóide. Considerando o solenóide representado na Figura 3.7, existe uma variação da indutância de acordo com a função 3.27, em que $L_0 = \frac{\pi d \mu_0 a N^2}{e}$ [20]. Resolvendo a equação diferencial 3.26 é possível determinar a intensidade corrente que atravessa o solenóide, dada uma tensão de alimentação. Conhecendo a intensidade de corrente é possível determinar a força magnética que o solenóide exerce, através da expressão 3.28 [20].

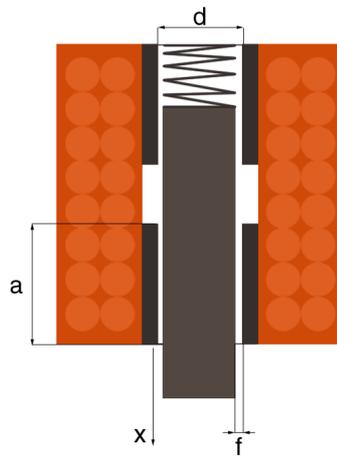


Figura 3.7: Representação simplificada de um solenóide

$$L(x) = L_0 \left(\frac{x}{x+a} \right) \quad (3.27)$$

$$F_{mag} = \frac{I^2}{2} \frac{aL_0}{(a+x)^2} \quad (3.28)$$

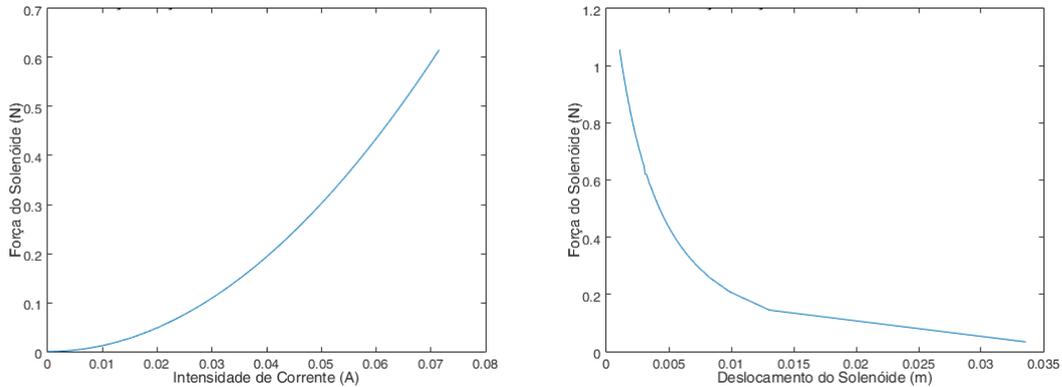
Os solenóides são um tipo de atuadores que já se encontram bastante estudados, pelo que o seu comportamento dinâmico já é conhecido. Tipicamente, sabe-se que a força magnética exercida por um solenóide descrece com o aumento do deslocamento linear do núcleo, x . Para além disto, a Equação 3.28 demonstra de forma inequívoca que a força magnética aumenta com o quadrado da intensidade de corrente que percorre o enrolamento do solenóide. Estas duas conclusões acerca do comportamento de um solenóide, permitem de uma forma qualitativa, validar o modelo criado e verificar que este é representativo do sistema em questão. Neste sentido foram realizadas algumas simulações, nas quais os parâmetros do solenóide foram ajustados de acordo com a Tabela 3.1. Estas simulações permitiram obter os gráficos das Figuras 3.8a e 3.8b, onde é possível observar as relações força-deslocamento e força-intensidade do solenóide. Estes gráficos permitem concluir que, de facto, o comportamento do solenóide modelado é semelhante ao que se espera de um solenóide, sendo que isto permite validar o modelo para ele criado.

3.2.3 Sistemas mecânicos

Os sistemas mecânicos móveis presentes numa válvula são os êmbolos que fazem variar a área dos orifícios. Estes apresentam um movimento de translação ao longo de um curso

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados na validação do modelo.

N	$d(\text{mm})$	$R(\text{Ohm})$	$e(\text{mm})$	$m(\text{kg})$	$a(\text{mm})$
3035	8	140	1.2	0.08	6



(a) Relação entre a força do solenóide e a intensidade de corrente
 (b) Relação entre a força do solenóide e o seu deslocamento

Figura 3.8: Comportamento do modelo de solenóide implementado

definido, sendo que durante esse movimento estão sujeitos a diversas forças. Para que o modelo criado para o êmbolo seja válido, e os seus resultados correspondam ao que acontece na realidade, é necessário ter em conta todas as forças que atuam sobre esse êmbolo.

Como já foi referido anteriormente, o atuador eletromagnético é responsável por garantir o movimento do êmbolo, pelo que uma das principais forças a que o êmbolo está sujeito é a força exercida pelo atuador. A passagem do fluido também gera forças sobre o êmbolo em duas componentes distintas. A primeira componente relacionada com as forças do escoamento que dependem da trajetória e velocidade do fluido e a segunda relacionada com a pressão do fluido. A pressão do fluido contribui com uma força proporcional à área em que o fluido esteja em contato com o êmbolo. Para além destas, e visto que o êmbolo é um corpo em movimento, é também necessário considerar a existência das forças de rigidez, atrito e inércia do sistema.

O comportamento de um sistema deste género ao longo do tempo é descrito por uma equação diferencial de 2^a ordem. Esta equação pode ser deduzida com a aplicação da Segunda Lei de Newton, a qual diz que a força resultante do conjunto de forças que atuam sobre um corpo produz nele uma aceleração com a mesma direção e sentido da força resultante. Nos modelos utilizados durante esta dissertação a segunda Lei de Newton foi sempre utilizada para obter as equações de movimento dos órgãos móveis das válvulas. Para que se compreenda melhor como a Lei de Newton foi aplicada será apresentada a dedução das equações de movimento para um êmbolo compensador de pressão, utilizado em alguns modelos.

Equações de movimento para um êmbolo compensador

O êmbolo compensador permite regular a pressão à saída ou à entrada de uma válvula reguladora de caudal. O primeiro passo a ser realizado para determinar a equação de movimento deste êmbolo é compreender quais são as forças que se exercem sobre ele. Para tal é conveniente fazer um diagrama de corpo livre que, de forma simples, permite observar as forças e o seu sentido. A Figura 3.9b apresenta o diagrama de corpo livre para o êmbolo representado na Figura 3.9a. Se o êmbolo fosse deslocado no sentido positivo, isto é, para a esquerda, sobre este seriam exercidas as seguintes forças:

1. Força exercida pela mola.
2. Força de atrito.
3. Força de inércia.
4. Pressão do fluido P_2 sobre a área do êmbolo.
5. Pressão do fluido P_1 sobre a área do êmbolo.

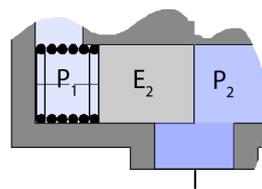
Com o conhecimento de todas as forças que atuam sobre o êmbolo, é possível fazer um balanço das forças:

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + Kx + P_1A = P_2A \quad (3.29)$$

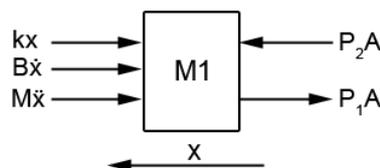
Manipulando matematicamente a expressão 3.29 é possível obter uma equação diferencial de 2^a ordem, que descreve o movimento do êmbolo:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \left(P_2A - P_1A - B\dot{x} - Kx \right) \quad (3.30)$$

Com base nesta equação é possível modelar a componente mecânica, sendo que esta permite aproximar o modelo àquilo que é o comportamento real do sistema.



(a) Esquema



(b) Diagrama de corpo livre

Figura 3.9: Êmbolo compensador

3.3 Implementação em Simulink

Tal como já foi referido anteriormente, o desenvolvimento de modelos foi realizado no Simulink™R2015a. Este software permite modelar de uma forma intuitiva, a partir de diagramas de blocos. Assim, uma das principais tarefas consistiu em modelar cada um dos sistemas apresentados nesta secção no Simulink™. De uma forma resumida, esta tarefa consistiu em implementar as equações apresentadas anteriormente em diagramas de blocos, utilizando as funções disponíveis nas bibliotecas do Simulink™. Os blocos mais utilizados são da biblioteca de matemática e de continuidade, no entanto, em algumas situações foi necessário implementar blocos específicos que melhoram a performance do modelo, como os saturadores. Muitos dos modelos matemáticos que foram apresentados podem ser utilizados em diversos modelos conceituais, pelo que, nesse sentido, existiu a necessidade de se utilizar uma metodologia de organização que permitisse reutilizar por várias vezes os modelos construídos. Para tal, foi utilizada a funcionalidade de criar subsistemas com máscaras, que permite criar um bloco de funções com as entradas e saídas que se desejar. Dentro do bloco criado encontram-se todos os blocos necessários à implementação do modelo matemático desejado. Isto levou a que fosse criada uma biblioteca de blocos própria, que contém todos os blocos criados e que tornou o trabalho de modelação muito mais transparente e eficiente.

A biblioteca criada contém diversos blocos que modelam todos os sistemas físicos que foram necessários considerar durante esta dissertação. Foram criados diversos blocos que modelam:

1. Variação da área de um orifício mediante o curso de um órgão regulador, para diferentes geometrias. (quadrangular, circular, em anel)
2. Caudal em regime turbulento para orifícios com diferentes geometrias.
3. Volumes de controlo com um diferente número de caudais de entrada e saída (dois caudais de entrada , um caudal de saída).
4. Órgãos com diferentes tipos de atuação (hidráulica e elétrica).
5. Modelo matemático de um LVDT.

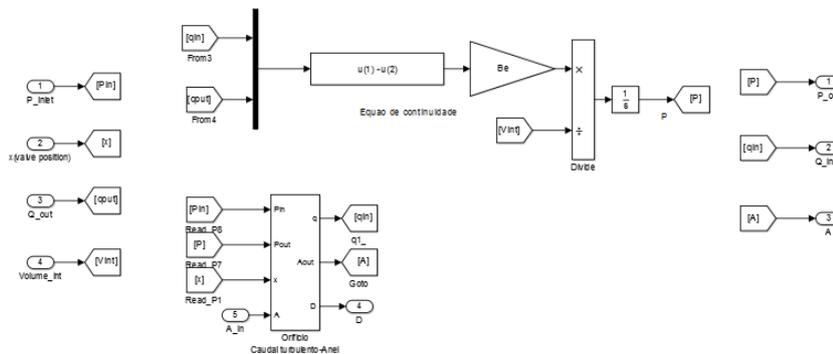


Figura 3.10: Exemplo da implementação de um volume de controlo em Simulink

Capítulo 4

Pré-estudo de soluções possíveis

O principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um protótipo funcional de uma válvula reguladora de caudal. Como já foi visto no estado da arte, existem diversas formas de garantir a regulação de caudal. Neste sentido desenvolveram-se três propostas conceituais, que procuram responder aos requisitos da válvula que se pretende desenvolver. Para avaliar qual a proposta que melhor se adequa, e que apresenta os melhores resultados, foi realizado um pré estudo. Neste, foram feitas algumas simulações para avaliar a viabilidade de cada solução proposta. Nos conceitos que demonstraram ser viáveis, também se desenvolveu uma proposta de implementação de protótipo. Esta proposta pretende apenas demonstrar uma solução possível para a implementação do protótipo.

4.1 Conceito 1 - Compensador mecânico de pressão

Descrição do sistema

Como observado anteriormente, o caudal em regime turbulento num orifício é uma função da área do orifício e da diferença de pressões entre a entrada e a saída da válvula. Uma das formas de garantir a regulação de caudal de uma válvula passa por manter a diferença de pressões entre a entrada e a saída da válvula constante. Deste modo, o caudal da válvula passa a depender apenas da variação da área de abertura do orifício.

Este primeiro conceito explora o princípio de funcionamento descrito no parágrafo anterior. A diferença de pressões é mantida constante pela adição de um êmbolo compensador que responde às variações de pressão, fazendo variar a área do orifício de saída de forma a manter o diferencial de pressões constante no orifício regulador. Este conceito é apresentado de forma simplificada na Figura 4.1. O caudal é regulado no orifício que se encontra entre a zona P_1 e P_2 , pelo êmbolo E_1 . A atuação deste êmbolo pode ser feita por um solenóide ou por um motor de passos. O êmbolo E_2 é responsável por garantir que a diferença de pressões entre P_1 e P_2 é constante.

Este conceito funciona da seguinte forma: o orifício é regulado para um dado caudal pela atuação e movimento do êmbolo E_1 . Numa situação em que a pressão em P_2 diminua, o êmbolo E_2 deslocar-se-á para a direita diminuindo a área do orifício de saída e conseqüentemente o caudal de saída. Esta diminuição do caudal faz com que a pressão P_2 torne a aumentar, fazendo com que o êmbolo E_2 se desloque no sentido de aumentar o caudal novamente. Deste modo, é possível atenuar as variações da pressão P_2 e, assim,

garantir que o caudal regulado pela válvula é constante ao longo do tempo. Para que o sistema tivesse alguma rigidez foi colocada uma mola no lado esquerdo do êmbolo E_2 .

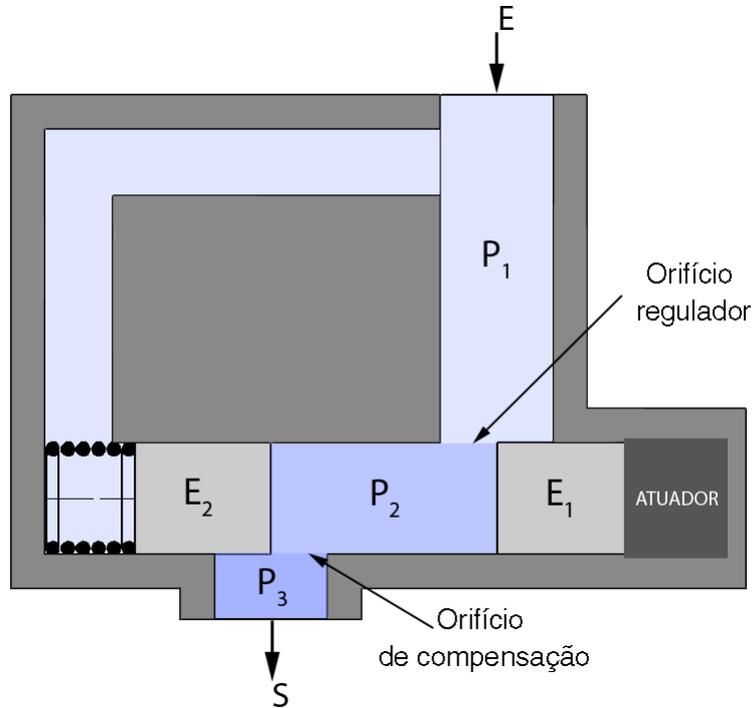


Figura 4.1: Conceito com compensação de pressão mecânica

Modelação e simulação

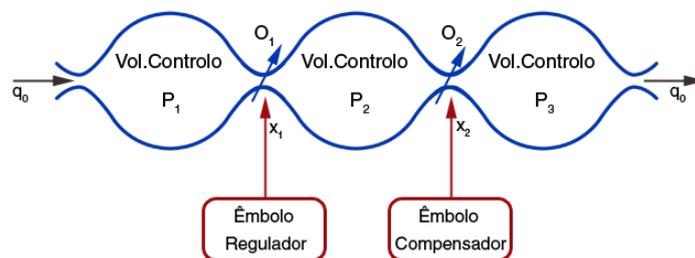


Figura 4.2: Diagrama do modelo

Para averiguar a viabilidade deste conceito criou-se um modelo simplificado que permitiu realizar algumas simulações. Neste modelo consideraram-se três volumes de controlo que correspondem às zonas P_1 , P_2 e P_3 da Figura 4.1. Assumiu-se por isso que a

pressão de fluido que atua no lado esquerdo do êmbolo E_2 é igual à pressão de entrada, P_1 . Esta hipótese é uma aproximação satisfatória daquele que é o comportamento físico do sistema, embora o mais correto fosse ter considerado um volume de controlo adicional. Em cada volume de controlo utilizou-se a equação de orifício em regime turbulento para determinar o caudal de entrada desse mesmo volume de controlo. Os orifícios utilizados neste modelo são todos circulares.

Para cada um dos êmbolos foi realizado o diagrama de corpo livre que permitiu obter as equações de movimento dos êmbolos. No êmbolo compensador da pressão à saída, P_2 , foi adicionada uma mola que aumenta a rigidez do sistema. A atuação do êmbolo E_1 pode ser feita através de um solenóide ou de um motor de passos, contudo a componente de atuação não foi tida em conta para a criação deste modelo. Com base neste modelo foram realizadas algumas simulações que permitiram estudar o comportamento desta válvula. Para simular uma oscilação da pressão à saída da válvula fez-se variar a área do orifício de saída da válvula. Deste modo, foi possível averiguar de que forma o êmbolo E_2 tenta compensar a variação de pressão imposta à saída da válvula. A Figura 4.3 apresenta os gráficos de pressão e de caudal ao longo do tempo obtidos numa simulação do modelo de uma válvula estranguladora, sem compensação da pressão. A Figura 4.4 apresenta os gráficos de pressão e caudal ao longo do tempo obtidos na simulação do modelo criado para este conceito.

Os resultados das simulações realizadas mostram que face à oscilação de pressão à saída da válvula, o compensador mecânico se desloca no sentido de a atenuar. De facto, para a mesma abertura do orifício regulador é possível observar que numa válvula estranguladora existem variações de caudal na ordem dos 4 litros por minuto, ao passo que no conceito proposto essas variações são da ordem dos 0,5 litros por minuto. Quanto maior for a oscilação de pressão à saída da válvula, maior é a oscilação do caudal regulado. Contudo, esta é sempre menor com a presença do compensador mecânico e este pode ser dimensionado para responder a uma gama de variações. Estes resultados permitem concluir que o conceito proposto é uma solução promissora, pelo que na secção seguinte é apresentada uma proposta de implementação de um protótipo.

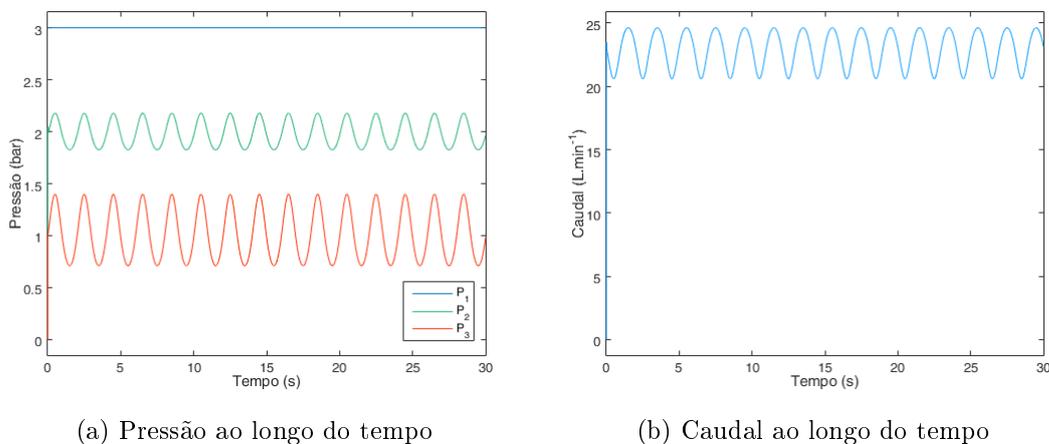


Figura 4.3: Válvula sem o compensador mecânico para uma posição de êmbolo $x=1.5\text{mm}$

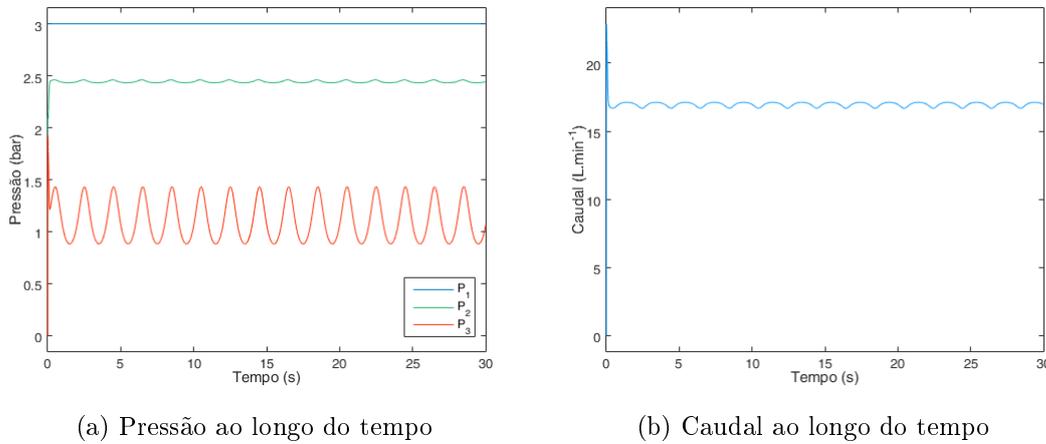
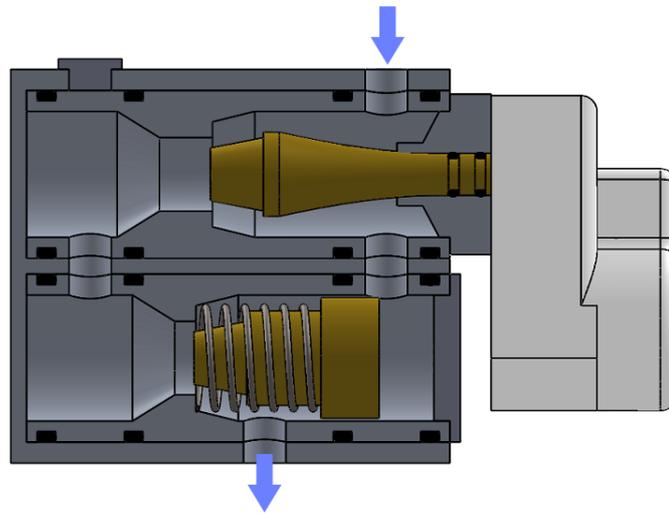


Figura 4.4: Válvula com o compensador mecânico para uma posição de êmbolo $x=1.5\text{mm}$

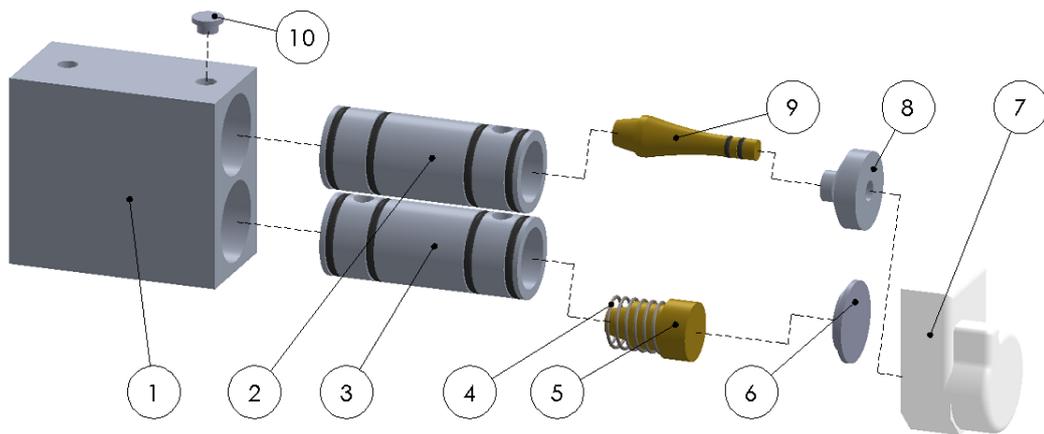
Proposta de protótipo

A Figura 4.1 apresenta de forma simplificada o modo como poderia ser implementado o conceito proposto. Todavia, para que seja possível obter um protótipo funcional, devem ser tidas em conta as limitações da tecnologia de fabrico utilizada na criação do protótipo. Para o fabrico deste protótipo pretende-se utilizar como principal tecnologia de fabrico, a maquinagem. Os materiais propostos são o alumínio no corpo da válvula e nas camisas e o latão nos êmbolos.

A Figura 4.5b mostra uma vista explodida da proposta de protótipo desenvolvida. O corpo da válvula (**1**) é o componente principal, responsável por alojar todos os restantes. Este corpo, contém vários furos para que a água possa passar entre os vários volumes da válvula. Os volumes de controlo e orifícios poderiam ser maquinados no corpo da válvula, porém isso é mais difícil e dispendioso do ponto de vista de fabrico, pelo que se optou por utilizar camisas que se alojam no corpo da válvula. Assim, tem-se a camisa superior (**2**) e a camisa inferior (**3**). A primeira contém o orifício regulador de caudal e a segunda o orifício compensador. Neste protótipo os orifícios reguladores são de formato anelar, visto que este permite estabelecer uma relação linear entre a área do orifício e o curso do êmbolo. Ambas as camisas podem ser maquinadas num torno, sendo que o perfil destas está pensado para cumprir com os requisitos da válvula, sem esquecer as limitações da tecnologia de fabrico. Para que a válvula seja estanque é necessário colocar elementos de vedação, que previnem o aparecimento de caudais de fuga. Estes elementos de vedação podem ser juntas tóricas que são colocadas axialmente nas camisas, entre os furos de passagem. O êmbolo regulador de caudal (**9**) tem um perfil que garante a variação linear descrita anteriormente. Para além disso, este êmbolo é atuado, pelo que necessita ter um estriado que lhe permita acoplar-se ao motor de passos (**7**). O êmbolo compensador da pressão (**5**) é semelhante ao êmbolo regulador do caudal, com a exceção de que, tem uma mola (**4**) que atua sobre ele. Para fechar a válvula existem duas tampas roscadas, a tampa superior (**8**) e a tampa inferior (**6**). Cada uma é enroscada na respetiva camisa, sendo que a tampa superior tem um furo para que a haste do êmbolo regulador possa passar e assim acoplar-se ao motor de passos.



(a) Vista de frente em corte



(b) Vista explodida

Figura 4.5: Proposta de protótipo para o conceito 1

4.2 Conceito 2 - Controle em malha fechada com sensorização

Descrição do sistema

Uma maneira alternativa de garantir a regulação do caudal é pelo estabelecimento de um controle em malha fechada, com um sinal de referência. O sinal mais óbvio seria o caudal regulado pela válvula, todavia, seria necessário utilizar um caudalímetro, que apresenta algumas desvantagens já explicadas na Secção 2.3. No entanto, existe uma abordagem diferente em que o caudal de saída da válvula é determinado indiretamente, pela medição da diferença de pressões no orifício regulador. Isto requer que se utilizem dois sensores de pressão, um a montante e outro a jusante do orifício. Existem atualmente sensores de pressão de tamanho reduzido e com tempos de resposta baixos, contudo, estes sensores são bastante sensíveis e o seu custo é elevado, o que os faz uma solução menos desejável.

O segundo conceito que é proposto procura estabelecer um controle em malha fechada do caudal de saída da válvula com base na medição indireta da diferença de pressões no orifício da válvula. A Figura 4.6 apresenta o conceito proposto de uma forma simplificada. O caudal é regulado pelo êmbolo E_1 que pode ser atuado por um solenóide ou por um motor de passos. Para além disto, existe um segundo êmbolo, E_2 , que é atuado pelo diferencial de pressões na válvula. Assim, quando ΔP decresce, o êmbolo E_2 desloca-se no sentido ascendente da figura. Se, pelo contrário, ΔP aumentar então o êmbolo E_2 desloca-se no sentido descendente. Deste modo é possível estabelecer uma relação entre a posição linear do êmbolo E_2 e o diferencial de pressões no orifício da válvula. Utilizando um sensor de posição linear, como um LVDT, é possível determinar a posição do êmbolo E_2 e, conseqüentemente, a diferença de pressões no orifício. A principal vantagem dos sensores de posição em relação aos sensores de pressão é que apenas é necessário utilizar um sensor de posição para determinar o diferencial de pressões, ao passo que utilizando sensores de pressão são necessários dois. Para além disto, os sensores LVDT são robustos e têm um custo relativamente baixo. Como foi explicado anteriormente, este conceito utiliza a relação existente entre o deslocamento do êmbolo E_2 e o ΔP no orifício da válvula para regular o caudal de saída. Contudo, isto requer que se faça uma calibração à válvula de modo a determinar a curva que descreve a relação entre o deslocamento do êmbolo e o diferencial de pressões. Esta calibração deve ser realizada de uma forma rigorosa para uma ampla gama de valores da diferença de pressão.

Este conceito funciona da seguinte de forma: A diferença de pressões $\Delta P = P_1 - P_2$ faz com que o êmbolo E_2 se desloque para uma dada posição. Através de um sensor de posição LVDT, é determinada a posição do êmbolo E_2 . Com base na calibração realizada à válvula é possível determinar o valor do diferencial de pressões a partir da posição do êmbolo E_2 . Com isto, e sabendo qual o caudal que a válvula deseja regular, o controlador da válvula calcula a área de orifício necessária e, conseqüentemente, a posição do êmbolo regulador, E_1 . Deste modo é possível regular o caudal de saída da válvula de forma a que este se mantenha constante, mesmo quando existem variações da pressão à saída da válvula.

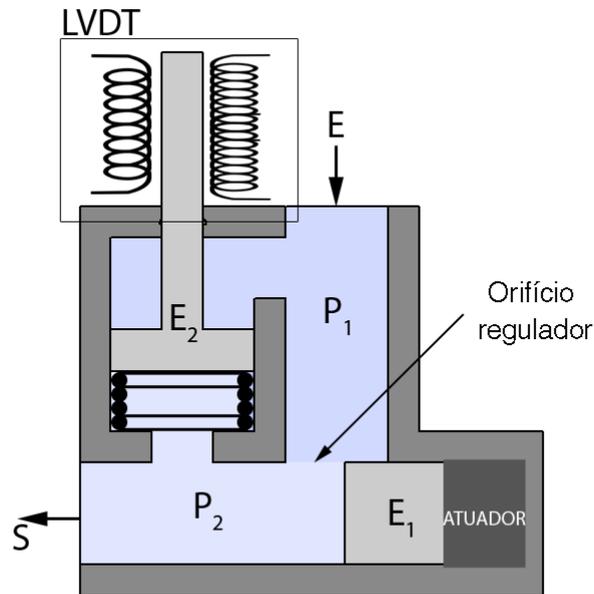


Figura 4.6: Conceito com controlo em malha fechada

Modelação e simulação

O modelo físico do sistema proposto é constituído por dois volumes de controlo, interligados pelo orifício regulador. Eventualmente poderiam considerar-se volumes de controlo separados para as câmaras de pressão do êmbolo E_2 , porém, a pressão nestas câmaras é aproximadamente a mesma que nos volumes de controlo principais, pelo que se consideraram apenas dois volumes de controlo. Todos os orifícios foram modelados com o formato circular. O êmbolo E_2 foi modelado de um modo semelhante ao descrito na Secção 3.2.3, sendo que se consideraram todas as forças que atuam sobre este êmbolo. Estas forças são a força exercida pela pressão P_1 , a força exercida pela pressão P_2 e a força exercida pela mola. Para além destas, também se teve em conta a força de atrito e a inércia devida à massa do êmbolo E_2 . Com a modelação do sistema fluídico e do sistema mecânico, já foi possível analisar a relação entre o diferencial de pressões $P_1 - P_2$ e o deslocamento do êmbolo E_2 .

O próximo passo consistiu em implementar o modelo de um sensor LVDT e transformar o deslocamento do êmbolo E_2 num sinal elétrico que pudesse ser processado pelo controlador da válvula. O modelo do LVDT foi implementado tal como foi descrito na Secção 3.2.2. Os valores das constantes do modelo foram adaptados de modo a serem da mesma ordem de grandeza que o resto do modelo. O enrolamento do primário foi excitado com uma onda de formato sinusoidal, sendo o sinal à saída do enrolamento secundário também uma onda sinusoidal, cuja amplitude varia de acordo com a posição do êmbolo E_2 . Devido à natureza deste sinal tornou-se difícil estabelecer uma relação entre o mesmo e a posição do êmbolo, pelo que foi necessário aplicar um pré processa-

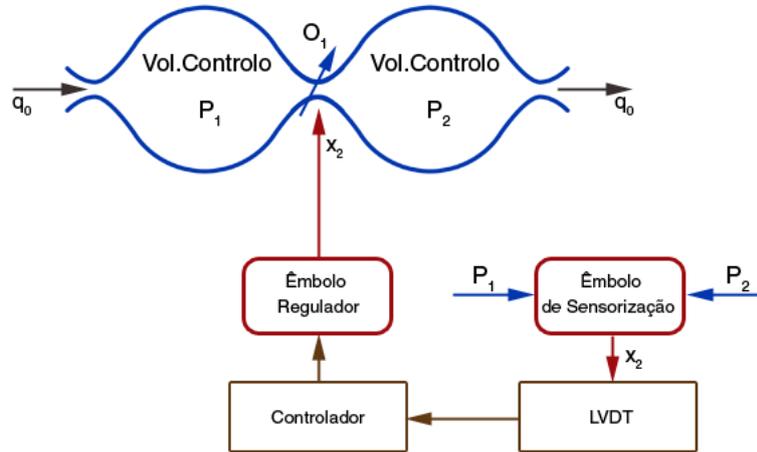
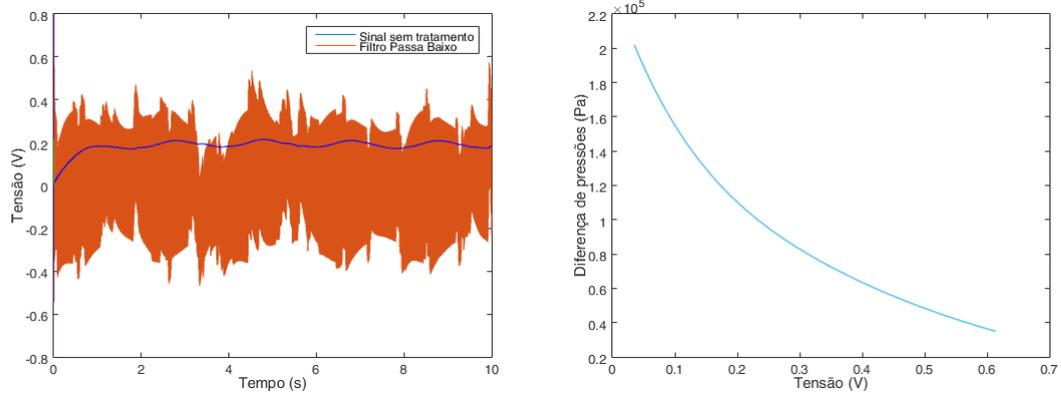


Figura 4.7: Diagrama do modelo

mento a este sinal. Este pré-processamento consistiu num filtro passa baixo, filtro este que atenua os sinais com uma frequência maior do que a frequência de corte do filtro. Para se compreender melhor a importância deste filtro passa baixo foi realizada uma simulação onde se impôs uma variação de pressão à saída da válvula. Deste modo, a posição do êmbolo E_2 oscila em torno de uma posição, bem como o sinal do LVDT. A Figura 4.8a mostra o sinal do LVDT sem tratamento e também o sinal após a aplicação do filtro passa baixo. Observa-se de imediato que o sinal sem tratamento apresenta um comportamento bastante oscilatório. De facto, este sinal oscila com a mesma frequência do sinal com que o primário foi excitado, e que neste caso foi de 100 Hz. O sinal que se obtém após o tratamento é um sinal menos oscilatório e que, por isso, permite estabelecer mais facilmente uma relação com outras variáveis. Todavia, também é possível notar na figura que o sinal tratado apresenta um atraso até atingir um valor sobre o qual oscila. O que acontece é que o filtro passa baixo introduz um atraso no sinal, atraso este que é tanto maior quanto mais baixa for a frequência de corte do filtro. Posto isto, fez-se uma calibração à válvula que permitiu determinar a curva da relação entre o diferencial de pressão no orifício e o sinal elétrico do LVDT. Esta curva encontra-se na Figura 4.8b.

À semelhança das simulações realizadas no modelo do conceito anterior, também neste foi imposta uma variação de pressão à saída da válvula. Com isto esperava-se que o modelo da válvula fosse capaz de manter o caudal constante ao longo do tempo, o que não se verificou. De facto, verificou-se que existia uma diferença entre a diferença de pressões real e a diferença de pressões determinada de forma indireta, pelo LVDT. Esta diferença leva a que o sistema não consiga responder de forma adequada, e consequentemente não consiga garantir a regulação constante do caudal. Uma das razões que pode causar esta diferença é o atraso que o condicionamento do sinal LVDT introduz no sistema. Este atraso faz com que o controlador esteja a dar uma posição ao êmbolo regulador, com base em valores adquiridos para um diferencial de pressão diferente, o que leva naturalmente

a que existam oscilações.



(a) Sinal do LVDT ao longo do tempo

(b) Diferencial de pressão vs sinal do LVDT

Figura 4.8: Dados das simulações realizadas

4.3 Conceito 3 - Servopilotagem com compensação mecânica de pressão

Descrição do sistema

Esta proposta procura explorar o princípio de funcionamento das servo válvulas hidráulicas de alta performance. Nestas, a utilização de estágios de amplificação permite efetuar a variação do caudal com atuadores de potência bastante reduzida. A solução proposta encontra-se esquematizada na Figura 4.9. Neste caso, propõe-se a uma válvula de dois estágios, em que a variação do caudal é feita por um êmbolo regulador, E_2 . Ao contrário do que foi proposto nos conceitos anteriores, neste, o êmbolo regulador não é atuado eletricamente, mas sim hidraulicamente pela água. Deste modo, é a diferença de pressão entre P_A e P_B que faz com que o êmbolo E_2 se desloque. Como pode ser observado na Figura 4.9, se P_A for maior do que P_B , então o êmbolo E_2 desloca-se para a direita, aumentando o orifício regulador e o caudal de saída. Se, pelo contrário, P_B for maior do que P_A , então o êmbolo E_2 desloca-se para a esquerda, fechando o orifício regulador e diminuindo o caudal regulado. Contudo, para que este princípio funcione é necessário considerar que existem caudais de fuga, q_f entre os volumes A e B e o volume 1. Estes caudais de fugas evitam que as pressões P_A e P_B se equilibrem e o sistema fique estático. Para além disto, também foi necessário considerar a existência de um elemento de ligação, flexível, entre o êmbolo E_1 e o êmbolo E_2 . De uma forma simplificada, pode-se considerar este elemento como uma mola, que devolve uma resposta ao êmbolo de pilotagem com base no movimento do êmbolo regulador. Esta resposta é importante para garantir também que o sistema não fica estático.

A diferença entre as pressões da água que atuam de cada um dos lados do êmbolo E_2 é conseguida pela variação da quantidade de água que entra para cada um destes pontos, A e B. Assim, se se pretender aumentar a pressão P_A e diminuir a pressão P_B é necessário aumentar o caudal de entrada para a câmara A, e diminuir o da câmara B. Estes caudais são bastante inferiores ao caudal de água que a válvula regula, pelo que são considerados como caudais de pilotagem. A variação destes caudais é conseguida através do êmbolo E_1 , que é atuado eletricamente por um solenóide. O êmbolo E_1 tem dimensões inferiores ao êmbolo E_2 , necessitando por isso de um atuador com uma potência inferior. Deste modo é possível reduzir o consumo elétrico da válvula, que também é um dos principais objetivos desta dissertação. O outro principal objetivo desta dissertação é garantir que a válvula que está a ser desenvolvida regula o caudal de água à sua saída, independentemente das variações de pressão que possam ocorrer. No conceito que é proposto, essa regulação é conseguida com a utilização de um compensador mecânico, já introduzido no conceito 1. Tal como já foi explicado anteriormente, este compensador desloca-se de forma a responder às variações de pressão que ocorram à saída da válvula.

O conceito que é proposto funciona da seguinte forma: O êmbolo E_1 , atuado eletricamente, desloca-se para uma dada posição, fazendo com que haja uma diferença entre os caudais de pilotagem nas câmaras A e B. Naturalmente, isto leva a que haja uma diferença de pressões entre P_A e P_B , diferença esta que faz com que o êmbolo E_2 se desloque e assim regule o caudal de saída da válvula. Para além disto, se a pressão à saída da válvula, P_3 , diminuir então o êmbolo E_3 desloca-se no sentido de diminuir o orifício de saída da válvula. Se, ao invés de diminuir, a pressão P_3 aumentar, então o êmbolo compensador desloca-se no sentido de aumentar o orifício à saída da válvula.

Com isto é possível manter o caudal de saída da válvula regulado de forma constante, mesmo quando existem variações na pressão à saída da válvula.

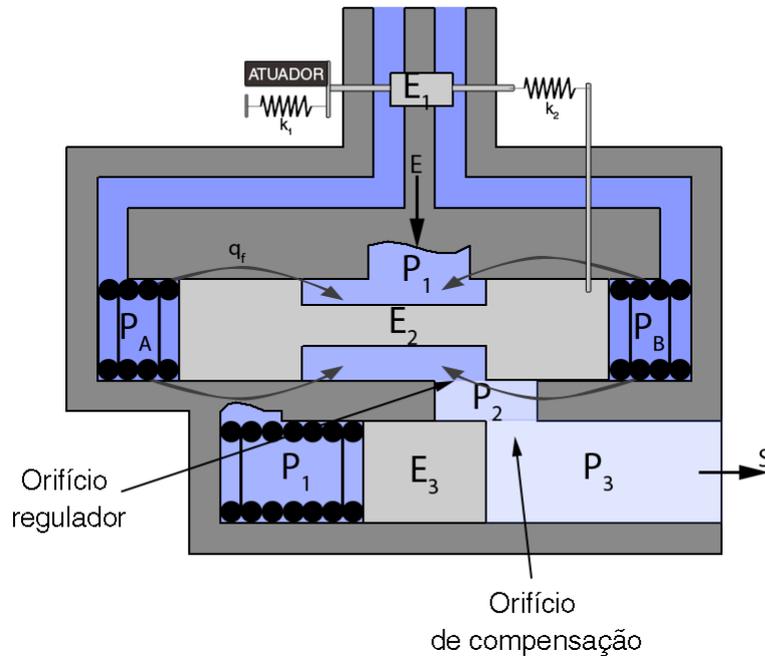


Figura 4.9: Conceito com controlo em malha fechada

Modelação e simulação

No modelo construído para este conceito consideraram-se cinco volumes de controlo. Destes, três representam os volumes de passagem da água desde que entra na válvula até que sai (P_1, P_2 e P_3). Os restantes dois representam as câmaras de pilotagem, A e B, cuja pressão da água é responsável pelo movimento do êmbolo regulador do caudal. O caudal de pilotagem de cada uma destas câmaras foi modelado com a equação de orifício para o regime turbulento, tendo-se considerado um orifício para cada um destes volumes de controlo. Consideraram-se todos os orifícios modelados, de geometria circular. A variação da área destes dois orifícios é realizada em simultâneo pelo êmbolo de pilotagem. Deste modo, para uma dada variação do curso deste êmbolo cada um destes orifícios sofrerá a mesma variação de área, sendo que num existe um aumento e no outro uma diminuição da área. Tal como foi explicado anteriormente, para que este conceito funcione é necessário considerar a existência de um caudal de fuga entre o volume de controlo A e o volume de controlo 1 e também entre o volume de controlo B e o volume de controlo 1. Isto leva a que no volume de controlo 1 existam três caudais de entrada e apenas um de saída. Estes caudais de fuga foram modelados como caudais em regime laminar, sendo que para tal se considerou uma condutância de fugas, cujo valor é tipicamente baixo.

Para modelar o comportamento mecânico do sistema realizaram-se diagramas de corpo livre para cada um dos êmbolos. Estes diagramas são apresentados na Figura 4.11.

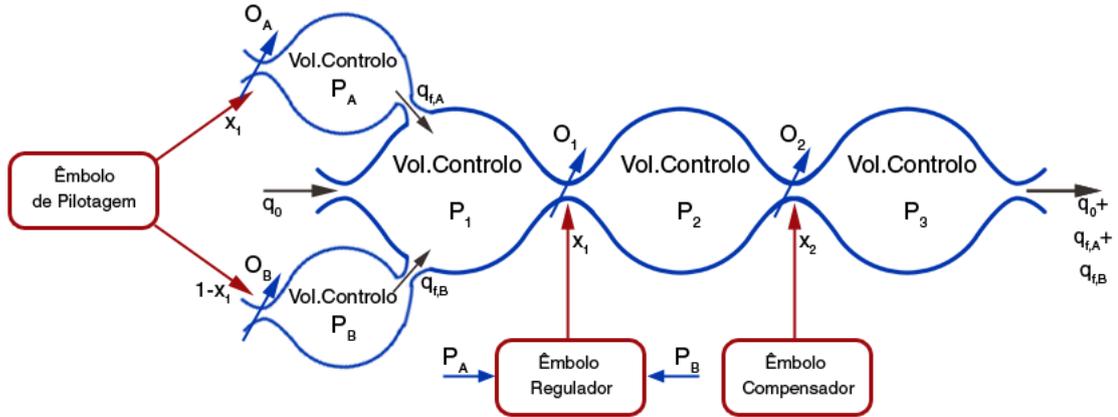


Figura 4.10: Diagrama do modelo

Relativamente ao êmbolo de pilotagem, é necessário ter em conta que sobre este exercem-se forças que resultam do seu movimento e forças que resultam do movimento do êmbolo de variação de caudal. As últimas derivam do facto do êmbolo de pilotagem estar ligado ao êmbolo de variação do caudal através de uma mola. A metodologia utilizada para determinar estas forças foi a indicada na Secção 3.2.3. As principais forças que atuam sobre o êmbolo regulador de caudal são as pressões de pilotagem que exercem uma força proporcional à área do êmbolo. Para além destas também se consideraram as forças de rigidez de duas molas, e também uma componente de atrito.

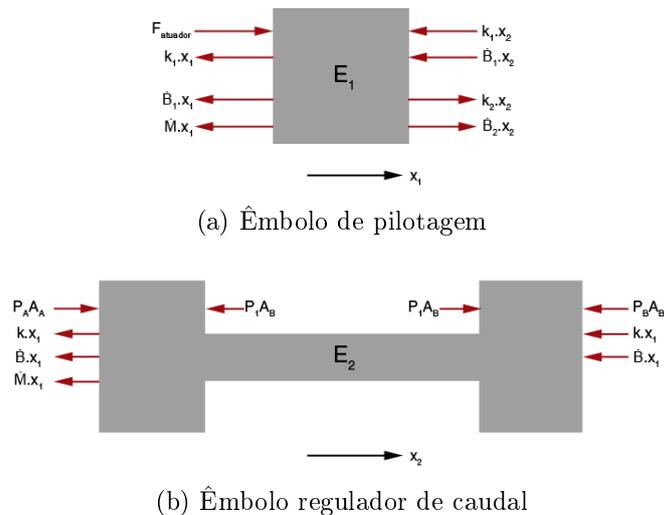
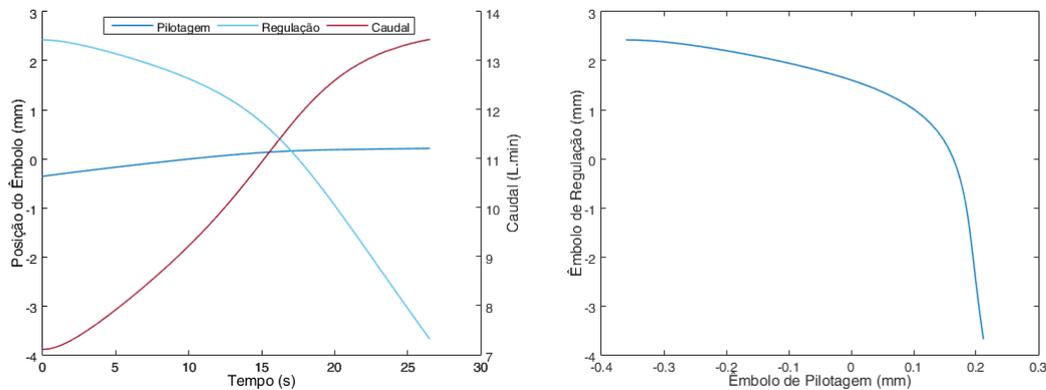


Figura 4.11: Diagrama de corpo livre

Para avaliar o potencial da solução proposta realizou-se um conjunto de simulações. Numa das simulações realizadas ajustou-se o modelo para que o caudal de saída da válvula variasse desde os $7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ até aos $14 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. A Figura 4.12a mostra a variação do caudal ao longo do tempo, bem como dos cursos dos êmbolos de pilotagem e de variação. Nesta, pode-se observar claramente que o curso do êmbolo de pilotagem necessário para garantir a variação de caudal indicada é de 0.6 mm . Esta pequena atuação leva à existência de um caudal de pilotagem, que por sua vez amplifica a potência de atuação e fez deslocar o êmbolo regulador 6 mm . Com esta variação de curso no êmbolo regulador garante-se uma variação do caudal à saída da válvula de $7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Estes valores são meramente indicativos, todavia, permitem compreender que, de facto, a utilização de um caudal de pilotagem permite reduzir a atuação necessária realizar na válvula. A Figura 4.12b mostra a relação entre o curso do êmbolo do orifício regulador do caudal em função do curso do êmbolo de pilotagem atuado. Esta relação torna ainda mais evidente a amplificação de potência associada a este conceito.



(a) Variação dos cursos dos êmbolos e do caudal de saída da válvula (b) Relação entre o curso do êmbolo de pilotagem e de variação

Figura 4.12: Resultados das simulações realizadas

Relativamente à regulação do caudal, e como já foi explicado, esta proposta utiliza o compensador mecânico já introduzido no primeiro conceito. O comportamento é semelhante ao verificado no primeiro conceito. Mantendo o êmbolo de pilotagem numa posição fixa, e conseqüentemente o êmbolo regulador também, realizaram-se duas simulações. A primeira com o compensador mecânico e a segunda sem o compensador mecânico, sendo que em ambas as simulações foi imposta uma oscilação da pressão à saída da válvula. Os resultados das simulações são apresentados na Figura 4.13, sendo que claramente se nota que existe uma atenuação da oscilação do caudal. Esta atenuação pode ainda ser melhorada pelo ajuste dos parâmetros da válvula.

Com base nos resultados obtidos nas simulações realizadas é possível concluir que esta solução proposta consegue responder aos requisitos da válvula que se pretende desenvolver. Este conceito consegue garantir de forma satisfatória a regulação do caudal, mesmo quando existem oscilações na pressão. E consegue também reduzir a energia necessária para atuar a válvula. Este último ponto é interessante não só pela poupança energética, mas também pela possibilidade de utilizar um atuador de dimensões inferiores ao que seria habitual encontrar numa válvula deste género.

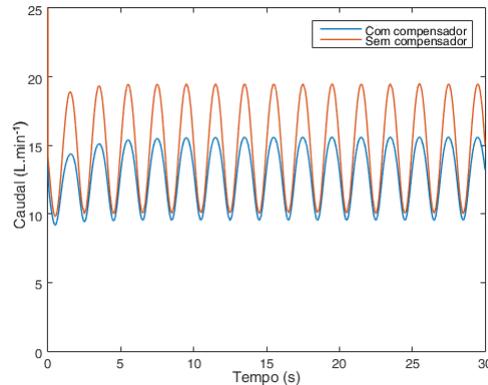


Figura 4.13: Êmbolo de pilotagem posicionado em $x=-0.3$ mm

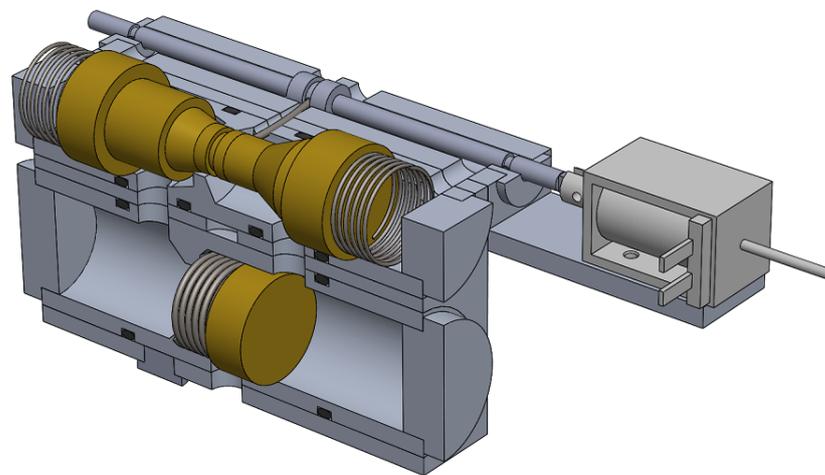
Proposta de protótipo

Este terceiro conceito que é proposto é construtivamente mais complexo do que os restantes. No entanto, foi desenvolvida uma proposta de protótipo que tenta ser relativamente simples, em termos de construção e de funcionalidade. O protótipo aqui proposto utiliza como principal tecnologia de fabrico a maquinagem. Os materiais sugeridos são o alumínio no corpo e camisas e o latão nos êmbolos.

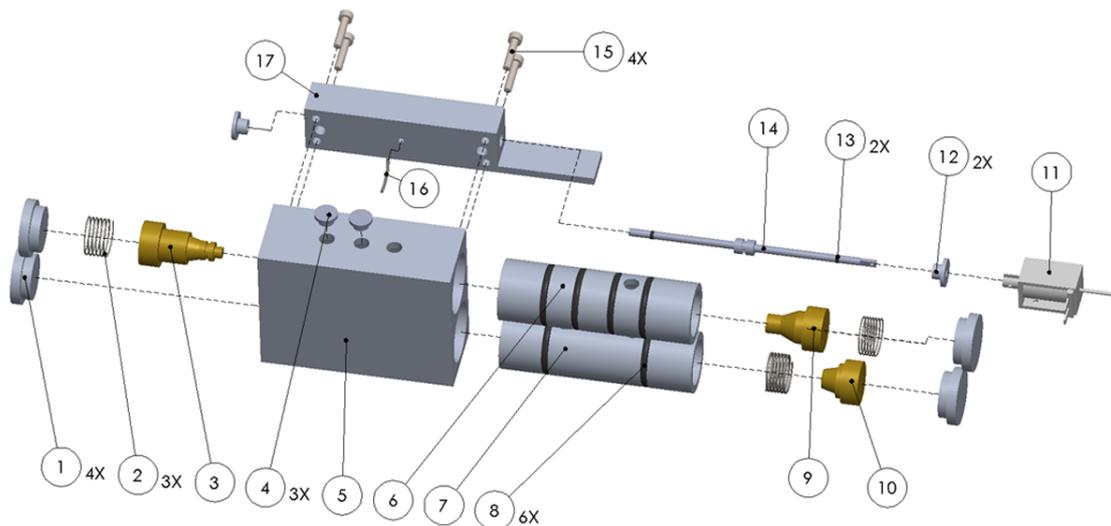
A Figura 4.14a mostra uma vista isométrica com um corte num plano de topo sobre o centro do êmbolo principal, e um corte num plano de frente sobre o centro do corpo da válvula. Estes cortes são apresentados em maior detalhe nas Figuras 4.15a e 4.15b. Nestas pode-se observar de forma clara o protótipo e como este replica o princípio de funcionamento do conceito descrito anteriormente. A Figura 4.14b mostra uma vista explodida onde se podem visualizar todos os componentes que constituem o protótipo. O principal componente é o corpo da válvula (**5**), que por sua vez aloja duas camisas, a camisa superior (**6**) e a inferior (**7**). Para garantir que não existem caudais de fuga, estas camisas são maquinadas de forma a alojarem juntas tóricas que fazem a vedação da válvula. A regulação do caudal é feita na camisa superior, onde se desloca o êmbolo regulador. Devido à sua geometria, e para que fosse possível montar o conjunto, o êmbolo regulador dividiu-se em duas peças, a parte esquerda (**3**) e a parte direita (**9**). Estas duas partes montam-se através de uma ligação roscada. A compensação da pressão é feita na camisa inferior, pelo êmbolo compensador (**10**). Para fechar os volumes de controlo da válvula utilizam-se tampas (**1**), que se enroscam nas extremidades de cada camisa. À semelhança do primeiro conceito, também neste o corpo da válvula tem furos que permitem a circulação da água no interior da válvula. Devido às limitações de fabrico, para se realizarem furos no interior da válvula é necessário iniciar a furação pelo exterior, o que em algumas situações cria furos desnecessários. Estes podem ser selados com tampões (**4**), por intermédio de uma ligação roscada.

Para além do corpo da válvula, este protótipo utiliza mais um corpo, que aloja os componentes responsáveis pelos caudais de pilotagem. Este é o corpo auxiliar (**17**). Este fixa-se ao corpo da válvula através de quatro parafusos do tipo CHC (**15**). O corpo auxiliar tem um furo principal, no qual se desloca o êmbolo de pilotagem (**14**). Este êmbolo é atuado por um solenóide (**11**), pelo que as suas hastes tem que sair do corpo

da válvula. Isto é conseguido através de uma tampa roscada (12), que tem um furo por onde passa a haste do êmbolo para se ligar ao solenóide. Naturalmente tem que existir vedação nesta parte, pelo que o próprio êmbolo é maquinado de forma a alojar duas juntas tóricas. Como foi explicado anteriormente, existe a necessidade de haver um elemento flexível que interliga o êmbolo de pilotagem e o êmbolo regulador. Esse elemento é o componente (16), e é feito num material metálico mas com uma secção transversal pequena de forma a ser flexível.

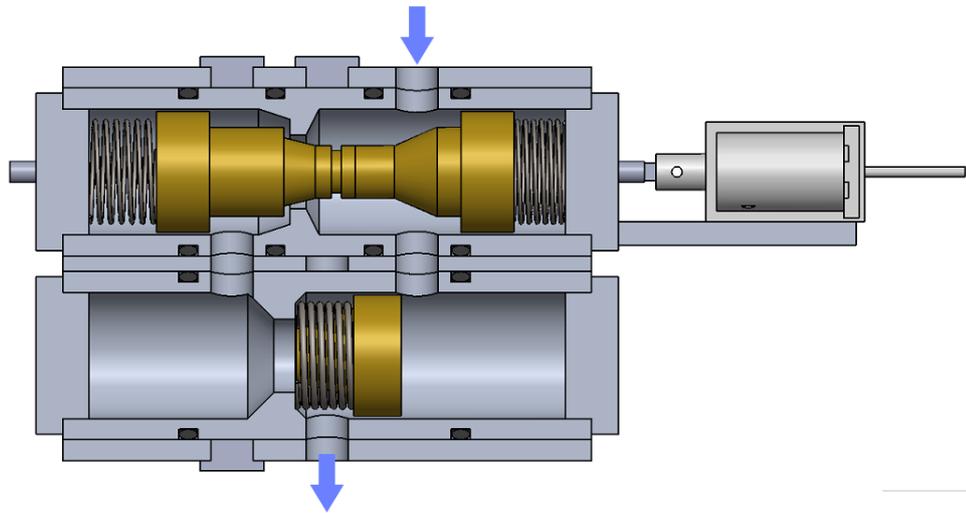


(a) Vista isométrica em corte

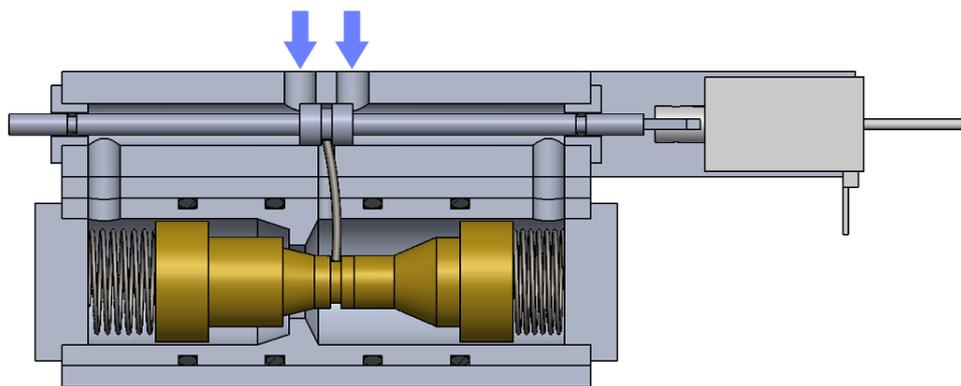


(b) Vista explodida

Figura 4.14: Proposta de protótipo para o conceito 3



(a) Corte na vista de frente



(b) Corte na vista de topo

Figura 4.15: Proposta de protótipo para o conceito 3

4.4 Comparação e análise das soluções propostas

O pré estudo realizado teve como principal objetivo desenvolver soluções possíveis para a válvula reguladora. As propostas desenvolvidas foram estudadas do ponto de vista do seu comportamento durante o funcionamento, bem como do ponto de vista de implementação de um protótipo funcional. Neste sentido são propostas três soluções diferentes que tentam responder aos requisitos que a válvula reguladora desenvolvida deve ter. De uma forma resumida é feita uma comparação entre as vantagens e desvantagens de cada um destes conceitos, tendo em conta as conclusões que foram retiradas com o pré estudo realizado.

Conceito 1

1. Regula o caudal através da compensação da pressão à saída da válvula. Deste modo o diferencial de pressões no orifício regulador mantém-se constante ao longo do tempo, e o caudal à saída da válvula passa a ser proporcional apenas à variação da área do orifício regulador.
2. Pode ser atuado por um motor de passos ou por um solenóide. Todavia, é preferencial utilizar o primeiro, visto que este não apresenta consumo elétrico quando está fixo numa posição.
3. Não precisa de sensores e instrumentação adicional, pelo que o controlador a ser utilizado é relativamente simples.
4. A parametrização deste conceito deve ser feita de forma cuidada, para que se possa garantir que o protótipo desenvolvido apresenta um comportamento linear ao longo de toda a gama de funcionamento de caudal regulado.
5. O fabrico do protótipo é relativamente simples e utiliza ferramentas e processos tecnológicos convencionais e fáceis de encontrar.

Conceito 2

1. Regula o caudal através da medição da diferença de pressões no orifício de regulação.
2. Pode ser atuado por um motor de passo ou por um solenóide. Todavia, é preferencial utilizar o primeiro, visto que este não apresenta consumo elétrico quando está fixo numa posição.
3. Utiliza um ou mais sensores (de posição ou de pressão) para determinar a diferença de pressões no orifício. Estes sensores implicam utilizar também toda a instrumentação necessária para realizar a aquisição e o condicionamento do sinal.
4. A resposta dinâmica estará sempre limitada pelo tempo de aquisição e condicionamento do sinal pelo sensor e controlador que forem implementados. Este ponto revelou-se muito importante para garantir a regulação do caudal de saída da válvula.

Conceito 3

1. Regula o caudal através da compensação da pressão à saída da válvula. Deste modo o diferencial de pressões mantém-se constante ao longo do tempo e o caudal à saída da válvula passa a ser proporcional apenas à variação da área do orifício regulador.

2. A atuação é feita em dois estágios. O primeiro utiliza um solenóide de pequenas dimensões que atua sobre o êmbolo de pilotagem, que por sua vez direciona um caudal para uma de duas câmaras. A pressão da água nestas câmaras é responsável pelo movimento de um êmbolo maior, que faz variar o caudal de água da válvula. Isto significa que existe uma amplificação da potência atuadora, pelo que o consumo elétrico da válvula pode ser substancialmente reduzido.
3. Comparativamente à proposta de protótipo do primeiro conceito, o protótipo para este conceito é mais complexo construtivamente. Este utiliza um maior número de componentes, sendo que o protótipo é mais difícil de montar bem como o seu custo de fabrico será certamente superior.

Parte III

Desenvolvimento do protótipo de válvula

Capítulo 5

Modelação e simulação do protótipo

Tendo em vista as vantagens e desvantagens de cada uma das soluções apresentadas no pré estudo, decidiu-se desenvolver o conceito 3. Esta opção prende-se essencialmente, com o facto deste conceito ser promissor ao nível do consumo energético da válvula. Concetualmente demonstrou-se que é possível obter uma amplificação da potência de atuação, recorrendo a um caudal de pilotagem. No entanto, importa compreender se este conceito é capaz de cumprir com os requisitos inerentes à aplicação onde a válvula vai estar inserida. A válvula que se pretende desenvolver deve ser capaz de regular o caudal de água necessário ao funcionamento de um equipamento de aquecimento de águas domésticas. Tipicamente, este tipo de equipamentos regula caudais até cerca de 35 L.min⁻¹ e funciona numa certa gama de pressões. É importante que a válvula tenha um comportamento estável, independentemente da pressão de entrada, visto que esta não é igual em todos os países e pode até ser diferente dentro do mesmo país.

Neste sentido a Bosch-TT ajudou a definir os requisitos que a válvula deveria cumprir, para que pudesse ser utilizada num dos equipamentos de aquecimento de águas domésticas desenvolvidos pela Bosch-TT. A Tabela 5.1 apresenta de uma forma sucinta as especificações de projeto que a válvula a ser desenvolvida deve cumprir.

Tabela 5.1: Requisitos de projeto

Gama de pressões de funcionamento	0.5 - 10 bar
Caudal nominal (3 bar)	0.1 - 35 Lmin

5.1 Desenvolvimento concetual

Nesta fase do projeto, começou-se por desenvolver o modelo do conceito 3. O primeiro passo foi melhorar e aproximar o modelo criado anteriormente ao protótipo que se pretendia desenvolver. A realização deste exercício consistiu em mudar o formato dos orifícios utilizados e em adaptar os volumes de controlo utilizados, bem como os seus caudais de fugas. Após este processo, iniciou-se a otimização e ajuste de todos os parâmetros da válvula, tais como as áreas dos orifícios, as constantes das molas e as áreas dos órgãos móveis. Todavia, não foi possível chegar a um conjunto de parâmetros, que permitissem que a válvula cumprisse minimamente com as especificações indicadas na tabela 5.1. A melhor solução a que se conseguiu chegar compreendia um caudal de fugas da ordem dos

$0.7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e não apresentava o mesmo comportamento em toda a gama de pressões de funcionamento desejadas. Para além disto, a implementação em protótipo necessitava de um certo número de peças, sendo por isso complexa, como ficou evidenciado na Figura 4.14b. Posto isto, tornou-se evidente que seria necessário repensar o conceito de válvula pilotada e de que forma este poderia ser trabalhado e melhorado. É com base nesta premissa que surge o conceito 4, que é uma versão refinada do conceito anterior e que é apresentado na Figura 5.1.

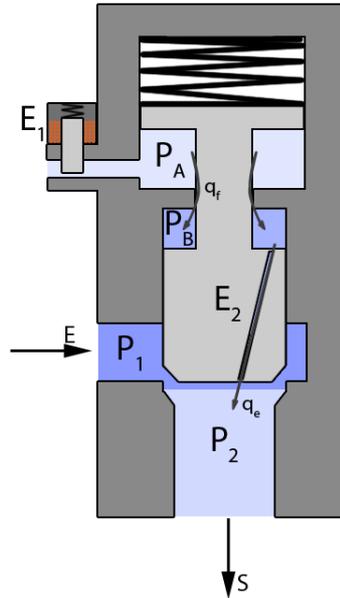


Figura 5.1: Conceito 4, de válvula pilotada

À semelhança do conceito 3, na solução melhorada existem dois órgãos móveis, o órgão regulador de caudal, E_2 e o órgão de pilotagem, E_1 . Para além disto, existem quatro zonas de pressão distintas nesta válvula, P_A , P_B , P_1 e P_2 . A diferença de pressões entre P_A e P_B é que é responsável pelo movimento do órgão E_2 . O órgão de pilotagem limita o caudal que entra para o volume de controlo onde a pressão é P_A , sendo que desta forma é possível fazer variar a diferença de pressões entre P_A e P_B . Porém, para que esta diferença de pressões exista, é necessário que haja um caudal de fugas, q_e , entre P_B e P_2 . O fecho estanque da válvula é garantido por uma mola com pré carga que atua sobre o órgão regulador de caudal, E_2 . De uma forma sucinta o funcionamento desta válvula dá-se do seguinte modo:

Para iniciar a abertura da válvula é necessário atuar sobre o órgão de pilotagem, no sentido de aumentar o caudal que entra para a zona onde a pressão é P_A . Por sua vez, este caudal vai passar para a zona onde a pressão é P_B e conseqüentemente para a zona onde a pressão é P_2 , fazendo com que a pressão P_B desça e o diferencial entre P_A e P_B , aumente. Como já foi referido anteriormente, é a diferença de pressões entre P_A e P_B que faz com que o órgão regulador se desloque e varie a área do orifício de passagem. Para fechar a válvula, o órgão de pilotagem deve deslocar-se no sentido de diminuir o caudal que entra na zona P_A , diminuindo o diferencial $P_A - P_B$ e, conseqüentemente, deslocando o órgão regulador no sentido de fechar a válvula. Quando o órgão de pilotagem atingir

a posição extrema, deixa de haver caudal a entrar para a zona onde a pressão é P_A e assim o caudal de fugas existirá apenas enquanto existir água nos volumes onde a pressão é P_A e P_B . Conclui-se assim que é possível estabelecer uma relação proporcional entre o movimento do órgão de pilotagem e o movimento do órgão regulador. O movimento do órgão de pilotagem é garantido por um solenóide, visto que este tipo de atuadores apresentam uma resposta boa em frequência e são fáceis de controlar eletricamente.

O princípio descrito anteriormente, permite reduzir o consumo elétrico do atuador utilizado na válvula para controlar o caudal, contudo, um outro requisito que esta válvula tem é o de se estabelecer uma relação linear entre a abertura da válvula e o sinal elétrico de controlo. Este requisito prende-se com o facto de, por vezes a pressão à saída da válvula ter oscilações. Estas oscilações fazem com que também existam variações no caudal de saída da válvula, o que é indesejável. Para atenuar estas variações do caudal de saída da válvula pode-se adicionar um compensador mecânico, como já foi abordado no pré estudo. Todavia, tendo em conta a complexidade e o tempo disponível, decidiu-se focar o desenvolvimento apenas na componente pilotada da válvula, deixando de lado o compensador mecânico.

5.2 Modelação

À semelhança do que foi realizado no pré estudo, foi criado um modelo matemático em ambiente SimulinkTM para estudar o comportamento da válvula. O modelo criado representa de uma forma simplificada os fenómenos físicos que ocorrem durante o funcionamento da válvula. Relativamente ao comportamento do escoamento no interior da válvula consideraram-se quatro volumes de controlo, tendo-se assumido que em cada um destes volumes de controlo a pressão de fluido é uniforme. Para além disto, considerou-se que os caudais nos orifícios presentes ocorrem em regime turbulento, sendo por isso modelados de acordo com a Equação 3.5. Utilizaram-se dois tipos de geometria para modelar os orifícios, a geometria circular e a em anel. O formato em anel permite obter uma face de encosto que impossibilita a passagem de caudal, e por este motivo, o formato em anel foi utilizado nos orifícios de regulação e de pilotagem, O_A e O_1 . Para além destes, também se considerou que o caudal entre o volume onde a pressão é P_A e P_B ocorre num orifício em anel, visto ser a forma correspondente à área que fica entre o órgão regulador e o interior da válvula. O orifício O_e foi modelado com o formato circular. Este orifício permite a passagem de um caudal de escape, que por sua vez garante que existe uma diferença entre as pressões P_A e P_B . O ajustamento entre o órgão regulador e o interior da válvula é deslizante justo, pelo que existe uma pequena área de passagem entre P_B e P_1 . Naturalmente, isto leva a que possa existir um pequeno caudal de fuga entre estas duas zonas. Como esta área é reduzida, espera-se que este caudal de fugas seja bastante reduzido, o que levou a que o mesmo não fosse considerado no modelo. Também neste modelo, considerou-se que não existe nenhum caudal de fugas entre a zona onde a pressão é P_A e a zona onde se encontra a mola. Teoricamente esta aproximação é possível, todavia, na prática, vai existir um pequeno caudal de fugas para a zona da mola. Certamente este caudal de fugas prejudicará o comportamento dinâmico da válvula, pelo que foi necessário pensar-se numa solução de vedação, durante a fase de elaboração do protótipo.

Para além da parte fluídica, o modelo criado contemplou também a dinâmica do

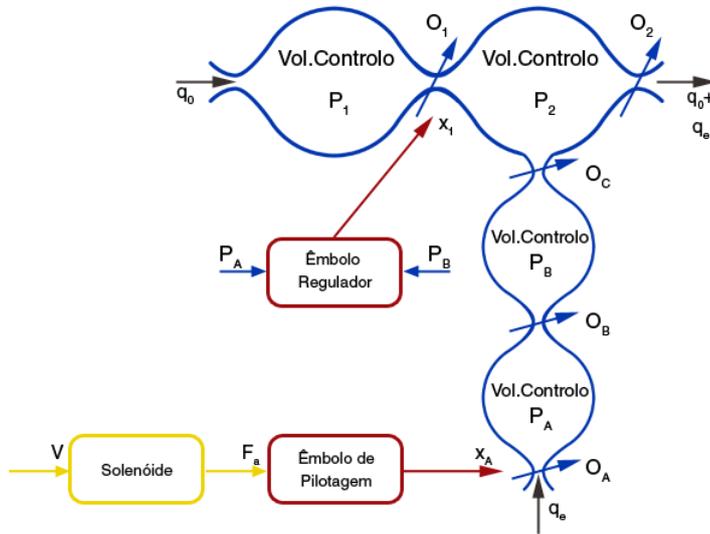


Figura 5.2: Diagrama do modelo

movimento dos órgãos da válvula. Neste sentido, a primeira etapa consistiu em desenhar os diagramas de corpo livre de cada um destes órgãos, como se apresenta na Figura 5.3. Sobre o órgão de pilotagem, considerou-se que se exercem as seguintes forças:

- Força do atuador.
- Força que a pressão P_s faz sobre o órgão de pilotagem.
- Força de inércia, proporcional à aceleração do órgão.
- Força de atrito, proporcional à velocidade do órgão.
- Força da mola, proporcional à posição do órgão.

Sobre o órgão regulador, considerou-se que se exercem as seguintes forças:

- Força que a pressão P_A faz sobre o órgão regulador.
- Força que a pressão P_B faz sobre o órgão regulador.
- Força de inércia, proporcional à aceleração do órgão.
- Força de atrito, proporcional à velocidade do órgão.
- Força da mola, proporcional à posição do órgão.

O movimento do órgão regulador é garantido pelo diferencial de pressões entre P_A e P_B , sendo que um dos parâmetros importantes para definir a dinâmica do movimento é a área sobre a qual cada uma destas pressões se exerce. A válvula que se pretende desenvolver deve ser capaz de garantir o fecho estanque, de forma a que não exista um caudal de fugas. Para que isto seja possível é necessário que a mola tenha uma pré carga, de forma a garantir que a válvula se encontra totalmente fechada. A rigidez desta mola

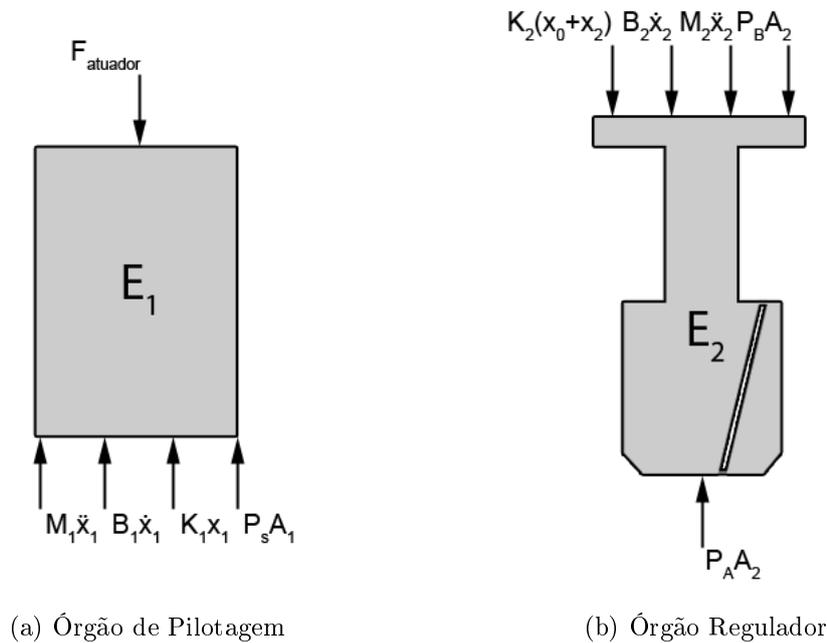


Figura 5.3: Diagrama de Forças

é também um parâmetro importante, visto que influencia a posição do órgão regulador e consequentemente o caudal que a válvula regula.

Como já foi referido anteriormente, o atuador que se pretende utilizar nesta válvula é um solenóide. Para que o modelo criado seja o mais realista possível, o atuador também foi considerado no modelo. O comportamento do solenóide foi modelado de acordo com o que foi visto na Secção 3.2.2. Os principais parâmetros do solenóide são a tensão de controlo, o número de espiras e o comprimento do enrolamento. O ajuste dos parâmetros do solenóide, conjuntamente com os parâmetros de movimento do êmbolo de pilotagem permite chegar ao consumo elétrico desejado para a válvula proporcional.

Ao longo desta secção tem sido descrita a forma como se desenvolveu o modelo da válvula, bem como os principais parâmetros que afetam o seu comportamento e a sua performance. De facto, existe um número considerável de parâmetros que afetam o comportamento e a performance da válvula. Por certo, existe uma combinação de valores para os parâmetros indicados que torna mínima a diferença entre o comportamento da válvula real e o comportamento que se deseja obter. Todavia, a parametrização da válvula não é uma tarefa trivial, pelo que foi necessário utilizar certas metodologias que permitissem encontrar a melhor combinação de parâmetros em tempo útil. Primeiramente o ajuste dos parâmetros foi feito de forma iterativa, por tentativa e erro, recorrendo a diversas simulações feitas no Simulink™. Este ajuste foi feito até que os resultados das simulações fossem razoavelmente semelhantes ao comportamento que se deseja que a válvula tenha. Todas as simulações foram realizadas no Simulink™R2015a, utilizando o *solver* de passo fixo ode14x-extrapolation (passo: 0.1 ms; grau de extrapolação: 4). Este passo permitiu obter um conjunto de parâmetros cujos resultados das simulações realizadas se enquadraram com os requisitos da válvula. O passo seguinte consistiu em otimizar alguns dos parâmetros obtidos, de forma a minimizar a diferença entre o comportamento desejado e o comportamento da válvula modelada. Estes parâmetros são a rigidez e a pré carga

da mola K_2 , sendo que ambos influenciam diretamente na posição do órgão regulador, E_2 . A otimização destes parâmetros foi feita recorrendo a um algoritmo automático de busca que o Matlab™R2015a dispõe ('GlobalSearch' solver; 'fmincon' para encontrar o mínimo do quadrado da diferença). Após esta etapa foi possível chegar a uma proposta de válvula, cujos resultados simulados são relativamente próximos daquilo que são os requisitos desejados para esta válvula.

5.3 Especificações e resultados das simulações

A partir do trabalho que foi realizado na etapa anterior, foi possível chegar-se a um conjunto de parâmetros que satisfazem razoavelmente os requisitos impostos a esta válvula. Os parâmetros relativos aos orifícios da válvula são apresentados na Tabela 5.2, de acordo com a nomenclatura utilizada na Figura 5.3. Os parâmetros relacionados com a dinâmica dos órgãos são apresentados na Tabela 5.3, e os relacionados com o solenóide, na Tabela 5.4. Para além dos parâmetros do modelo, também se consideraram certos valores para algumas constantes e propriedades do sistema e que se apresentam na Tabela 5.5. Um dos principais requisitos de projeto para a válvula a desenvolver é que a mesma seja capaz de funcionar com diferentes pressões na sua entrada. Como a válvula que se pretende desenvolver utiliza o princípio de pilotagem, diferentes pressões à entrada da válvula resultam diretamente em diferentes comportamentos dinâmicos. Todavia, o mais importante é garantir que a válvula é capaz de fechar o caudal de saída, independentemente da pressão de entrada. Isto consegue-se através da aplicação de uma pré carga na mola K_2 sendo possível, através da simulação, prever o valor desta pré carga com base no valor de pressão à entrada. De facto, a solução que é proposta consegue funcionar em qualquer pressão que se deseje, sendo apenas necessário ajustar a pré carga da mola.

Tabela 5.2: Parâmetros dos orifícios

	Orifício O_1	Orifício O_2	Orifício O_A	Orifício O_B	Orifício O_C
Formato	Em anel	Em anel	Em anel	Em anel	Circular
Diâmetro máx. (mm)	13.6	20	6	8.05	0.5
Diâmetro mín. (mm)	7	6.5	5	8	-
Curso (mm)	3	5	8	-	-

Tabela 5.3: Parâmetros do modelo

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
M_1	7.5 g	M_2	16 g	M_3	10 g
B_1	20 N.ms ⁻¹	B_2	20 N.ms ⁻¹	B_3	20 N.ms ⁻¹
K_1	200 N.m ⁻¹	K_2	240 N.m ⁻¹	K_3	150 N.m ⁻¹
		X_0	11.5 mm	A_3	3.14 cm ²
		A_2	2.34 cm ²		

Tabela 5.4: Parâmetros do Solenóide

Parâmetro	Valor
Tensão de controlo	5 V
Curso máximo	0.3 mm
Potência máxima	105 mW
Número de espiras	5035
Diâmetro do fio	0.112 mm
Diâmetro do solenóide	8 mm

Tabela 5.5: Constantes físicas utilizadas

Parâmetro	Valor
Coefficiente de descarga, C_d	0.7
Compressibilidade da água, β	$2.4 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$
Densidade da água, ρ	1000 kg.m^{-3}
Permeabilidade do vácuo, μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

O gráfico da Figura 5.4 apresenta a variação do caudal de saída simulado para diferentes pressões de entrada, mantendo a pressão de saída constante. Em todas as simulações, fez-se variar a tensão do solenóide, em rampa, de 0 a 5 V e depois de 5 a 0 V. Analisando este gráfico é possível notar que, quanto maior é a pressão de entrada da válvula, maior é o caudal máximo que esta pode regular, como seria de esperar, visto que o diferencial de pressão entre a entrada e a saída aumenta. Com uma pressão de entrada de 3 bar, é possível regular um caudal máximo de quase 35 L.min^{-1} . Para além disto também se nota que, quanto maior é a pressão de entrada, menos suave é a variação do caudal devido ao facto das forças que atuam sobre o órgão regulador serem também maiores.

O curso máximo dimensionado para o órgão regulador é de 3 mm, porém em todas as simulações realizadas concluiu-se que não é possível parametrizar a válvula de forma a ter abertura e fecho completos para diferentes pressões de entrada da válvula. Assim, o orifício regulador foi dimensionado recorrendo a diversas simulações, de modo a que com a abertura que ocorre a 3 bar, se conseguisse ter um caudal de cerca de 35 L.min^{-1} . Na simulação com uma pressão de entrada de 3 bar, foi possível observar que para um curso do órgão de pilotagem de 0.3 mm, o órgão regulador desloca-se 1.3 mm. Estes resultados demonstram que realmente existe uma amplificação do curso atuado, que leva diretamente a que se possa utilizar um atuador mais pequeno e com um consumo energético menor.

A válvula que se propõe apresenta uma dada perda de carga quando colocada num circuito hidráulico. Quando a válvula se encontra a regular um caudal de 35 L.min^{-1} , a perda de carga é sensivelmente de 0.3 bar. A perda de carga é proporcional ao caudal que a válvula regula, sendo que o gráfico desta variação é apresentado na Figura 5.5.

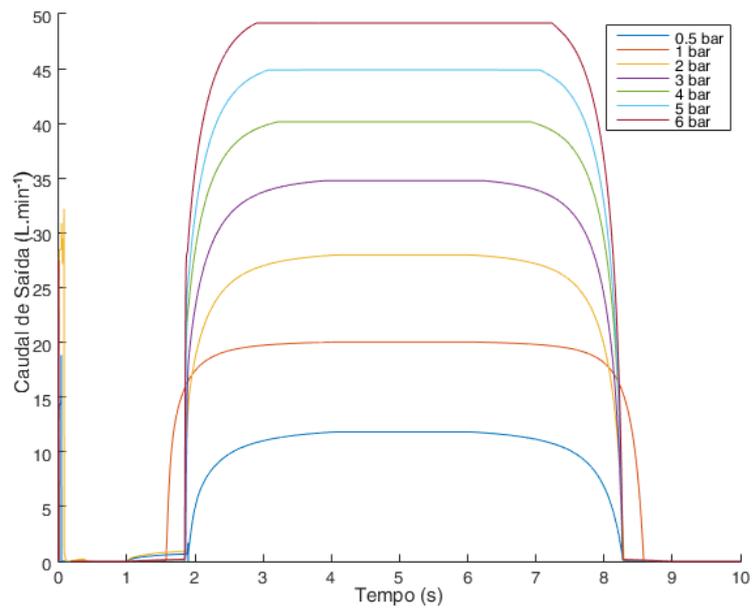


Figura 5.4: Variação do caudal de saída para diferentes pressões de entrada

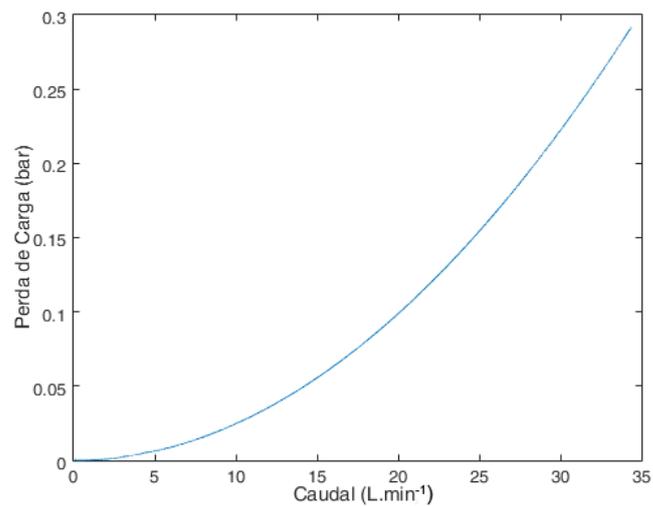


Figura 5.5: Perda de carga na válvula em função do caudal de saída

Capítulo 6

Conceção e fabrico do protótipo

As ferramentas de modelação e simulação até aqui utilizadas permitiram desenvolver o projeto da válvula de raiz, de uma forma bastante completa. De facto, foi possível chegar a uma proposta concetual de válvula que cumpre de forma satisfatória os requisitos impostos. No entanto, o modelo que foi criado e a partir do qual se realizaram diversas simulações é uma aproximação relativamente simplificada daquilo que são os fenómenos físicos que acontecem na realidade. Neste sentido, o fabrico de um protótipo físico permite realizar testes com condições reais de funcionamento, de forma a compreender a validade do modelo construído. A existência de resultados experimentais permite estabelecer uma comparação com os resultados obtidos na simulação, e deste modo melhorar o modelo construído inicialmente.

A construção de um protótipo físico a partir de um modelo concetual implica a alteração e adaptação de alguns aspetos da ideia às restrições e limitações da técnica de prototipagem utilizada. Apesar de não ser essencial, um dos fatores a ter em conta durante o desenvolvimento do protótipo é a sua complexidade técnica e, conseqüentemente, o seu custo de fabrico. Apesar de se tratar de um protótipo funcional, este deve ter o menor número de peças possível e também deve ser o mais simples de construir possível.

No capítulo anterior propôs-se um conceito de válvula que em ambiente simulado apresenta um consumo energético reduzido, e é também capaz de manter o caudal regulado mediante variações da pressão à saída da válvula. Naturalmente, o passo seguinte foi a construção de um protótipo relativamente simples que permitisse validar o conceito proposto.

6.1 Proposta de protótipo

A proposta de protótipo que é apresentada nesta secção procura estabelecer um compromisso entre as características que resultam do projeto da válvula e os aspetos relativos às tecnologias de fabrico e também à montagem e funcionalidade do protótipo.

A proposta de protótipo que é apresentada nesta secção tenta emular o esquema da Figura 5.1. Para tal são utilizadas 17 peças distintas que são descritas na Tabela 6.1. Idealmente, os materiais utilizados devem oferecer rigidez estrutural aos componentes, devem ser fáceis de maquinar e ainda devem ter um baixo coeficiente de atrito. Uma possibilidade é utilizar PTFE nos órgãos móveis e o alumínio no corpo da válvula. Porém, o protótipo foi construído integralmente em alumínio, visto ser o único material disponível

no Laboratório de Tecnologia Mecânica, aquando do fabrico do protótipo.

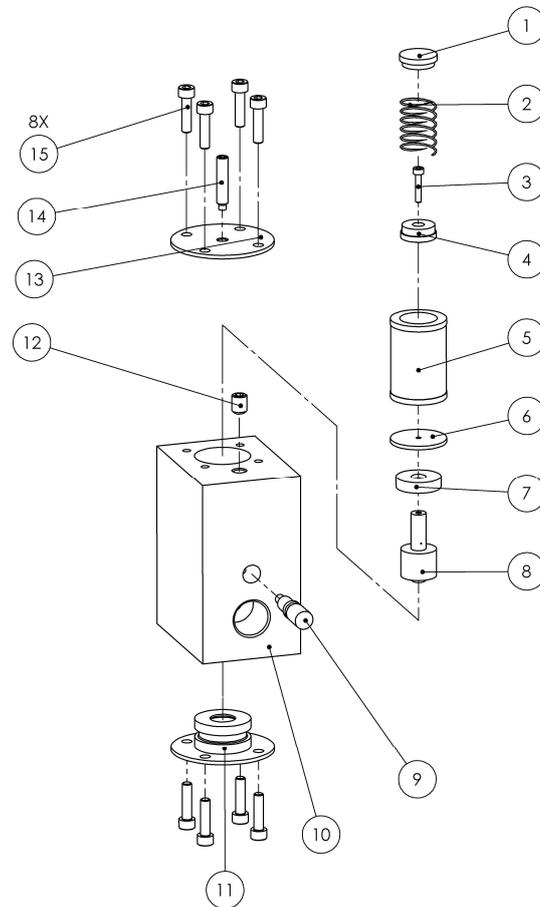


Figura 6.1: Vista explodida do protótipo

A Figura 6.1 mostra um desenho em vista explodida do protótipo desenhado e a Figura 6.2 mostra uma vista em corte simplificada. A peça principal é o corpo da válvula, onde se alojam todos os restantes componentes. Analisando com detalhe a Figura 5.1 pode observar-se que, na prática, é impossível montar o órgão regulador E_2 na válvula, do modo que ele aí está concebido. Para contornar este problema, o órgão regulador foi dividido em duas peças, sendo que estas se ligam por intermédio de uma ligação roscada com um parafuso de rosca métrica e diâmetro de 5 mm. Também na Figura 5.1 se pode observar que o interior da válvula tem um perfil em que, em certos entalhes, não tem zona de saída para a ferramenta. Deste modo, e com os equipamentos e ferramentas disponíveis não é possível fabricar estas peças conforme elas são apresentadas na Figura 5.1. Assim sendo, foi necessário recorrer a diversos casquilhos, que quando montados no corpo da válvula permitem obter o perfil desejado para a válvula. Estes casquilhos são o casquilho de guiamento, o casquilho de fuga e a tampa de saída. A tampa de saída contém a face de encosto do órgão regulador, que assegura o fecho estanque da válvula. O casquilho de fuga tem um furo $\phi 8H7$, sendo que o veio do órgão regulador foi toleranciado de modo a obter o orifício O_B . O casquilho de guiamento, como o próprio nome indica,

Tabela 6.1: Lista de peças

Nº	Ref ^a .	Descrição	Material	Qtd.
1	P115	Casquilho de pré carga	Alumínio	1
2	-	Mola de compressão	Aço	1
3	-	Parafuso CHC M3x16 - ISO4762	Aço	1
4	P112B	Órgão regulador - lado 2	Alumínio	1
5	P113C	Casquilho de guiamento	Alumínio	1
6	-	Membrana de vedação	Borracha	1
7	P113A	Casquilho de fuga	Alumínio	1
8	P112A	Órgão regulador - Lado 1	Alumínio	1
9	P118	Órgão de pilotagem	Alumínio	1
10	P110	Corpo	Alumínio	1
11	P113B	Tampa de saída	Alumínio	1
12	-	Parafuso s/ cabeça M8x12 - ISO4028	Aço	1
13	P114	Tampa da pré carga	Alumínio	1
14	-	Parafuso s/ cabeça M6x30 - ISO4028	Aço	1
15	-	Parafuso CHC M5x16 - ISO4762	Aço	8
16	-	Junta toroidal 25x2.65 - ISO3061	Borracha	1
17	-	Junta toroidal 7.1x1.8 - ISO3061	Borracha	1

oferece guiamento à mola cuja pré carga é variável. Todas as peças que ficam alojadas no corpo da válvula foram toleranciadas com um ajustamento rotativo corrente de forma a facilitar o seu fabrico, sem no entanto comprometer a montagem e o funcionamento do protótipo. Apenas o lado 1 do órgão regulador e o órgão de pilotagem utilizam um toleranciamento mais justo, por terem movimento guiado no corpo da válvula.

Um dos aspetos mais importantes neste protótipo é a vedação entre a câmara onde a pressão é P_A e a zona onde se encontra a mola de compressão. A solução mais óbvia seria a colocação de uma junta toroidal entre o órgão regulador e o casquilho de guiamento. Todavia, a utilização deste tipo de junta iria aumentar o atrito no movimento do órgão regulador em relação ao casquilho de guiamento. Isto levaria, certamente, a que o conceito não funcionasse devido à atuação hidráulica que é utilizada para movimentar o órgão regulador. A alternativa que se encontrou é a utilização de uma membrana de vedação flexível. Trata-se de um disco em borracha que é seguro na sua parte exterior pelo casquilho de guiamento, e na sua parte interior pelo órgão regulador. Deste modo, quando o órgão regulador se desloca a membrana flexível acompanha o seu movimento sem o comprometer.

A mola de compressão é um dos componentes mais importantes, visto que a mesma confere rigidez ao movimento do órgão regulador. Realizou-se uma pesquisa para encontrar uma mola cuja rigidez e dimensões se enquadrem no projeto desta válvula. As características da mola selecionada podem ser encontradas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Características da mola

Rigidez	210 N.m-1
D. exterior	19.4 mm
Comp. livre	30 mm
Arame	0.9 mm

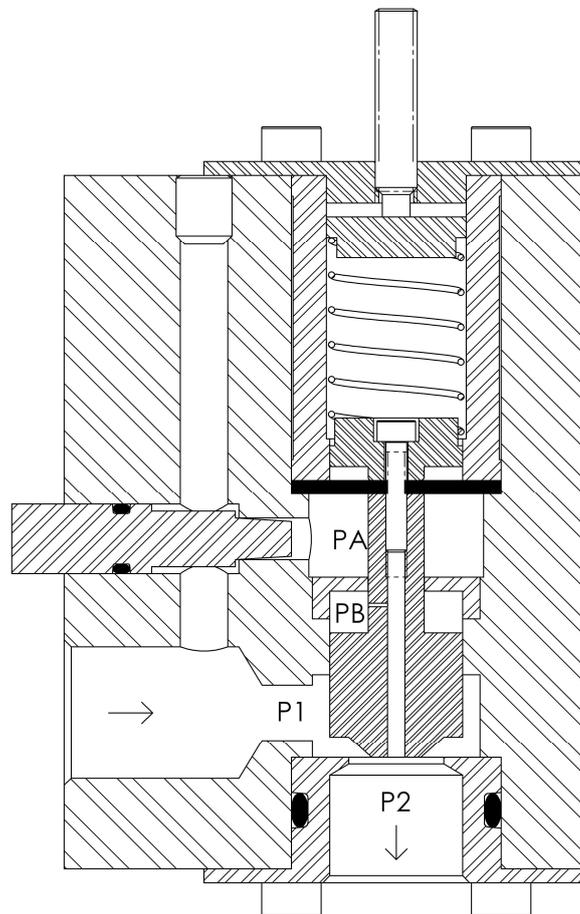


Figura 6.2: Vista simplificada em corte

6.2 Fabrico e montagem

O protótipo foi construído no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, pelo que a principal tecnologia de fabrico utilizada foi a maquinagem por arranque de avara. Os principais equipamentos disponíveis são um torno convencional, um torno de comando numérico, uma fresa convencional e um centro de maquinagem de comando numérico. Os desenhos de definição de cada uma das peças que constituem o protótipo encontram-se nos anexos da presente dissertação. A mola foi encomendada com as características já referidas, de forma a respeitar o que foi projetado na etapa anterior.



Figura 6.3: Peças do protótipo



Figura 6.4: Protótipo montado

Capítulo 7

Testes experimentais ao protótipo

7.1 Metodologia experimental

A última etapa da presente dissertação consistiu na realização de testes experimentais ao protótipo desenvolvido. Essencialmente estes testes permitiram avaliar se, de facto o conceito desenvolvido funciona conforme se tinha previsto na simulação. Os testes experimentais ao protótipo desenvolvido foram realizados no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. Infelizmente não foi possível ter acesso a uma bancada de ensaios própria para o teste deste tipo de componentes, pelo que foi necessário utilizar os recursos disponíveis da melhor forma possível.

A maior ênfase vai para o teste do princípio de pilotagem da válvula, pelo que os primeiros testes realizados não incluíram a atuação do solenóide no órgão de pilotagem. O movimento deste órgão foi provocado manualmente, sendo que o solenóide será incluído depois, se se verificar que o conceito pilotado funciona corretamente. Todos os testes realizados ao protótipo desenvolvido foram feitos com uma pressão de entrada de 3 bar e com a saída da válvula aberta para a atmosfera. A medição do caudal foi feita de forma indireta, através da cronometragem do tempo de enchimento de um volume conhecido. Isto levou a que todos os testes fossem realizados em regime estacionário, isto é, é a posição de regulação da válvula não variou durante o tempo de medição. O primeiro teste realizado ao protótipo consistiu em verificar visualmente se o fecho e a abertura da válvula ocorrem como seria de esperar. Em seguida foram realizados testes para averiguar se, de facto, existe uma relação entre o movimento do órgão de pilotagem e o órgão regulador. Basicamente, nestes testes ajustou-se manualmente a posição do órgão de pilotagem e mediu-se o caudal de saída da válvula. Com isto é possível estabelecer uma comparação entre o funcionamento real do protótipo e o funcionamento simulado com o modelo. A metodologia utilizada para estes testes é a seguinte:

1. Montou-se uma tubagem flexível entre a rede de água e a entrada de água do protótipo.
2. Ajustou-se manualmente a posição do órgão de pilotagem.
3. Abriu-se a torneira de água para a posição máxima, e esperaram-se alguns instantes até que o caudal na válvula estabilizasse.

4. Tendo um volume conhecido, cronometrou-se o tempo que demorou a encher esse volume.
5. Fechou-se a torneira de água, para terminar o teste.

7.2 Resultados experimentais

Realizou-se o primeiro teste à válvula, no qual se avaliou se a válvula é capaz de abrir e fechar com o movimento do órgão de pilotagem. Visualmente, foi possível constatar que o órgão regulador não se movimenta com o deslocamento do órgão pilotado. Contudo a válvula tem um caudal de saída, que não foi medido. Se se der movimento ao órgão regulador, é possível verificar que o caudal de saída da válvula aumenta. Também se observou que o movimento do órgão regulador não é tão deslizante como se deveria ser ficando até preso, por vezes.

7.3 Análise de resultados

Devido ao facto do protótipo não ter cumprido com as funções básicas de abertura e fecho, não foi possível realizar medições ao caudal de saída, que depois pudessem ser comparadas com os resultados obtidos na simulação. Posto isto, importa compreender quais são os principais motivos para que o protótipo não funcionasse da forma que se tinha previsto na fase de projeto.

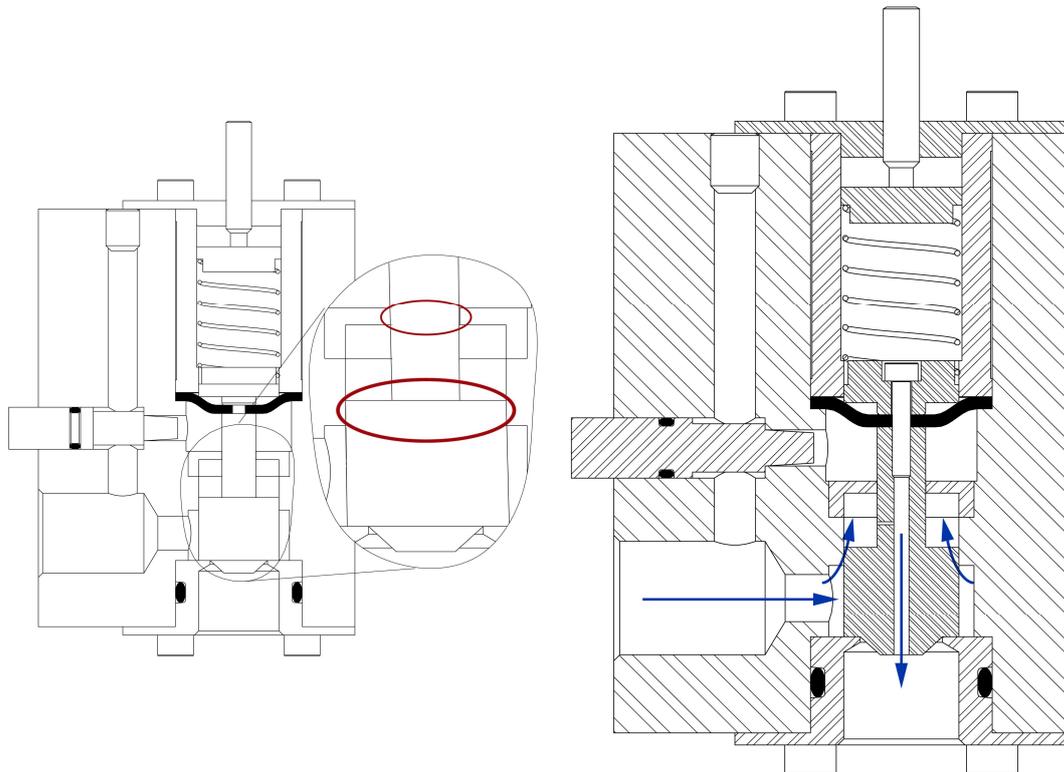
Um aspeto que saltou à vista, até na fase de montagem foi o facto do órgão regulador não ter um movimento deslizante, como seria de esperar. Provocando o movimento deste órgão, manualmente, é possível observar que este por vezes fica preso. Isto acontece devido a um desalinhamento nos furos do corpo e do casquilho de guiamento, furos estes, por onde passa o órgão regulador. O facto do ajustamento entre o órgão regulador e o corpo da válvula ser muito fino, leva a que um pequeno desalinhamento entre este e o furo do casquilho regulador prejudique o movimento do órgão regulador. A Figura 7.1a apresenta de uma forma mais elucidativa o problema descrito anteriormente, estando os furos que se encontram desalinhados assinalados a vermelho.

Outro aspeto que não correu como seria de esperar, foi a existência de um caudal à saída da válvula, quando o órgão de pilotagem se encontrava na posição máxima, isto é na posição de fecho da válvula. A única explicação lógica que se pôde encontrar para isto é que, existe um caudal de fugas através do ajustamento do órgão regulador e o corpo da válvula. A Figura 7.1b apresenta sob a forma de um esquema a situação explicada anteriormente. Este caudal não foi considerado durante a modelação tal como foi explicado na Secção 5.2, pelo que decidiu-se adicionar o mesmo ao modelo. Com isto pretendeu-se averiguar qual a influência que este caudal tem no comportamento da válvula, e de que forma pode ajudar a explicar o não funcionamento do protótipo. Foram realizadas diversas simulações, que permitiram concluir que a existência deste caudal adicional de fugas não condiciona a abertura e o fecho da válvula, apenas mudando a rigidez do movimento do órgão regulador. Todavia, isto pressupõe que o protótipo respeita todas as dimensões projetadas no modelo. Se por exemplo, a área do orifício entre as câmaras de pressão P_A e P_B , for maior do que aquela que ficou definida na parametrização, então o caudal entre a zona de pressão P_B e P_1 tem influência no comportamento da válvula, levando a que esta não abra. O ideal seria que o caudal indicado não existisse, pelo que para conseguir

isso é necessário melhorar o protótipo construído. A este nível, uma melhoria a realizar ao protótipo é a implementação de uma solução de vedação por membrana entre as zonas de pressão P_B e P_1 , de modo a reduzir o caudal de fugas que possa existir através do ajustamento.

Para além dos problemas indicados anteriormente observou-se também que, quando a válvula se encontra fechada, o encosto do órgão regulador à tampa de saída não é o ideal, não permitindo a vedação total da válvula. Isto acontece devido a facto das faces de encosto do órgão regulador e da tampa de saída não terem sido retificadas, tendo estas alguma rugosidade, que não permite o encosto perfeito e conseqüentemente a vedação da válvula. Esta situação pode ser melhorada com a adição de um vedante na face do órgão regulador. Quando o órgão regulador está na posição de fecho o vedante é ligeiramente comprimido contra a tampa de saída, o que garante a vedação total do orifício.

Na presente análise foi feita uma reflexão acerca dos aspetos que contribuíram para o não funcionamento do protótipo construído. Acredita-se que estas questões estão maioritariamente relacionadas com aspetos construtivos do protótipo, passíveis de serem melhorados. Neste espírito, estudou-se de uma forma breve, uma possível simplificação do conceito proposto, que reduz a complexidade do protótipo físico. Deste modo, o protótipo fica menos limitado pelas questões construtivas. Esta proposta de melhoria é apresentada a secção seguinte.



(a) Desalinhamento entre furos

(b) Passagem do caudal na experiência realizada

Figura 7.1: Esquemas explicativos

7.4 Proposta de melhoria

Anteriormente, referiu-se que um dos problemas verificados no protótipo é a existência de um caudal de fuga que não tinha sido considerado. Para contornar este problema é necessário implementar uma solução de vedação no protótipo. Isto significa aumentar ainda mais a complexidade do protótipo, o que levou a que se repensasse o conceito proposto na Secção 5.1, por forma a, simplificar a construção do protótipo físico. Assim, começou-se por analisar a Figura 5.1, e tentar eliminar os aspetos que introduzem complexidade no modelo e no protótipo. Um destes aspetos, é o volume onde a pressão é P_B , que é utilizado para criar um diferencial de pressão em relação à pressão P_A . É possível imaginar um conceito de válvula onde este volume não existe, mas, continua a verificar-se o movimento do órgão regulador pela pressão de pilotagem P_A . Com base neste raciocínio sugere-se uma versão melhorada e que é apresentada na Figura 7.2b. O funcionamento desta dá-se do seguinte modo: Inicialmente o órgão E_1 encontra-se na posição inicial, sendo que não existe passagem de caudal entre os volumes de pressão P_1 e P_A . Desta forma, não existindo fluido na zona de pressão P_A e devido à pré carga da mola, o órgão E_1 fecha a válvula. Quando se desloca o órgão E_1 , existe a passagem de um caudal de pilotagem e, a pressão P_A vai exercer uma força ascendente sobre o órgão E_2 . Esta força vai ser responsável pelo movimento do órgão E_2 e conseqüente abertura da válvula. Existe um orifício de escape que permite o movimento no sentido contrário, por alívio da pressão P_A . Este orifício de escape interliga os volumes de pressão P_A e P_2 .

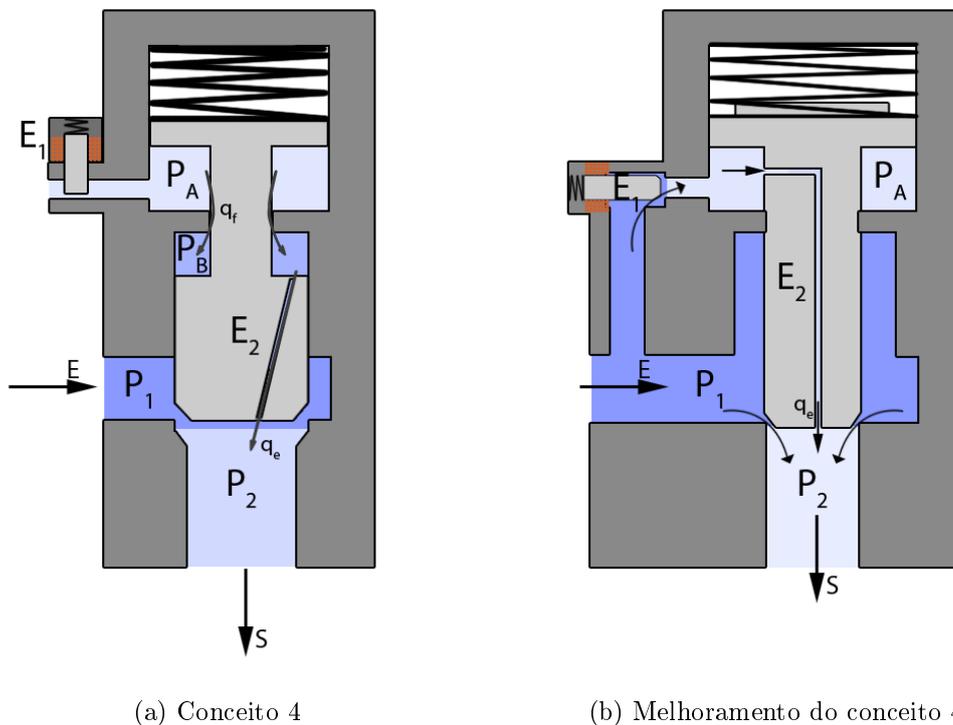


Figura 7.2: Esquemas explicativos

Foi feito um modelo deste melhoramento, para averiguar a sua viabilidade. O modelo foi construído de acordo com a Figura 7.3. Consideraram-se três principais volumes de

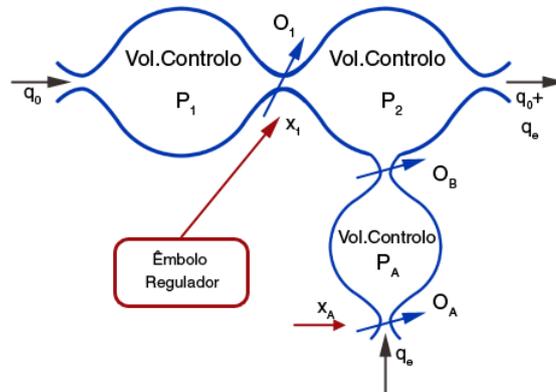


Figura 7.3: Diagrama do modelo

controle, correspondentes às pressões P_1 , P_2 e P_A . O orifício O_1 , regula o caudal da válvula, e o orifício O_A regula o caudal de pilotagem. O orifício O_B é responsável por aliviar o caudal da câmara onde a pressão é P_A , evitando que o sistema fique estático. Um pormenor importante é que a área do orifício O_B deve estar entre o valor máximo e mínimo da área do orifício O_A . Outro aspeto importante nos orifícios, é a variação da área com o curso do órgão. Inicialmente esta variação dava-se de uma forma quase linear, visto que a área do orifício tomava o formato de um anel cujo diâmetro exterior varia com o curso do órgão. Todavia chegou-se à conclusão que este formato torna a variação do caudal de saída pouco sensível. Isto acontece devido ao facto do caudal variar, não só com a área do orifício mas também com a diferença de pressões através do orifício. A variação da diferença de pressões no orifício não é constante ao longo da abertura do orifício, o que faz com que inicialmente o caudal de saída da válvula varie de uma forma mais acentuada. Visto que o caudal também varia com a área do orifício, é possível arranjar uma relação entre a área do orifício e o curso do órgão de modo a que, para pequenas aberturas da válvula, a área do orifício seja pequena e, para aberturas maiores a área seja maior. Deste modo a variação de área é inversamente proporcional à variação da pressão, e com isto consegue obter-se uma variação do caudal mais suave. Este efeito pode ser conseguido se, por exemplo a relação entre o curso do órgão regulador e a área do orifício for semelhante ao gráfico da Figura 7.4. Isto foi implementado neste último modelo criado, recorrendo a uma função polinomial de 3^o grau.

Para além da componente fluidica, modelou-se também a mecânica do órgão regulador. No entanto e visto que apenas se pretendia averiguar se o princípio de pilotagem funcionaria, o solenóide que atua sobre o órgão de pilotagem e a sua mecânica não foram contemplados neste modelo. A parametrização deste modelo foi realizada de uma forma breve por iterações até que a grandeza dos valores estivesse dentro do esperado para esta válvula.

Foram realizadas algumas simulações com o modelo criado. Visto que a mecânica do órgão de pilotagem não foi implementada, o sinal que de entrada do modelo foi a posição

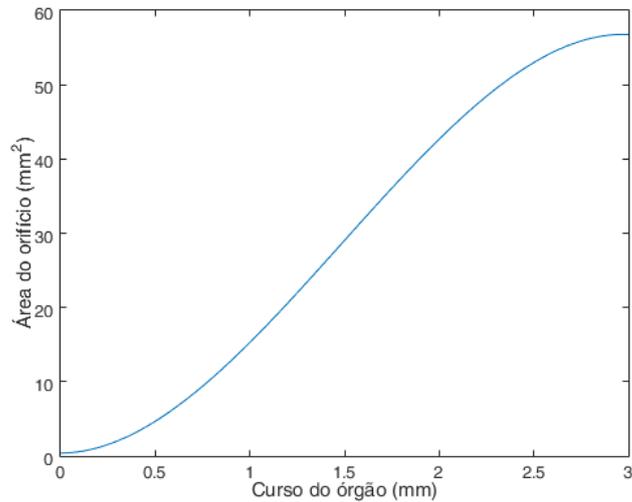


Figura 7.4: Área do orifício regulador em função do curso do respectivo órgão

do órgão de pilotagem que foi simulada com um bloco construtor de sinais do Simulink™. Nas simulações realizadas, fez-se variar a posição do órgão de pilotagem desde a posição inicial, até à posição onde a área do orifício de pilotagem é máxima. O órgão de pilotagem foi mantido nesta posição por algum tempo e depois foi deslocado até à posição de fecho da válvula. Na Figura 7.5, apresenta-se o gráfico com a evolução do caudal ao longo do tempo, bem como, a evolução da posição do órgão de pilotagem. Comparando com o gráfico presente na Figura 5.4, relativo ao conceito prototipado, pode-se observar que os valores máximo e mínimo são semelhantes. Todavia, na melhoria que é apresentada nota-se claramente que o caudal varia de uma forma mais suave e linear. Isto deve-se ao facto de se ter feito variar a área do orifício com o curso do órgão com a forma da Figura 7.4, como se explicou anteriormente.

Este modelo foi criado de uma forma breve e simplificada, com o principal objetivo de avaliar se é possível simplificar o conceito que foi proposto anteriormente e cujo protótipo apresentou vários problemas devido aos requisitos inerentes à sua construção. Como se observou pelos resultados das simulações, a melhoria proposta comporta-se de forma semelhante ao conceito anterior e, apresenta uma menor complexidade para prototipar. Observando o esquema da Figura 7.2b, rapidamente se percebe que apenas é necessário implementar duas soluções de vedação que são entre a zona da mola e a zona de pressão P_A e, entre as zonas de pressão P_A e P_1 . Para além disto, não existe a necessidade de se dividir o órgão regulador em duas partes pois, com a configuração ele é montado facilmente pela parte de cima. Assim, conclui-se que o próximo protótipo é mais simples, todavia, antes de passar novamente à fase de prototipagem é necessário encontrar o conjunto de parâmetros mais adequado para este modelo.

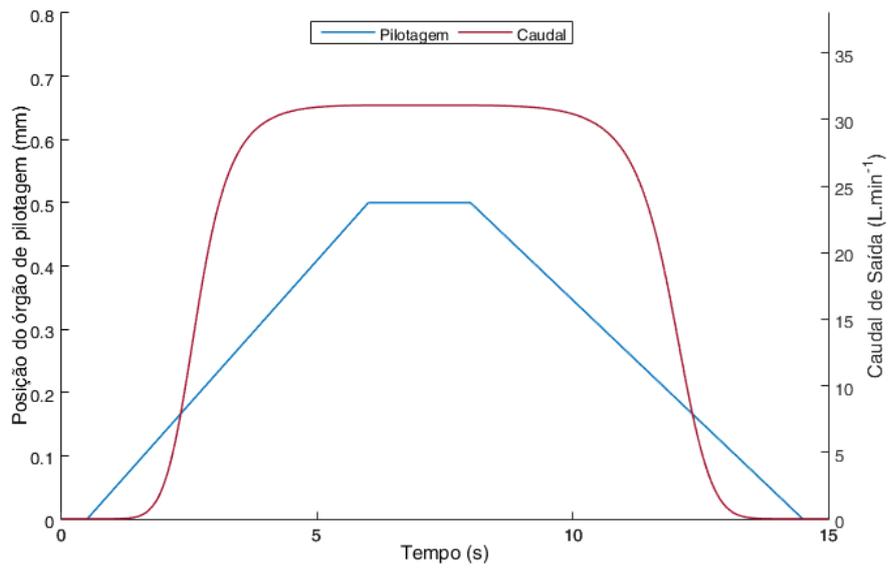


Figura 7.5: Variação do caudal de saída para um pressão de entrada de 3 bar

Parte IV

Considerações finais

Capítulo 8

Conclusões e sugestões de trabalho futuro

8.1 Conclusões

O principal objetivo da presente dissertação consistiu no estudo e desenvolvimento de um novo conceito de válvula reguladora do caudal de água. O trabalho realizado durante esta dissertação baseou-se nos dois principais problemas que a solução desenvolvida pretende resolver. Por um lado esta válvula deve ser capaz de regular corretamente o caudal à sua saída, mesmo quando existem variações da pressão no circuito hidráulico. Por outro lado, deve apresentar um consumo energético baixo ao nível do seu atuador.

A regulação correta do caudal, na existência de variações de pressão à saída, pode ser feita de duas maneiras. A mais direta consiste em realizar um controlo em malha fechada com base num sinal de referência, como por exemplo o caudal ou a diferença de pressões no orifício. Todavia, um dos requisitos inerentes a esta válvula é que seja relativamente simples e com um custo de produção baixo, pelo que a utilização de sensores de pressão ou de caudal não se enquadra naquilo que é pretendido. Tendo isto em mente, foi realizado um pré estudo utilizando um LVDT, como uma alternativa para a medição indireta da pressão. No entanto, chegou-se à conclusão que existe um atraso na aquisição do sinal que impossibilita o funcionamento correto do conceito. Posto isto, partiu-se para outra maneira de regular o caudal mediante variações na pressão, que é a utilização de um compensador mecânico. Esta solução mostrou-se adequada através das simulações realizadas, sendo que o sistema tende a manter constante o diferencial de pressão no orifício regulador.

No que concerne à redução do consumo energético do atuador da válvula, concluiu-se que uma das formas possíveis é a utilização da atuação hidráulica, por intermédio de um estágio de pilotagem. Isto é, adaptar alguns dos princípios utilizados nas servo-válvulas hidráulicas, não esquecendo que o conceito desenvolvido é direcionado a baixas pressões de funcionamento. Inicialmente, no pré estudo realizado, este princípio foi abordado de um modo mais complicado, ainda que apresentasse resultados promissores. Todavia, ao longo do desenvolvimento houve uma evolução natural dos conceitos e das ideias que permitiu que se chegasse à solução que foi apresentada nesta dissertação. Esta foi a melhor solução encontrada para uma válvula que deve ter um consumo energético reduzido, e deve ser capaz de funcionar numa determinada gama de pressões de entrada.

Uma das principais conclusões retiradas durante o desenvolvimento é que o conceito por detrás do funcionamento desta válvula necessita que haja um pequeno caudal de fugas entre a zona de pilotagem e a saída da válvula. Este caudal de fugas é necessário para aliviar a pressão da zona de pilotagem, permitindo assim, o movimento do órgão regulador em ambos os sentidos. Também, durante a modelação, observou-se que a área deste orifício de fugas deve ter um valor que se encontre entre o valor mínimo e o valor máximo da área do orifício de pilotagem. Uma das características particulares do conceito desenvolvido é que necessita de orifícios e furos de passagem com dimensões muito reduzidas.

O desenvolvimento realizado ao longo desta dissertação permitiu chegar a uma solução que contempla os dois princípios referidos anteriormente. Por um lado, responde às variações de pressão à saída com um compensador mecânico de pressão e, por outro, explora o baixo consumo energético através de uma solução de válvula pilotada. Esta solução foi estudada através de um modelo, sobre o qual se correram inúmeras simulações que permitiram obter todos os parâmetros da válvula. Posto isto, e tendo uma solução desenvolvida do ponto de vista concetual, partiu-se para a construção de um protótipo físico que permitisse testar e validar alguns aspetos da solução modelada. Todavia, por se tratar do primeiro protótipo a ser construído, optou-se por construir apenas a parte relativa à componente de pilotagem da solução proposta. O conceito e o protótipo desenvolvidos são direcionados à regulação de caudal em equipamentos de águas domésticas. Porém, ao longo desta dissertação nunca se consideraram as implicações que a temperatura da água poderia ter na definição e parametrização da válvula desenvolvida. Certamente a água a maior temperatura influencia diretamente nas dimensões dos orifícios e tolerâncias da válvula, sendo que isso pode comprometer o seu correto funcionamento, no entanto essa questão ficou colocada de lado neste primeiro protótipo.

A conceção do protótipo da válvula foi uma tarefa complexa, onde foi necessário ter em conta as características do modelo concetual desenvolvido e as limitações dos materiais e equipamentos de fabrico disponíveis. Naturalmente, foram necessárias algumas iterações, até se chegar a um protótipo que fosse representativo do sistema modelado e também simples construtivamente. Após a construção do protótipo físico, procedeu-se à realização de alguns testes ao seu funcionamento. Contudo, rapidamente se concluiu que o protótipo construído não cumpre com as funções básicas de abertura e fecho da válvula. As razões que fazem com que o protótipo não funcione foram identificadas, e são:

1. A existência de um desalinhamento entre dois furos, por onde passa o órgão regulador do caudal, fazendo com que o atrito estático presente no movimento aumente demasiado.
2. O aparecimento de um caudal de fugas entre duas câmaras que não foi considerado durante a modelação do conceito.

Apesar do protótipo não ter funcionado como se esperava, o seu fabrico e teste chamou à atenção para certos aspetos construtivos e também do modelo que podem ser melhorados. Concluiu-se que é possível simplificar alguns aspetos do protótipo, sem no entanto comprometer o modelo desenvolvido. Estas simplificações facilitam a construção do protótipo e acredita-se que eliminarão os problemas verificados no protótipo construído. O trabalho desenvolvido durante esta dissertação partiu do zero, pelo que é

difícil conseguir acertar com todos os aspetos e particularidades na primeira versão do modelo e do protótipo. Neste sentido, realça-se o desenvolvimento concetual realizado, que permitiu chegar a uma solução que dá resposta aos problemas colocados no início desta dissertação. O desenvolvimento de um novo componente de raiz como o que foi feito nesta dissertação, é um processo iterativo, onde a falha é inevitável e só com ela se pode avançar no desenvolvimento. O facto do protótipo não funcionar, não significa que o trabalho realizado não seja válido, antes pelo contrário, abre portas a sugestões e propostas de melhoria quer do protótipo físico, quer do modelo concetual.

8.2 Trabalho futuro

Apesar de ter sido feito muito trabalho ao longo desta dissertação, existe ainda um longo caminho a percorrer até se chegar ao objetivo final, que é ter um protótipo de válvula funcional de baixo consumo energético. Os primeiros passos já foram dados na presente dissertação, pelo que, com base nas conclusões retiradas é necessário continuar a desenvolver o modelo e o protótipo físico criados.

No Capítulo 7.4 foi apresentada uma proposta de melhoria ao nível do modelo e consequentemente do protótipo. O seu principal objetivo é o de simplificar o protótipo, visto que os problemas encontrados, estão relacionados com questões construtivas. A proposta de melhoria desenvolvida permitiu validar uma simplificação que pode ser implementada no conceito e no protótipo já desenvolvidos. Assim, uma das primeiras tarefas no seguimento da dissertação é o desenvolvimento mais estendido da melhoria proposta. Este desenvolvimento consiste, essencialmente, na otimização dos parâmetros do modelo simplificado. Sugere-se a utilização de algoritmos avançados de busca de parâmetros, tal como foi feito na presente dissertação. Deste modo é possível encontrar o melhor conjunto de parâmetros de uma forma rápida e eficiente.

Em seguida e com os parâmetros do modelo otimizados, deve-se partir para uma segunda versão do protótipo. Esta segunda versão pode partir de alguns dos componentes já fabricados, como por exemplo o corpo da válvula. Todavia, é necessário fabricar os componentes do interior da válvula. Uma das sugestões de melhoria é o fabrico dos componentes num material mais macio e com um coeficiente de atrito inferior, em especial todos os componentes que tiverem movimento no protótipo. Sugerem-se polímeros macios, passíveis de serem trabalhados pelas tecnologias de maquinagens, como por exemplo o PTFE. Uma outra melhoria ao nível da vedação é a colocação de juntas tóricas na face de encosto dos órgãos móveis. Deste modo, quando o órgão se encosta ao corpo da válvula para a fechar, o vedante é comprimido, garantindo uma vedação eficiente. Após a construção de uma segunda versão do protótipo, é possível partir para a realização de novos testes e assim, retirar novas conclusões que permitam avançar com o desenvolvimento da válvula.

Bibliografia

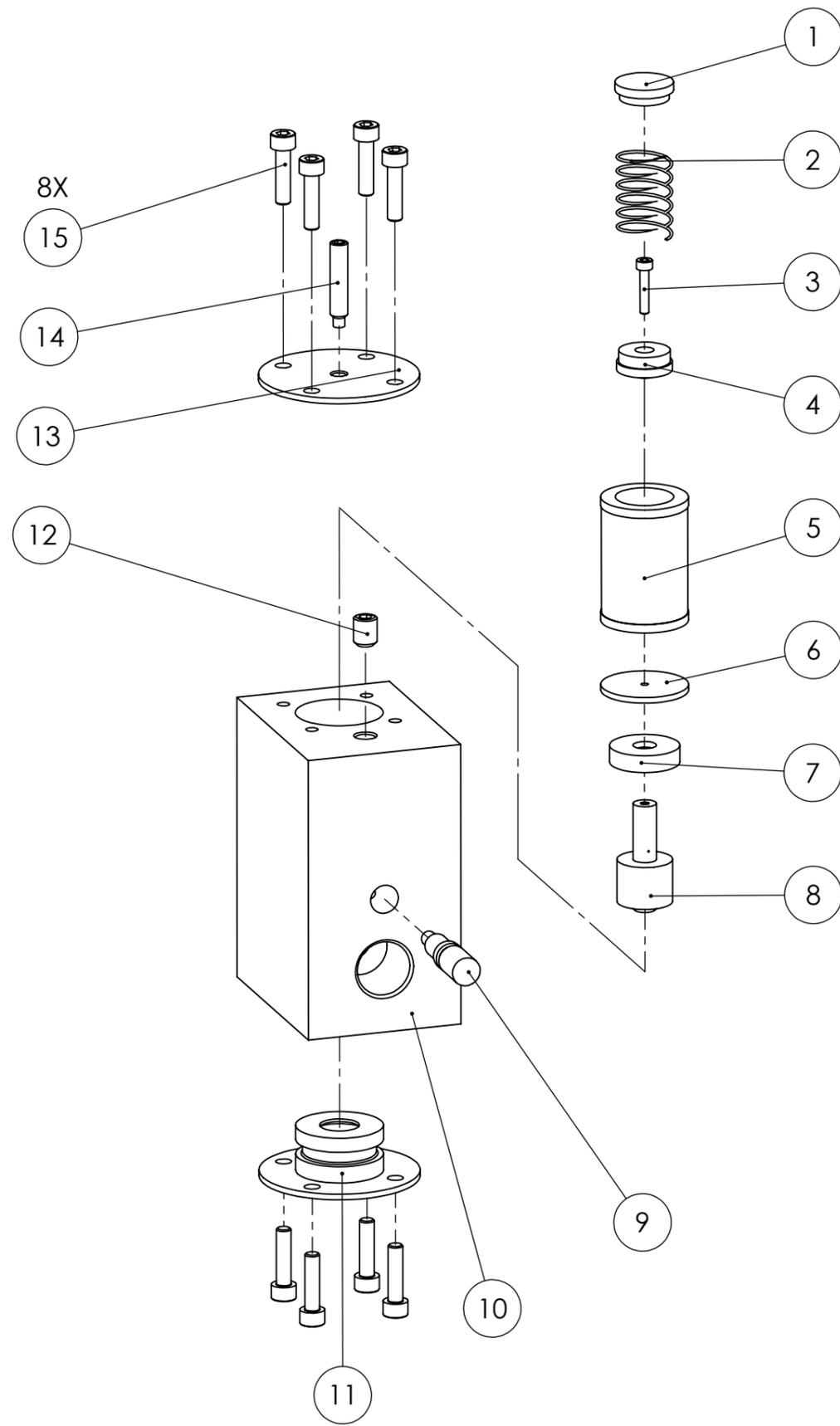
- [1] ERSAR. (Consultado em 02/2016) Grandes números do setor. [Online]. Disponível: <http://www.ersar.pt>
- [2] F. M. White, “Viscous Flow in Ducts,” em *Fluid Mechanics*, 5^a ed. Rhode Island: McGraw-Hill, 2007, pp. 325–420.
- [3] H. E. Merrit, *Hydraulic Control Systems*. Cincinnati: John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [4] J. Dobchuk, R. Burton, P. Ukrainetz, P. Nikiforuk, e J. Y. Huh, “Comparison of Several Flow Control Strategies for Proportional Valves,” *Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power*, vol. 2002, n^o5-3, pp. 763–768, 2002. [Online]. Disponível: https://www.researchgate.net/publication/274676427_Comparison_of_Several_Flow_Control_Strategies_for_Proportional_Valves
- [5] H. Janocha, *Actuators*, H. Janocha, Ed. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2004, vol. 53, n^o 9. [Online]. Disponível: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-05587-8>
- [6] F. Eriksson, “Stepper Motor Basics,” Tech. Rep., 1998. [Online]. Disponível: <http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>
- [7] K. W. Oh e C. H. Ahn, “A review of microvalves,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, n^o 5, pp. R13–R39, 2006.
- [8] E. Wightman, “Instrumentation in Process Control,” em *Instrumentation in Process Control*. London: London Butterworths, 1972, ch. 7 - Flow M, pp. 359–367.
- [9] A. Pereira de Melo, “Transformador Diferencial Linear Variável,” em *Teoria dos Sistemas de Controlo Lineares*. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2009, ch. 3 - Modelos Matemáticos dos sistemas físicos, pp. 107–109.
- [10] B. Nesbitt, *Handbook of Valves and Actuators*. London: Elsevier Science & Technology Books, 2007.
- [11] S. Sarco. (Consultado em 02/2016) <http://www2.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/control-hardware-el-pn-actuation/control-valves.asp>.
- [12] Flow Control Industries Inc., “Small DeltaP Valve Series,” Woodinville, Tech. Rep., 2012.

- [13] Numatics, “E22 Operation Manual,” Michigan, Tech. Rep., 2009. [Online]. Disponível: <http://www.numatics.com/common/PDF/Numatics-Precision80Series-R0510.pdf>
- [14] J. A. F. Ferreira, “Modelação de Sistemas Hidráulicos para Simulação com Hardware-in-the-loop,” Tese de Doutoramento, DEM, UA, Aveiro, 2003.
- [15] W. Borutzky, B. Barnard, e J. Thoma, “An orifice flow model for laminar and turbulent conditions,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 10, nº3-4, pp. 141–152, 2002. [Online]. Disponível: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X02000928>
- [16] W. Alpha, “Circular Segment,” 2016. [Online]. Disponível: <http://mathworld.wolfram.com/CircularSegment.html>
- [17] C. P. De Souza e M. B. Wanderley, “Conversion from geometrical to electrical model of LVDT,” *16th IMEKO TC4 Int. Symp.: Exploring New Frontiers of Instrum. and Methods for Electrical and Electronic Measurements; 13th TC21 Int. Workshop on ADC Modelling and Testing - Joint Session, Proc.*, pp. 542–547, 2008. [Online]. Disponível: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84883651308&partnerID=tZOtx3y1>
- [18] G. Y. Tian, Z. X. Zhao, R. W. Baines, e N. Zhang, “Computational algorithms for linear variable differential transformers (lvdt),” *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 144, nº 4, pp. 189–192, Jul 1997.
- [19] N. Cheung, K. Lim, e M. Rahman, “Modelling a linear and limited travel solenoid,” *Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, vol. 3, nº 2, pp. 1567–1572, 1993. [Online]. Disponível: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=339304>
- [20] S. Lunge, S. Kurode, e M. Chhibber, “Proportional Actuator from On Off Solenoid Valve using Sliding Modes,” *1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanism (iNaCoMM2013)*, pp. 1020–1027, 2013. [Online]. Disponível: <http://www.nacomm2013.org/Papers/146-inacomm2013{ }submission{ }157.pdf>

Anexos

Apêndice A

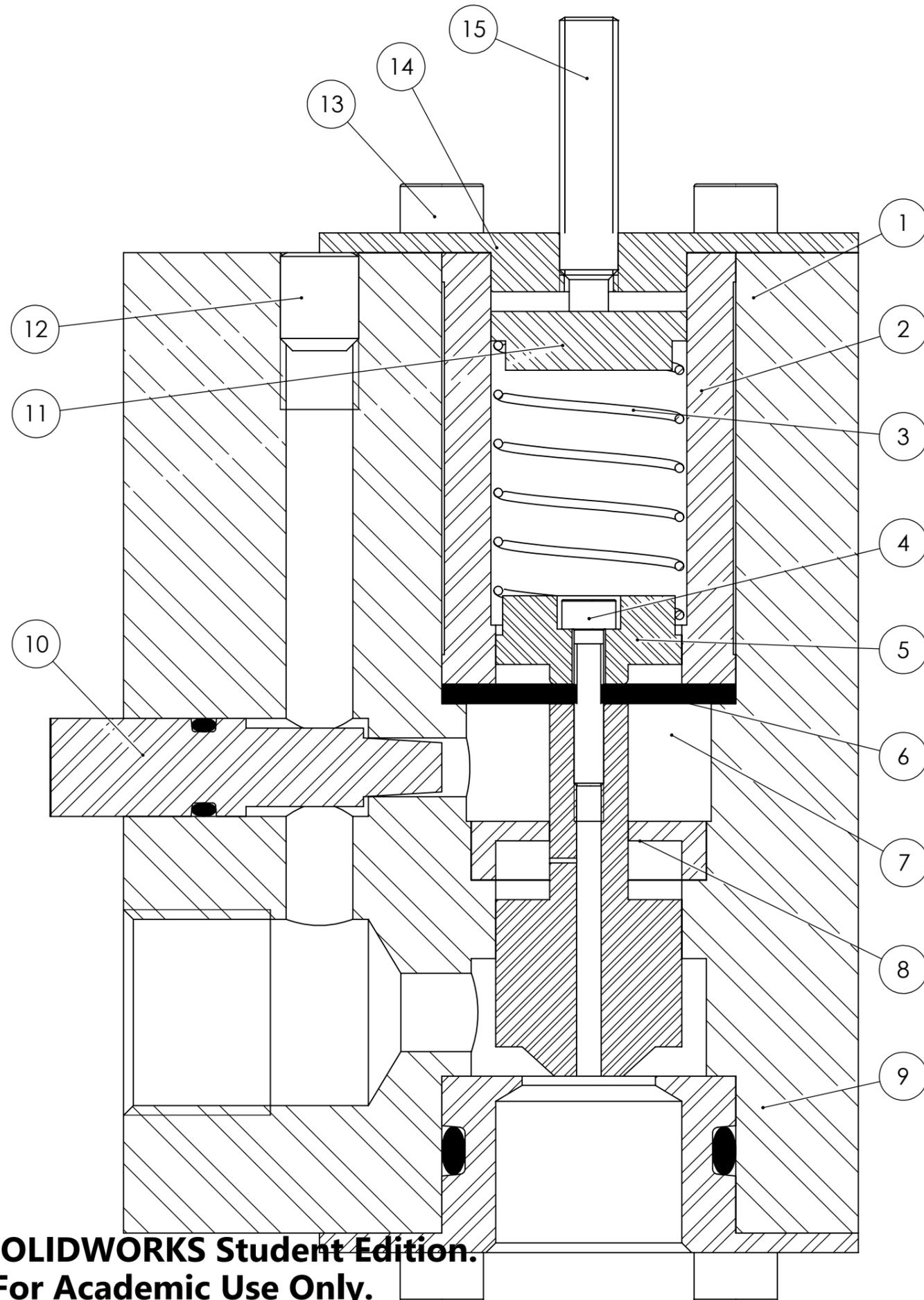
Desenhos de fabrico



ITEM NO.	PartNo	Descrição	Material	Massa	QTY.
15	-	Parafuso CHC M4x10 - ISO4762	-	-	8
14	-	Parafuso s cabeça com ponta cilíndrica rebaixada M6x30 -ISO4028	-	-	1
13	P114	Tampa da Pré-Carga	1060 Alloy	15.38	1
12	-	Parafuso s cabeça M8x12 - ISO4028	-	-	1
11	P113B	Tampa de Saída	1060 Alloy	26.95	1
10	P110	Corpo da Válvula	1060 Alloy	911.16	1
9	P118	Órgão de Pilotagem	1060 Alloy	6.14	1
8	P112A	Órgão Regulador - Lado 1	1060 Alloy	14.39	1
7	P113A	Casquilho de Fuga	1060 Alloy	3.99	1
6	-	Membrana de Vedação	Rubber	1.40	1
5	P113C	Casquilho de Guiamento	1060 Alloy	44.75	1
4	P112B	Órgão Regulador - Lado 2	1060 Alloy	4.75	1
3	-	Parafuso CHC M3x16 - ISO4762	-	-	1
2	-	Mola de Compressão	AISI 1015 Steel, Cold Drawn (SS)	1.73	1
1	P115	Casquilho de Pré Carga	1060 Alloy	4.38	1

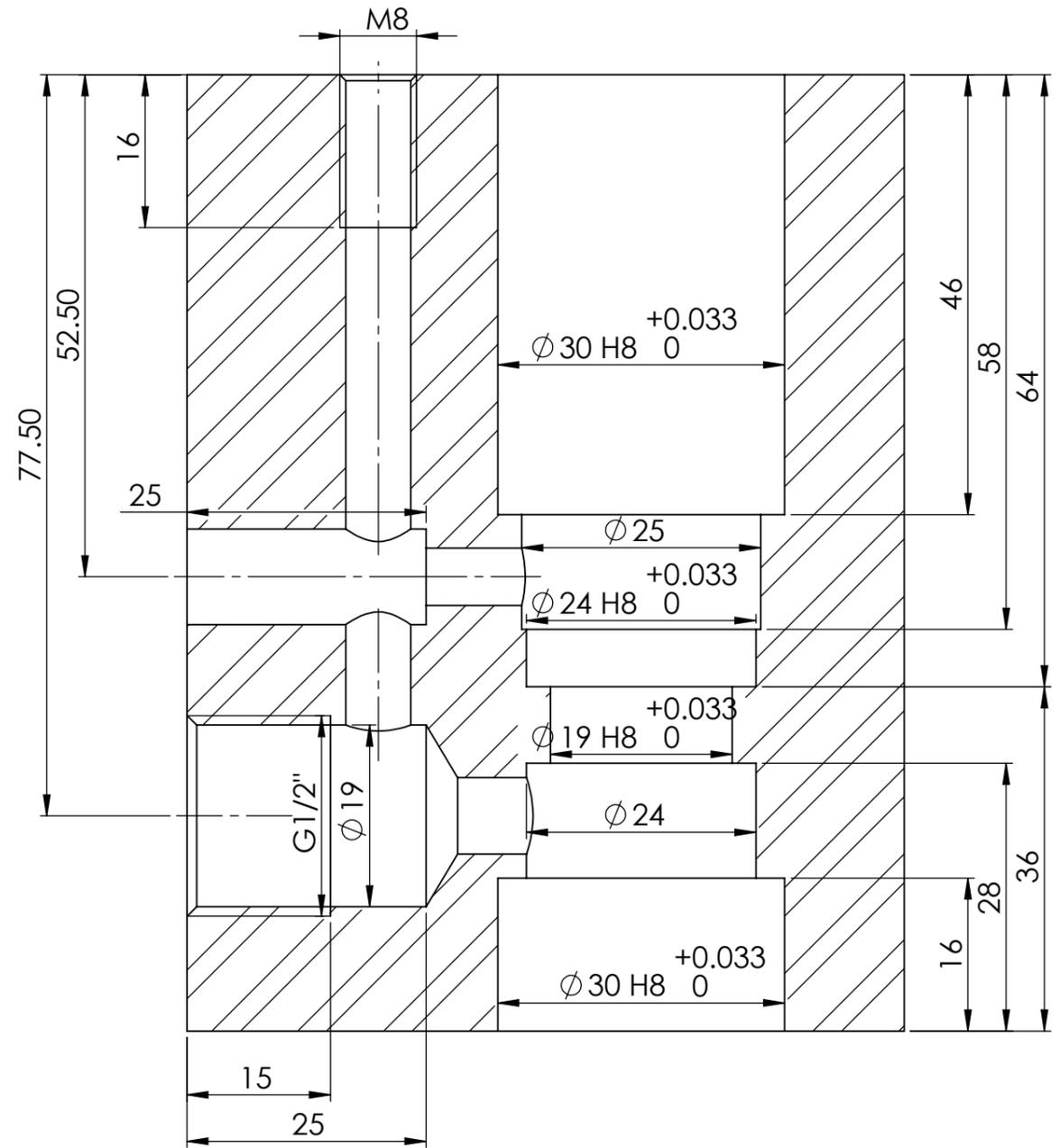
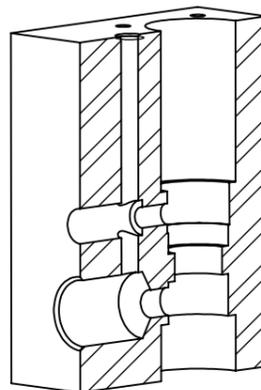
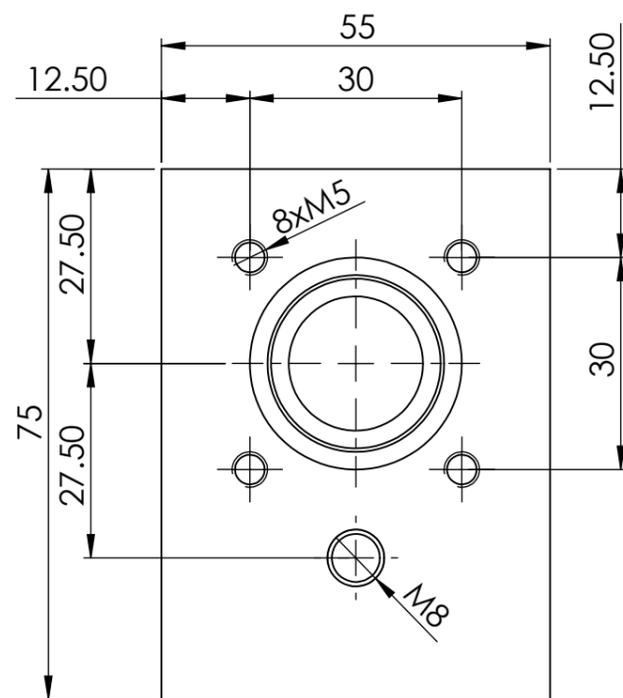
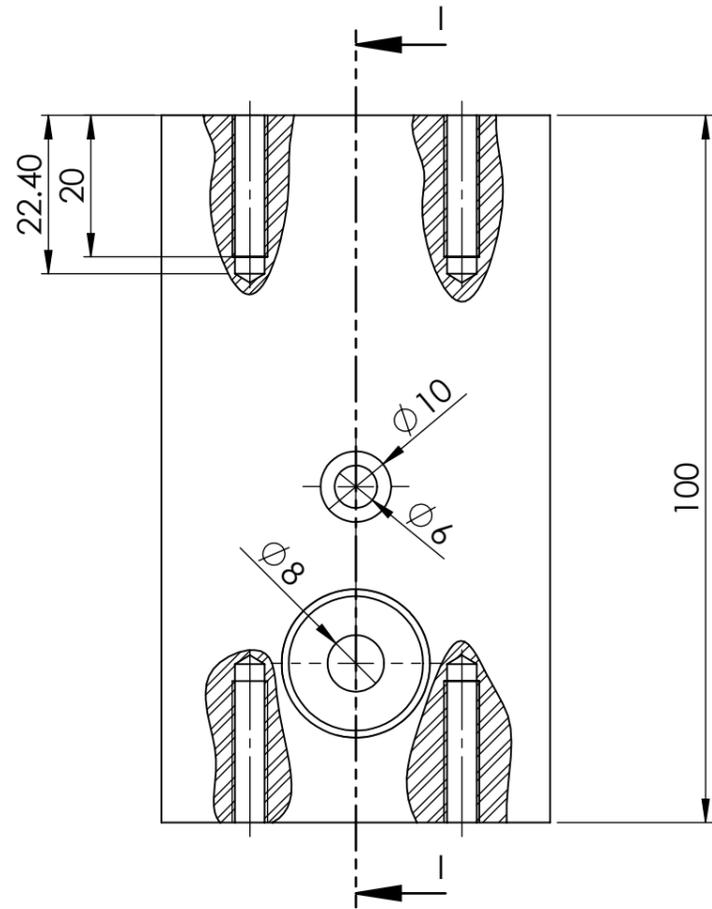
		Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica		DESENHO Nº Des. Explodida	REVISÃO: 3
NOME PAULO SOARES	DATA 11-05-2016	CLIENTE:		TÍTULO: Válvula Proporcional 4-2-B	
DESENHOU PAULO SOARES	VERIFICOU -	PROJECTO: P_Valve		A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa	
APROVOU -		MATERIAL: Alumínio		ESCALA: 1:2	
TOLERÂNCIAS GERAIS: ISO 2768 m-K		PESO: 1041.45		FOLHA 1/13	

**SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.**



15	-	Parafuso s cabeça com ponta cilíndrica rebaixada M6x30 - ISO4028	-	-	1
14	P114	Tampa da Pré-Carga	1060 Alloy	15.38	1
13	-	Parafuso M5x16 - ISO4762	-	-	8
12	-	Parafuso M8x12 - ISO4762	-	-	1
11	P115	Casquilho de Pré Carga	1060 Alloy	4.38	1
10	P118	Órgão de Pilotagem	1060 Alloy	6.14	1
9	P113B	Tampa de Saída	1060 Alloy	26.95	1
8	P113A	Casquilho de Fuga	1060 Alloy	3.99	1
7	P112A	Órgão Regulador - Lado 1	1060 Alloy	14.39	1
6	-	Membrana de Vedação	Rubber	1.40	1
5	P112B	Órgão Regulador - Lado 2	1060 Alloy	4.75	1
4	-	Parafuso CHC M3x16 - ISO4762	-	-	1
3	-	Mola de Compressão	AISI 1015 Steel, Cold Drawn (SS)	1.73	1
2	P113C	Casquilho de Guiamento	1060 Alloy	44.75	1
1	P110	Corpo da Válvula	1060 Alloy	911.16	1
ITEM NO.	PartNo	Descrição	Material	Massa	QTY.
 Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			DESENHO Nº	Des. Conjunto	
					REVISÃO: 3
NOME		DATA	CLIENTE:		
DESENHOU Paulo Soares		11-05-2016			
VERIFICOU			PROJECTO:		
APROVOU			P_Valve		
TOLERÂNCIAS GERAIS:		MATERIAL:			
ISO 2768 m-K		Alumínio			
		PESO: 1041.45	ESCALA: 2:1	FOLHA 2/13	
A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa					

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.



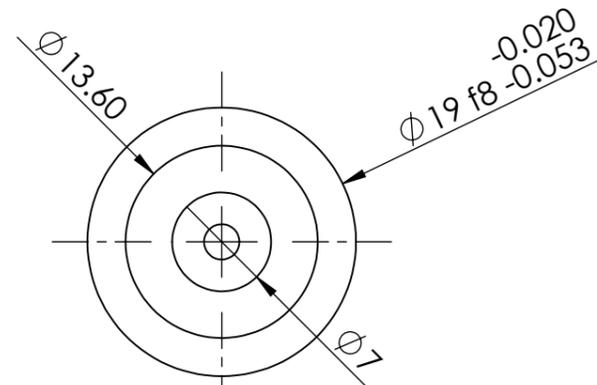
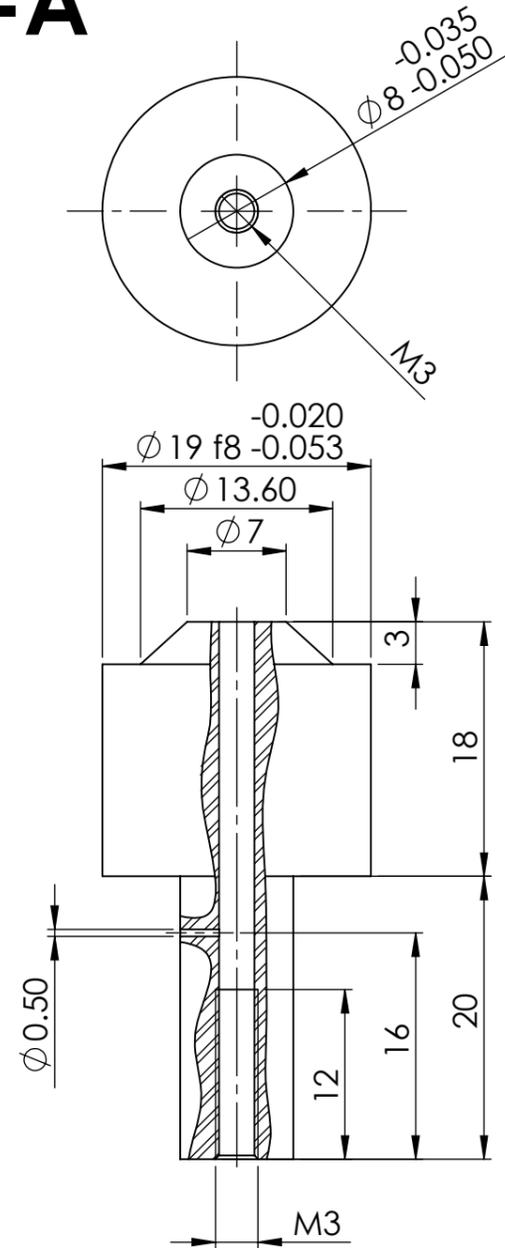
CORTE I-I
ESCALA 3:2

**SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.**

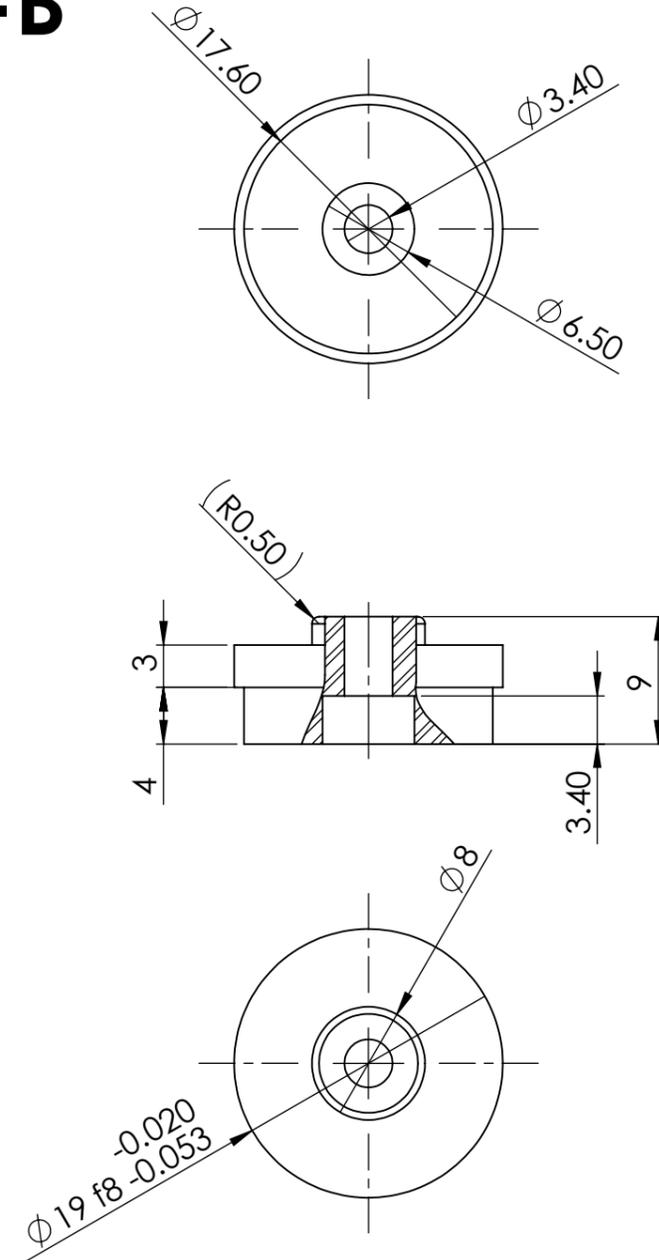
 Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			DESENHO Nº P110	REVISÃO: 3
NOME DESENHOU Paulo Soares	DATA 22-04-2016	CLIENTE: -		TÍTULO: Corpo da Válvula
VERIFICOU -	APROVOU -	PROJECTO: P_Valve		
TOLERÂNCIAS GERAIS: ISO 2768 m-K		MATERIAL: Alumínio		
		PESO: 911.16	ESCALA: 1:1	FOLHA 6/13

A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa

P112-A

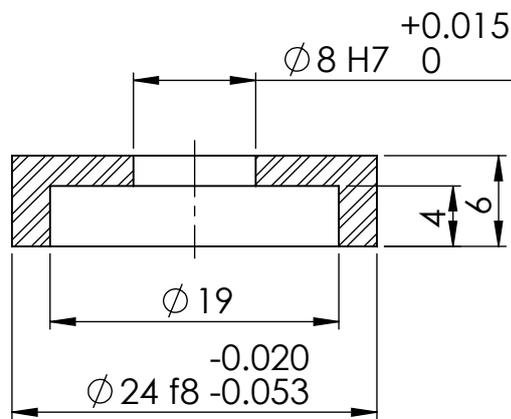
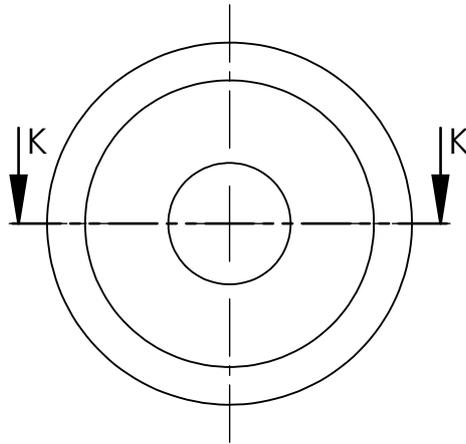


P112-B



**SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.**

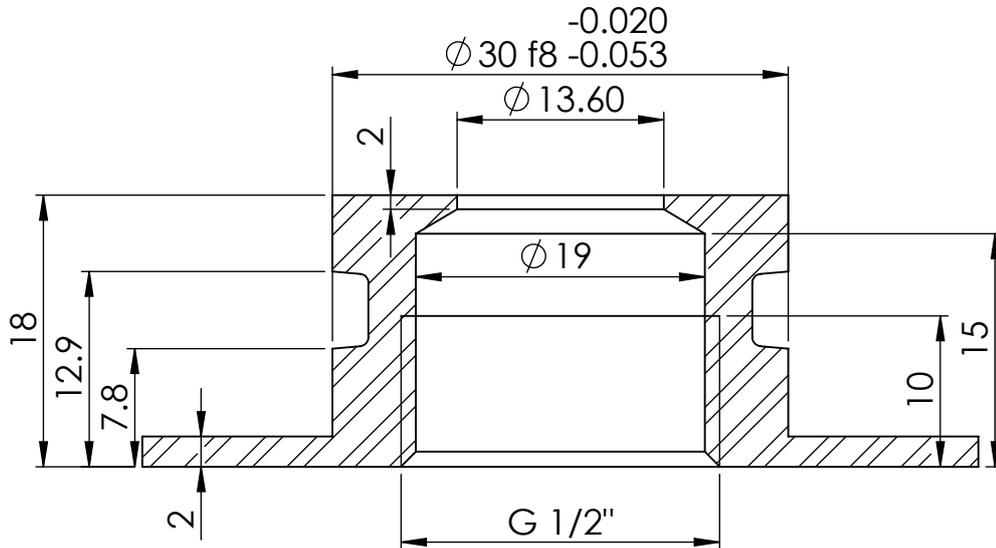
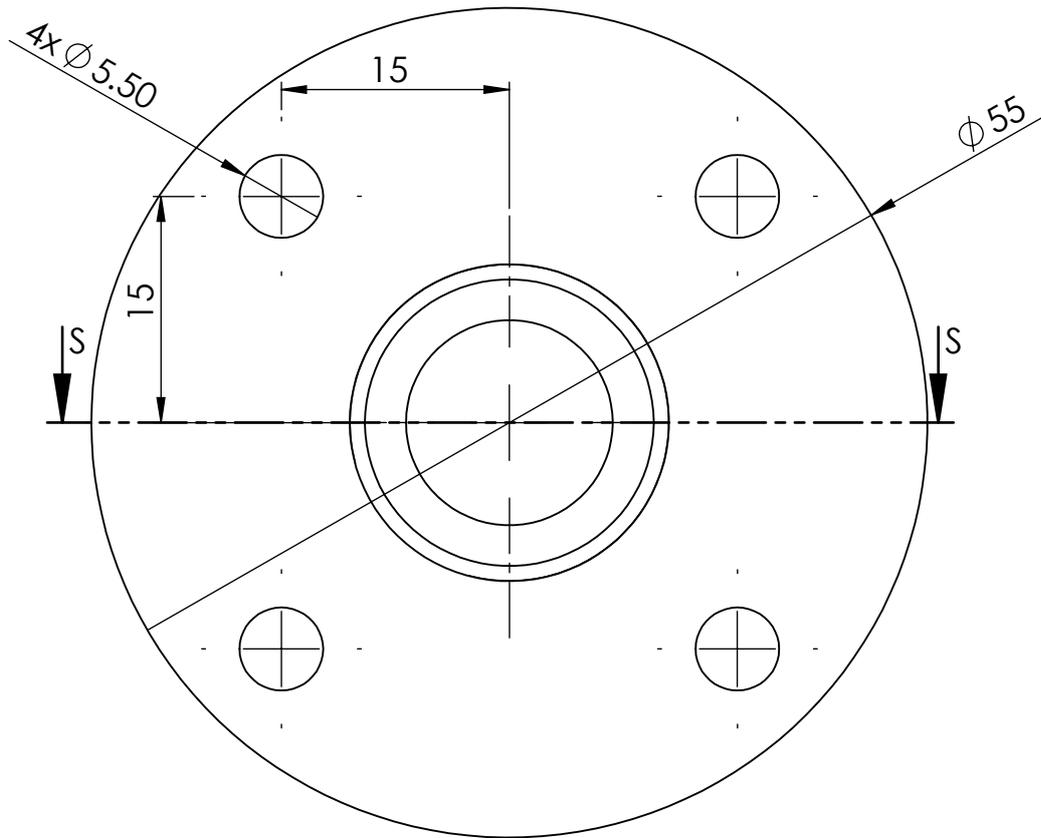
 Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			DESENHO Nº P112-A/B	REVISÃO: 3
DESENHOU Paulo Soares	DATA 	CLIENTE: -	TÍTULO: Órgão Regulador - Lado 1	
VERIFICOU -	DATA -	PROJECTO: P_Valve	A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa	
TOLERÂNCIAS GERAIS: ISO 2768 m-K		MATERIAL: Alumínio	ESCALA: 2:1	FOLHA 7/13
PESO: 14,39				



CORTE K-K

 Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica			DESENHO Nº P113-A	REVISÃO: 3
NOME Paulo Soares	DATA 26-04-2016	CLIENTE: -	TÍTULO: Casquilho de Fuga	
DESENHO	VERIFICOU	PROJECTO: P_Valve		
TOLERÂNCIAS GERAIS: ISO2768 -mK			A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa	
MATERIAL: Alumínio			ESCALA: 2:1	FOLHA 8/13
PESO: 3.99				

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.



CORTE S-S



Universidade de Aveiro
Departamento de
Engenharia Mecânica

DESENHO Nº

P113-B

REVISÃO:

3

	NOME	DATA	CLIENTE:
DESENHOU	Paulo Soares	04-05-2016	-
VERIFICOU			PROJECTO:
APROVOU			P_Valve
TOLERÂNCIAS GERAIS:			MATERIAL:
ISO2768 -mK			Alumínio

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

TÍTULO:

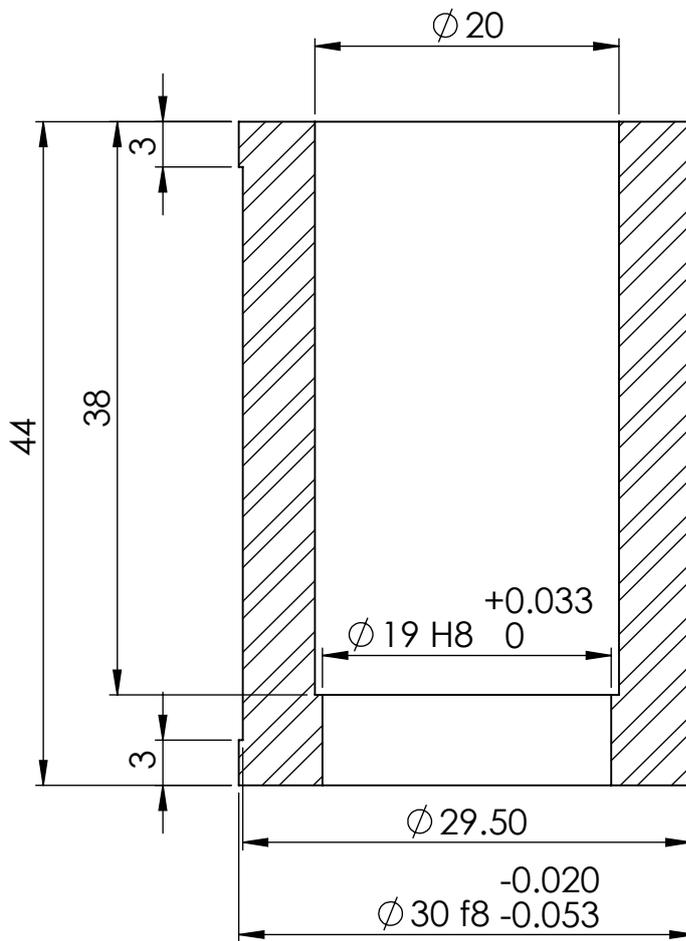
Tampa de Saída

A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa

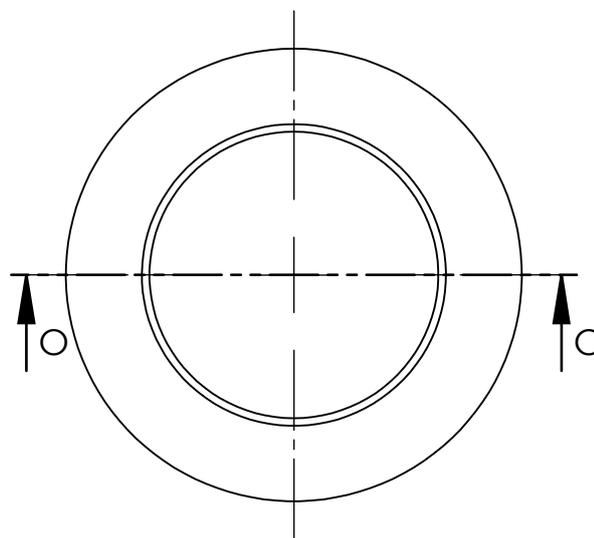
PESO: 26.95

ESCALA: 2:1

FOLHA 9/13



CORTE O-O



Universidade de Aveiro
Departamento de
Engenharia Mecânica

DESENHO Nº

P113-C

REVISÃO:

3

	NOME	DATA	CLIENTE:
DESENHOU	Paulo Soares	10-05-2016	-
VERIFICOU			PROJECTO:
APROVOU			P_Valve
TOLERÂNCIAS GERAIS:		MATERIAL:	
ISO2768 -mK		Alumínio	

TÍTULO:

Casquilho de Guiamento

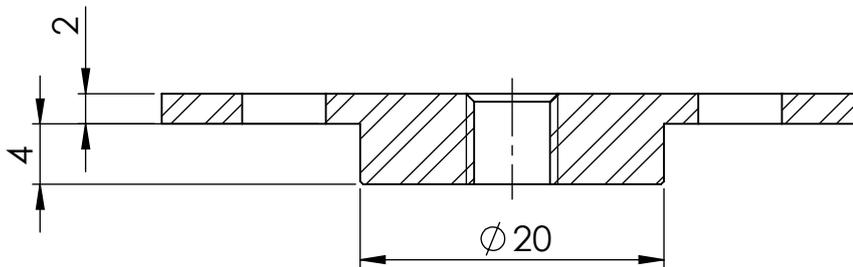
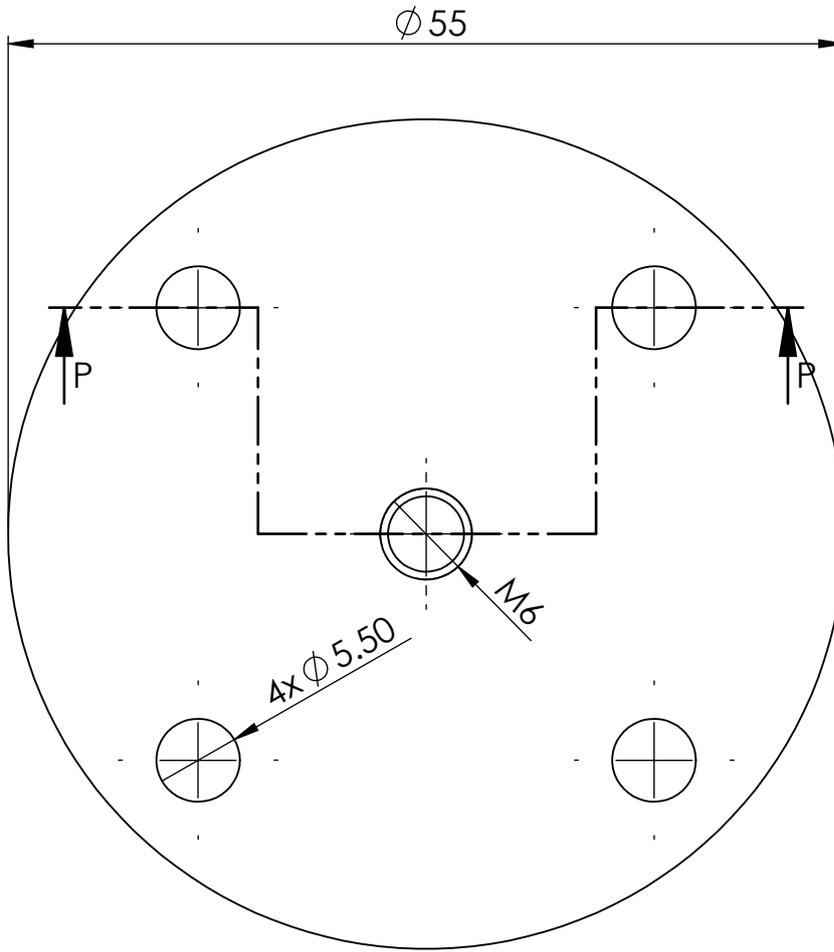
SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa

PESO: 44,75

ESCALA: 2:1

FOLHA 10/13



CORTE P-P



Universidade de Aveiro
Departamento de
Engenharia Mecânica

DESENHO Nº

P114

REVISÃO:

3

	NOME	DATA	CLIENTE:
DESENHOU	Paulo Soares	26-04-2016	-
VERIFICOU			PROJECTO:
APROVOU			P_Valve
TOLERÂNCIAS GERAIS:			MATERIAL:
ISO2768 -mK			Alumínio

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

TÍTULO:

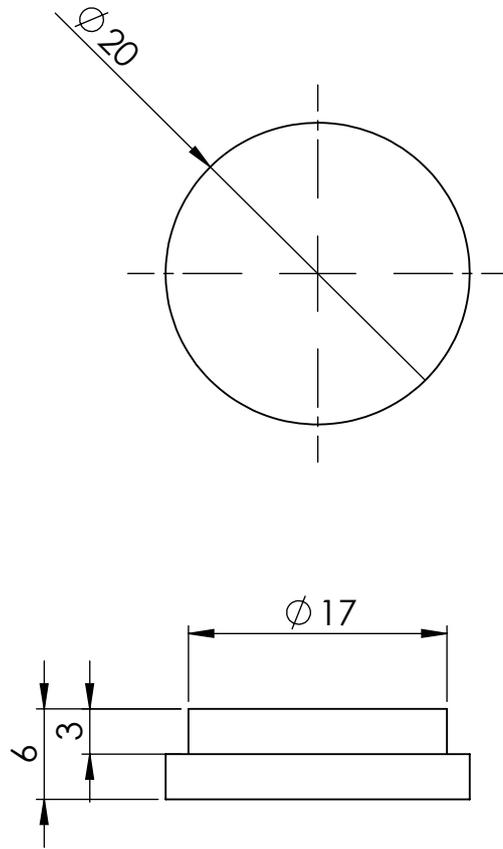
Tampa da Pré-Carga

A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa

PESO: 15.38

ESCALA: 2:1

FOLHA 11/13



Universidade de Aveiro
Departamento de
Engenharia Mecânica

DESENHO Nº

P115

REVISÃO:

3

	NOME	DATA	CLIENTE:
DESENHOU	Paulo Soares	26-04-2016	-
VERIFICOU			PROJECTO:
APROVOU			P_Valve
TOLERÂNCIAS GERAIS:			MATERIAL:
ISO2768 -mK			Alumínio
PESO: 4.38			

TÍTULO:

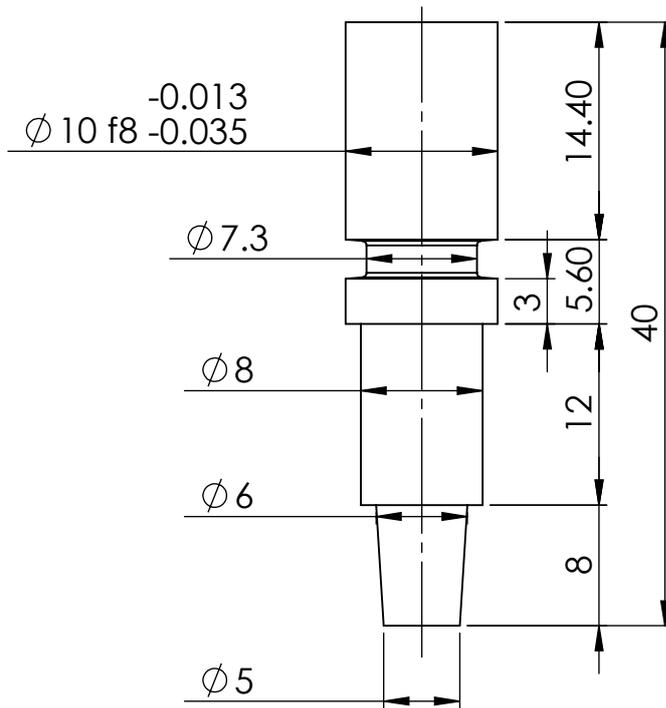
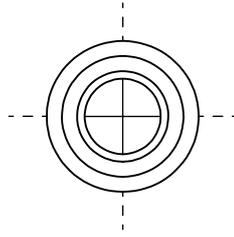
Casquilho de Pré Carga

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa

ESCALA: 2:1

FOLHA 12/13



Universidade de Aveiro
Departamento de
Engenharia Mecânica

DESENHO Nº

P118

REVISÃO:

3

	NOME	DATA	CLIENTE:
DESENHOU	Paulo Soares	05-05-2016	-
VERIFICOU			PROJECTO:
APROVOU			P_Valve
TOLERÂNCIAS GERAIS:			MATERIAL:
ISO2768 -mK			Alumínio

TÍTULO:

Órgão de Pilotagem

SOLIDWORKS Student Edition.
For Academic Use Only.

A Universidade de Aveiro reserva o seu direito de autoria sobre a informação contida no desenho, não podendo a mesma ser copiada, utilizada para fabricação ou para outros fins sem a sua permissão expressa

PESO: 6.14

ESCALA: 2:1

FOLHA 13/13