

**Estudo e desenvolvimento de uma válvula
para controlo de líquidos**

Francisco de Borja Serafim Pinto Rua

Dissertação

Orientadores:

Prof. Manuel Rodrigues Quintas

Eng.º Jorge Manuel de Matos Reis



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Ramo de Automação Industrial

Setembro 2014

Resumo

Como consequência da evolução tecnológica verificada nos últimos anos, tem-se vindo a constatar uma necessidade de otimização de tarefas do quotidiano, nomeadamente, através da sua automatização.

Na presente dissertação pretende-se ir de encontro a esta necessidade através do desenvolvimento de uma válvula para controlo de líquidos, de forma a poder ser implementada numa máquina extratora de sumo de laranja. O objetivo final deste trabalho consiste na obtenção de uma válvula capaz de fazer uma leitura da temperatura e do caudal do escoamento, de forma a otimizar o sistema de doseamento da máquina. A válvula desenvolvida deverá ainda possibilitar a escolha do seu estado inicial (normalmente aberta ou normalmente fechada), e a capacidade de ser utilizada como válvula proporcional

O ponto de partida para a realização deste trabalho foi uma válvula de gaveta rotativa, concebida numa dissertação anterior, para a qual foi desenvolvido um sistema de acionamento elétrico baseado na utilização de microcontroladores. Numa fase inicial foi desenvolvido um circuito eletrónico numa placa de testes por forma a testar todos os componentes a implementar no sistema de atuação, sendo posteriormente desenvolvidas placas de circuitos impresso com o objetivo de implementar a eletrónica num protótipo final.

Paralelamente ao desenvolvimento do sistema de atuação, foi também idealizado, e posteriormente concebido, um transdutor de caudal baseado na utilização de um sensor de imagem capaz de detetar o deslocamento de partículas no interior do fluido.

Foram ainda desenvolvidos dois protótipos, um para implementar o sistema de atuação na válvula existente, e outro para implementação da solução idealizada para o transdutor de caudal, sendo posteriormente produzidos por intermédio de uma impressores 3D.

Por fim, foi desenvolvido um programa para a atuação da válvula, de forma a satisfazer os requisitos propostos, baseado na utilização de microcontroladores. A solução utilizada para a interface com o utilizador feita através de um teclado alfanumérico e de um *display* LCD.

Study and development of a valve for fluids control

Abstract

As a result of technological developments made in the recent past, there has been a need for optimizations in order to ease the daily life tasks through automation of these tasks.

In the present thesis it is intended to meet this need by developing a valve for fluids control in order to be part of the total system and implemented in an orange juice extracting machine. The ultimate goal of this work is to obtain a valve that can be able of reading the temperature and the flow of the fluid in order to optimize the dosing system of the machine. There should be also the possibility to choose the initial state of the valve (normally open or normally closed), and the ability for the valve to be used as a proportional valve.

The starting point for this thesis was a valve, developed in a previous thesis, for which an electric drive system based on the use of microcontrollers was developed. In an initial stage an electronic circuit was developed on a breadboard in order to test all the electric components used in the final prototype. Later there has been developed printed circuit boards, so that the electronic components could be implemented for the final prototype.

Parallel to the development of the actuation system there was also developed a flowmeter based on the use of an image sensor capable of sensing displacement of particles within the fluid.

There were also two prototypes developed, one to implement the electronic project in the existing valve, and another to implement the idealized solution for the flowmeter, and subsequently using parts produced by a commercially available 3D printer Kit

Finally, a program has been developed in order to meet the proposed requirements. The user interface was made through an alphanumeric keypad and a LCD display.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de deixar uma nota de agradecimento aos meus orientadores da dissertação, Prof. Eng. Manuel Rodrigues Quintas e Eng. Jorge Manuel Reis pelo conhecimento transmitido assim como pela dedicação, apoio e disponibilidade oferecido ao longo da dissertação.

Agradeço também aos meus amigos que me acompanharam ao longo deste últimos cinco anos de estudos, dos quais destaco o Rafael Tavares, o Fernando Carneiro, o Pedro Sousa e o Jorge Silva, com os quais partilhei os desenvolvimentos efetuados nesta dissertação, por todo o apoio e camaradagem ao longo desta etapa da minha vida.

Num registo mais pessoal, deixo também grande agradecimento a toda a minha família pelo apoio incondicional e incentivo demonstrado no decorrer da minha vida académica, e ainda à minha namorada Eduarda Dias pela paciência, compreensão, apoio e companheirismo ao longo da realização da dissertação.

Índice de Conteúdos

1	Introdução geral e objetivos	1
1.1	Introdução	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Estrutura da dissertação.....	2
2	Estado da arte	5
2.1	Contextualização	5
2.2	Situação de Partida.....	6
2.2.1	Modo de funcionamento.....	7
2.2.2	Projeto eletrónico	8
2.3	Medição de Temperatura	9
2.3.1	Termopares	11
2.3.2	Termómetros de Resistência	16
2.3.2.1	Termo-resistências Metálicas.....	17
2.3.2.2	Termístores.....	21
2.4	Medição de Caudal	22
2.4.1	Transdutores invasivos	23
2.4.1.1	Transdutores Mecânicos.....	23
2.4.1.2	Transdutores baseados na pressão	26
2.4.2	Transdutores não invasivos	28
2.4.2.1	Transdutor de Ultra-som	28
2.4.2.2	Laser Doppler Velocimeter (LDV).....	29
2.5	Conclusão	31
3	Projeto mecânico	33
3.1	Introdução.....	33
3.2	Atuação da Válvula	35
3.2.1	Ligação Válvula-Motor	37
3.2.2	Dispositivos de fim de curso.....	40
3.2.3	Leitura de posição.....	41
3.2.4	Suporte do motor e tampa	43
3.3	Transdutor de Caudal.....	45
3.3.1	Componentes e implementação.....	46
3.3.2	Implementação dos componentes.....	48

3.3.3	Montagem final.....	51
3.4	Conclusão	53
4	Projeto eletrónico	55
4.1	Introdução	55
4.2	Microcontroladores.....	58
4.2.1	Escolhas efetuadas	59
4.2.1.1	Módulo de atuação e controlo.....	59
4.2.1.2	Módulo de monitorização e comando.....	60
4.2.2	Comunicação SPI	61
4.3	Atuação e controlo.....	62
4.3.1	Componentes Eletrónicos.....	62
4.3.2	Funcionamento do motor	72
4.3.2.1	Atuação.....	72
4.3.2.2	Leitura de Posição e Velocidade.....	74
4.3.2.3	Controlo em malha fechada.....	76
4.4	Monitorização e comando.....	79
4.4.1	Componentes eletrónicos.....	79
4.5	Conclusão	86
5	Transdutor de Caudal.....	87
5.1	Introdução	87
5.2	Sensores de imagem.....	88
5.3	Rato ótico	90
5.4	Aplicações desenvolvidas.....	94
5.5	Implementação da ideia	94
5.5.1	Desenvolvimento do conceito.....	94
5.5.2	Sensor CMOS Utilizado.....	95
5.5.3	Características eletrónicas.....	97
5.5.4	Funcionalidade do ADNS 2610	98
5.5.5	Comunicação SPI	100
5.6	Testes.....	101
5.6.1	Testes iniciais.....	101
5.6.2	Testes de funcionamento	103
5.6.3	Implementação do protótipo	104
5.6.4	Outros desenvolvimentos.....	105

5.7 Conclusão	107
6 Desenvolvimento de Software	109
6.1 Introdução	109
6.2 Programação de um microcontrolador	110
6.3 Programa desenvolvido	111
6.3.1 Módulo de Testes	112
6.3.2 Módulo de Atuação	113
6.3.3 Modos de atuação	115
6.4 Conclusão	115
7 Conclusão e trabalhos futuros	117
7.1 Conclusão	117
7.2 Trabalhos futuros	118
8 Referências e Bibliografia	119
8.1 Bibliografia	119

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Vista explodida da válvula de gaveta rotativa [1].....	6
Figura 2.2 – Vista explodida da válvula de assento axial [1].....	6
Figura 2.3 – Suporte com sistema de a atuação [1].....	7
Figura 2.4 – Montagem final da válvula [1].....	7
Figura 2.5 – Gaveta rotativa.....	7
Figura 2.6 – Montagem da gaveta no interior da válvula.....	7
Figura 2.7 – Motor DC utilizado para atuação da gaveta[1].....	8
Figura 2.8 – <i>Micro switch</i> mecânico[1].....	8
Figura 2.9 – Circuito de atuação do motor DC [1].....	8
Figura 2.10 – Cópia do termoscópio construído por Galileo Galilei[2].....	10
Figura 2.11 - Representação do circuito de um termopar[5].....	12
Figura 2.12 – Montagem usual de um termopar[5].....	13
Figura 2.13 – Curva característica dos termopares estudados[5, 6].....	15
Figura 2.14 – Sensibilidade dos termopares[5].....	16
Figura 2.15 – Resistência em função da temperatura para um semicondutor e alguns metais [4].....	17
Figura 2.16 – Elementos de uma Termo-resistência (RTD) [5].....	17
Figura 2.17 – Configurações dos cabos de ligação de um RTD[5].....	20
Figura 2.18 – Comparação das curvas características R(T) de um RTD com um termistor[5].....	21
Figura 2.19 – Curvas características de 3 termístores PTC[5].....	22
Figura 2.20 – Esquema de funcionamento de um caudalímetro de pistões[7].....	24
Figura 2.21 – Esquema de funcionamento de um caudalímetro de engrenagens [7].....	24

Figura 2.22 – Esquema representativo do funcionamento de um rotâmetro [8]	25
Figura 2.23 – Esquema de funcionamento de um tubo de Venturi[8].....	26
Figura 2.24 – Esquema de funcionamento de ma placa orifício[8]	27
Figura 2.25 – Variantes do tubo de Pitot para medição da pressão (total, estática e ambas) [8].....	27
Figura 2.26 – Representaçã do funcionamento de um transdutor de ultrasom baseado no tempo de transição[8]	28
Figura 2.27 – Esquema representativo do funcionamento de um LDV[12]...	29
Figura 2.28 – Exemplo de um sinal detetado pelo fotodetector [13]	30
Figura 3.1 – Válvula utilizada sem sistema de atuação	34
Figura 3.2 – Representação 3D dos leds do dispositivo de fim de curso funcional.....	36
Figura 3.3 – Representação 3D do <i>micro switch</i> relativo ao dispositivo de fim de curso de emergência.....	36
Figura 3.4 – Representação 3D do motor DC	36
Figura 3.5 – Protótipo desenvolvido para atuação da válvula	37
Figura 3.6 – Cardan utilizado para acoplar o motor à válvula.....	38
Figura 3.7 – Vista dos componentes interiores do cardan.....	38
Figura 3.8 – Vista explodida da ligação entre o motor e o cardan.....	39
Figura 3.9 – Ligação entre o motor e o cardan.....	39
Figura 3.10 – Vista explodia da ligação entre o cardan e a válvula.....	39
Figura 3.11 – Dispositivo de fim de curso funcional atuado pela barreira entre o emissor e o recetor.....	40
Figura 3.12 – Montagem dos dispositivos de fim de curso no protótipo	41
Figura 3.13 – Representação do funcionamento do transdutor de posição angular	42

Figura 3.14 – Implementação do transdutor de posição no protótipo.....	42
Figura 3.15 – Evolução do sinal ótico com a posição angular da válvula.....	43
Figura 3.16 – Vista explodida do sistema de fixação do suporte do motor à tampa do protótipo	43
Figura 3.17 – Fixação do motor por intermédio de dois parafusos.....	44
Figura 3.18 – Abertura lateral do suporte do motor.....	44
Figura 3.19 – Fixação da tampa do protótipo à base através de conjunto parafuso/porca.....	44
Figura 3.20 – Colocação do recetor referente ao fim e curso ótico no interior da tampa.....	45
Figura 3.21 – Protótipo do transdutor de caudal desenvolvido	45
Figura 3.22 – Esquema representativo da montagem do transdutor de caudal.....	46
Figura 3.23 – Circuito impresso, com a eletrónica associada, retirado de um rato ótico.....	47
Figura 3.24 – Lente de focagem retirada de um rato ótico.....	47
Figura 3.25 – Tubo utilizado para a passagem de fluido	47
Figura 3.26 – Suporte para componentes do transdutor de caudal.....	48
Figura 3.27 – Vista em corte do suporte para componentes do transdutor de caudal	48
Figura 3.28 – Vista explodida da montagem entre o suporte e a caixa.....	49
Figura 3.29 – Vista em corte da montagem entre o suporte e a caixa	49
Figura 3.30 – Localização do tubo e o led RGB no protótipo final	50
Figura 3.31 – Localização da lente de focagem no protótipo final	50
Figura 3.32 – Localização da placa de circuito impresso no protótipo final	50
Figura 3.33 – Conexão utilizada no protótipo final.....	51

Figura 3.34 – Base do transdutor de caudal	51
Figura 3.35 – Fixação de uma conexão na base do protótipo final.....	52
Figura 3.36 – Vista explodida da montagem entre a base, a caixa da eletrónica e a tampa lateral.....	52
Figura 3.37 – Vista em corte da montagem entre a base, a caixa da eletrónica e a tampa lateral.....	53
Figura 3.38 – Transdutor de caudal desenvolvido	53
Figura 4.1 – Placa de testes utilizada para desenvolver o projeto eletrónico	55
Figura 4.2 – Arquitetura representativa da divisão dos módulos.....	56
Figura 4.3 – Placa de circuito impresso do módulo de monitorização e comando.....	57
Figura 4.4 – Placa de circuito impresso do módulo de atuação e controlo ..	57
Figura 4.5 – Projeto eletrónico final	57
Figura 4.6 – Periféricos integrados num microcontrolador[14]	58
Figura 4.7 – Ligações SPI entre Master e <i>Slave</i> [15]	61
Figura 4.8 – Encapsulamento PDIP	62
Figura 4.9 – Encapsulamento TQFP	62
Figura 4.10 – Diagrama de pinos do PIC18F4431 para o encapsulamento TQFP [16]	63
Figura 4.11 – Oscilador externo utilizado.....	65
Figura 4.12 – Diagrama de pinos do regulador de tensão MAX 667 e montagem do mesmo.....	65
Figura 4.13 – Funcionamento do dispositivo de fim de curso funcional	66
Figura 4.14 – Circuito elétrico associado ao dispositivo de fim de curso funcional.....	66
Figura 4.15 – <i>Micro switch</i> mecânico utilizado.	67

Figura 4.16 – Circuito elétrico associado ao dispositivo de fim de curso mecânico.....	67
Figura 4.17 – <i>Switch</i> mecânico utilizado para seleção do estado inicial.....	67
Figura 4.18 – Princípio de funcionamento da ponte H.....	68
Figura 4.19 – Motor DC escolhido inicialmente mas não utilizado	69
Figura 4.20 – Motor DC utilizado no protótipo final	69
Figura 4.21 – <i>Encoder</i> utilizado	69
Figura 4.22 – Transístor NPN utilizado	70
Figura 4.23 – Led RGB utilizado.....	70
Figura 4.24 – Circuito elétrico relativo à atuação do led RGB.....	71
Figura 4.25 – Display LCD utilizado.....	72
Figura 4.26 – Esquema representativo da alimentação do motor	73
Figura 4.27 - Esquema representativo do funcionamento do <i>encoder</i>	75
Figura 4.28 – Sistema a controlar	76
Figura 4.29 – Sistema controlado com controlador proporcional	77
Figura 4.30 – Sistema controlado com controlador PI-D	77
Figura 4.31 – Diagrama de pinos do PIC18F26J50 para o encapsulamento PDIP [20]	80
Figura 4.32 – Diagrama de pinos do regulador de tensão MAX 884 e montagem do mesmo.....	81
Figura 4.33 – Teclado utilizado no protótipo	81
Figura 4.34 – Esquema das ligações do teclado ao microcontrolador.....	82
Figura 4.35 – Termopar do tipo K utilizado.....	83
Figura 4.36 – MAX31855 e respetivos pinos.....	83
Figura 4.37 – Esquema representativo da implementação do MAX31855....	84

Figura 4.38 – Comunicação entre microcontrolador e transdutor de caudal.....	85
Figura 4.39 – Representação do MAX4678.....	85
Figura 5.1 – Filtro de Bayer sobreposto ao sensor [21].....	88
Figura 5.2 – Imagem original[23].....	89
Figura 5.3 – Imagem após filtro de Bayer[23].....	89
Figura 5.4 – Imagem após aplicação de algoritmos de interpolação[23]	89
Figura 5.5 – Vista explodida dos componentes de um rato ótico[24]	91
Figura 5.6 – Montagem dos componentes de um rato ótico [24].....	92
Figura 5.7 – Princípio de funcionamento de um rato ótico	92
Figura 5.8 - Representação de duas imagens consecutivas adquiridas pelo sensor CMOS[27]	93
Figura 5.9 – Esquema representativo da solução idealizada.....	95
Figura 5.10 – ADNS 2610[24]	96
Figura 5.11 – Esquema de pinos do ADNS 2610[24]	96
Figura 5.12 – Diagrama de blocos com os componentes incorporados no ADNS 2610[24]	97
Figura 5.13 – Representação da eletrónica do rato ótico [24].....	98
Figura 5.14 – Conversão dos dados disponibilizados pelo registo Delta_X[24]	99
Figura 5.15 – Tempos de espera para comunicação entre o ADNS 2610 e o microcontrolador[24]	101
Figura 5.16 – Ligações entre microcontrolador e ADNS 2610	102
Figura 5.17 – Rato ótico utilizado com as ligações ao microcontrolador ...	102
Figura 5.18 – LCD utilizado para testar o ADNS 2610	102
Figura 5.19 – Gráfico representativo da resolução do ADNS 2610	103

Figura 5.20 – Protótipo do transdutor de caudal	104
Figura 5.21 – Placa de circuito impresso desenvolvida para implementação do ADNS02610	105
Figura 5.22 – Foto da placa desenvolvida.....	105
Figura 5.23 – Matriz ordenada com os pixéis obtidos através do registo Pixel Data.....	106
Figura 5.24 – Foto obtida com o sensor sobre uma letra impressa numa folha branca	106
Figura 5.25 – Imagem obtida do interior do transdutor, sem fluido no interior	106
Figura 6.1 – <i>Pickit 3</i> utilizado para programação dos microcontroladores.	110
Figura 6.2 – Montagem final.....	112
Figura 6.3 – Diagrama de estados relativo ao funcionamento do módulo de atuação	113

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Tipos de termopares e gamas de medição[5, 6]	14
Tabela 4.1 – Utilização dos pinos do PIC18F4431	64
Tabela 4.2 – Valores da tensão aplicada do motor em função do <i>duty cycle</i> do PWM definido	73
Tabela 4.3 – Utilização dos pinos do PIC18F26J50.....	80
Tabela 5.1 – Registos existentes no ADNS 2610[24]	99

1 Introdução geral e objetivos

1.1 Introdução

Como consequência da evolução que se tem vindo a observar ao longo dos últimos anos, no sector tecnológico e de forma exponencial, verifica-se que a palavra “automatizar” começa a fazer cada vez mais sentido fora do ambiente industrial. Por outras palavras, embora exista uma forte ligação entre a automação e a indústria (processos de produção), cada vez mais se nota a gradual inserção e utilização da automação nas tarefas do quotidiano.

A máquina extratora do sumo da laranja é um excelente exemplo de integração entre a automação e o quotidiano das pessoas. Uma tarefa que inicialmente teria de ser feita de forma manual, por via do esmagamento da laranja, hoje em dia pode ser feito de forma totalmente automática.

No entanto, para além da automatização destes processos, nomeadamente da extração do sumo da laranja, surge também uma necessidade natural, da criação de novas funcionalidades que permitam tornar o sistema autónomo o mais completo possível, ou seja, realizar o processo de extração do sumo de forma automática parece já não ser suficiente, o que leva a ter em conta outros parâmetros, como a temperatura do sumo ou o volume pretendido, por forma a obter uma melhor otimização de todo o processo.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação visa o desenvolvimento de uma válvula 2/2 para controlo de líquidos, de forma a poder ser implementada numa máquina extratora de sumo de laranja desenvolvida numa dissertação anterior, devendo esta satisfazer os seguintes requisitos:

- Possibilidade de escolha do estado inicial da válvula (estado de repouso). Uma vez que se trata de uma válvula de 2 orifícios e 2 posições, tem de ser possível definir se inicialmente esta se encontra normalmente aberta ou normalmente fechada;
- Acionamento elétrico por intermédio de um motor DC, viabilizando a possibilidade de evolução para uma válvula proporcional;
- Implementação de transdutores de caudal e temperatura de forma a possibilitar a leitura destes parâmetros;
- Implementação do controlo e monitorização baseado em microcontroladores.

No entanto, para além dos objetivos enumerados acima, foi proposto também, como um desafio extra, o desenvolvimento de um transdutor de caudal baseado num princípio de funcionamento inovador.

1.3 Estrutura da dissertação

Para além do presente capítulo onde é feita uma primeira introdução ao trabalho desenvolvido, este documento encontra-se dividido em oito capítulos, sendo as temáticas abordadas em cada um apresentadas de seguida.

O próximo capítulo (capítulo 2) denominado “Estado da Arte” tem como principal função fazer uma contextualização do trabalho realizado, assim como, do estudo e investigação feitas, nomeadamente, no que diz respeito a transdutores de temperatura e caudal, de forma a possibilitar uma escolha fundamentada dos transdutores a implementar.

No capítulo 3, intitulado de “Projeto Mecânico”, são apresentados os protótipos desenvolvidos para o sistema de atuação e para o transdutor de caudal, recorrendo à utilização de uma Impressora 3D para a sua materialização.

O capítulo 4, referente ao “Projeto Eletrónico” retrata todos os desenvolvimentos efetuados em termos eletrónicos, referindo todos os componentes utilizados no protótipo final, assim como, o seu funcionalmente e a forma de implementação.

Também, neste capítulo é apresentada a forma utilizada para o controlo do motor que permite a utilização da válvula como uma válvula proporcional.

Em relação ao capítulo 5, denominado “Transdutor de Caudal”, surge como consequência de um desafio da criação de um novo transdutor de caudal. Neste capítulo é apresentada a solução idealizada para o desenvolvimento do transdutor, assim como os testes feitos no sentido de validar este princípio.

No capítulo 6, intitulado de “Desenvolvimento de Software”, é feita uma apresentação de forma simples e intuitiva do funcionamento do programa implementado no protótipo final.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões globais do trabalho realizado, sendo sugeridos alguns possíveis desenvolvimentos de continuidade ao trabalho realizado.

2 Estado da arte

2.1 Contextualização

Tendo o presente tema surgido como continuação de uma dissertação desenvolvida anteriormente, intitulada "*Análise e desenvolvimento de um sistema de extração de sumo de laranja por corte e esmagamento*"[1], a primeira tarefa a desenvolver passa pelo estudo e análise desse mesmo trabalho.

Tal com o título indica, o objetivo central da dissertação anterior, consistiu no desenvolvimento de um sistema de extração de sumo de laranja, por corte e esmagamento, de forma a permitir extrair o sumo e a polpa presentes nas laranjas, cumprindo os seguintes requisitos:

- Facilidade de limpeza;
- Facilidade de montagem e desmontagem por parte do utilizador;
- Facilidade de integração (sistema modular);
- Estanquicidade e proteção de todos os sistemas internos;
- Reduzida necessidade de manutenção;
- Cumprir todas as normas e certificações existentes para equipamentos que contatem com produtos alimentares[1].

Para além do desenvolvimento deste sistema, este trabalho teve também, como objetivo, a criação de um sistema de doseamento simples, eficaz, de fácil utilização e com baixo custo de produção, passando este sistema pela criação de uma válvula com as seguintes características:

- Sistema de atuação baseado em técnicas elementares;
- Funcionamento simples do tipo on/off;
- Evitar salpicos;
- Facilidade de integração (sistema modular);
- Cumprir todas as normas e certificações existentes para equipamentos em contato com produtos alimentares[1].

Na Figura 2.1 e na Figura 2.2 estão apresentados dois resultados finais do trabalho em questão no que diz respeito às válvulas desenvolvidas para o sistema de doseamento, sendo uma de assento axial e outra de gaveta rotativa.

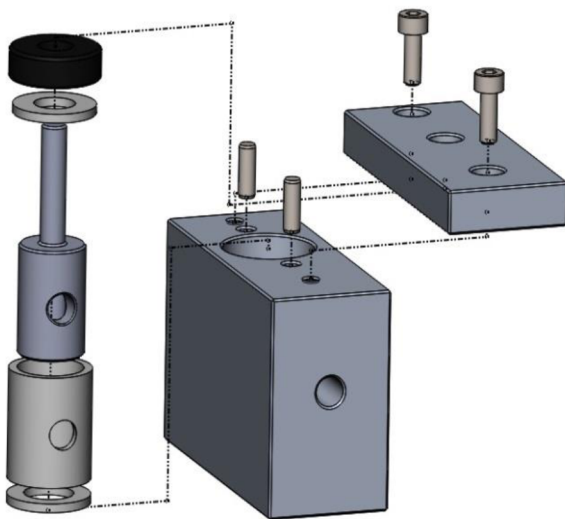


Figura 2.1 – Vista explodida da válvula de gaveta rotativa [1]

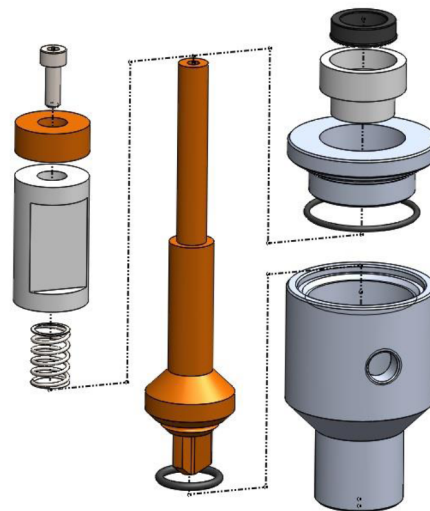


Figura 2.2 – Vista explodida da válvula de assento axial [1]

2.2 Situação de Partida

Após o enquadramento feito do trabalho desenvolvido, o ponto de partida do presente trabalho consiste na escolha de uma das válvulas já existentes e fazer um estudo de forma a entender o seu funcionamento, para que posteriormente seja possível atingir os objetivos propostos.

Tendo em conta a geometria das válvulas existentes e os sistemas de atuação, a escolha da válvula recaiu sobre a válvula de gaveta rotativa. Esta apresenta uma ge-

ometria mais simples (paralelepédica), sendo atuada diretamente no seu eixo de rotação recorrendo à utilização de um motor DC, tal como se verifica pela Figura 2.3 e pela Figura 2.4 onde se pode observar o sistema de atuação da válvula.

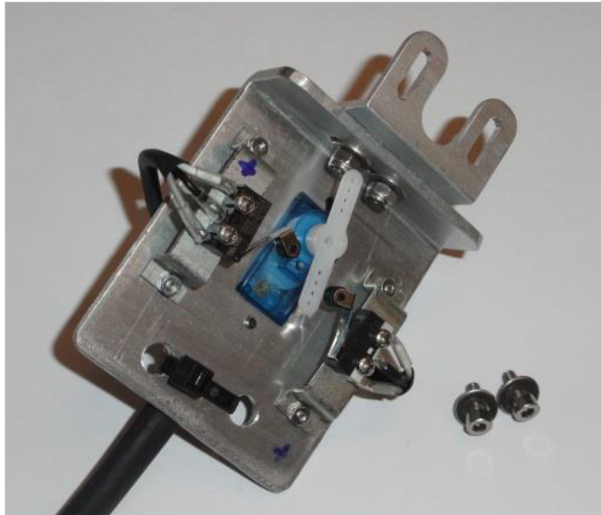


Figura 2.3 – Suporte com sistema de a atuação [1]

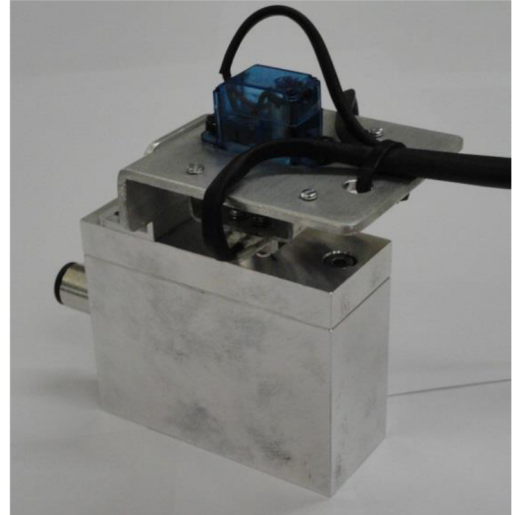


Figura 2.4 – Montagem final da válvula [1]

2.2.1 Modo de funcionamento

O princípio de funcionamento da válvula em estudo consiste na atuação de uma gaveta rotativa (Figura 2.5) colocada no interior da válvula, como representado na Figura 2.6, fazendo esta girar um ângulo de 90° , em relação à sua posição inicial, de forma a abrir/fechar a ligação entre a entrada (orifício horizontal) e a saída (orifício vertical).

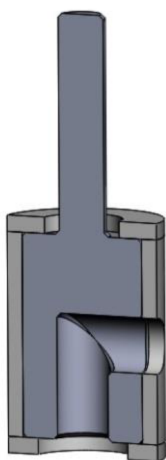


Figura 2.5 – Gaveta rotativa

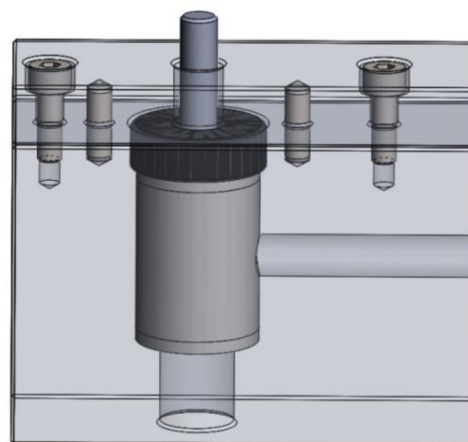


Figura 2.6 – Montagem da gaveta no interior da válvula

No que diz respeito à atuação da gaveta, tal como já referido, foi utilizado um motor DC (Figura 2.7) acoplado, diretamente na parte superior da gaveta, por intermédio de dois parafusos. De forma a garantir o posicionamento da gaveta nas posições pretendidas, foram utilizados, como dispositivos de fim de curso mecânicos, dois *micro switches* semelhantes ao representado na Figura 2.8.



Figura 2.7 – Motor DC utilizado para atuação da gaveta[1]



Figura 2.8 – *Micro switch* mecânico[1]

2.2.2 Projeto eletrónico

Na Figura 2.9 está presente um esquema representativo da montagem dos componentes utilizados para a atuação da válvula, onde para além dos componentes apresentados anteriormente, se evidencia a presença de um relé DPDT (circuito duplo com polos inversores), e ainda uma saída digital de um microcontrolador, utilizada para comandar a posição do relé.

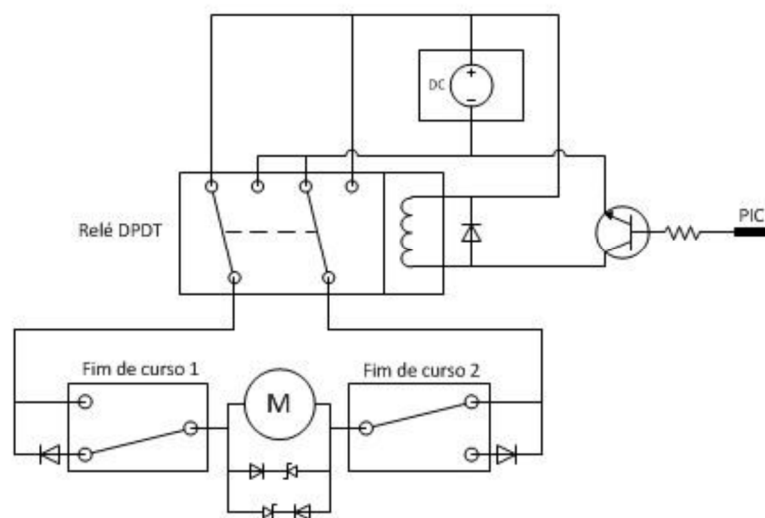


Figura 2.9 – Circuito de atuação do motor DC [1]

O sinal digital apenas tem a função de comutar o relé de forma a abrir e fechar a válvula, estando os dispositivos de fim de curso encarregues de cortar a alimentação do motor, evitando que este fique sujeito a uma sobrecarga, em caso de falha mecânica, de encravamento, de programação ou eletrónica.

2.3 Medição de Temperatura

Em termos históricos, os primeiros registos da existência da medição de temperatura datam do século II D.C., por intermédio de um médico grego, Galeano que sugeriu que as sensações de quente e frio fossem medidas com base numa escala de 8 divisões, sendo quatro acima de um ponto neutro e quatro abaixo. Nesta escala de temperatura eram atribuídos os valores de 4 graus de calor para a água fervente e 4 graus de frio para o gelo, sendo que o ponto neutro era caracterizado por uma mistura das anteriores (água a ferver e gelo) em quantidades iguais.

No que diz respeito ao primeiro transdutor de temperatura é usualmente atribuída a sua invenção a Galileo Galilei, que em 1592 colocou uma extremidade de um tubo de vidro no interior de um reservatório com álcool, sendo que, na outra extremidade colocou uma esfera de vidro, tal como ilustrado na Figura 2.10. Ao aquecer a esfera de vidro o ar no seu interior expandia-se, originando um borbulhar no reservatório com álcool, com conseqüente arrefecimento da esfera. Então verificou-se que o álcool começava a subir no interior do tubo. A partir deste momento, o nível do álcool no interior do tubo subia ou descia consoante a temperatura no interior da esfera, diminuindo ou aumentando respetivamente, criando assim o primeiro transdutor de temperatura denominado de termoscópio. [2].

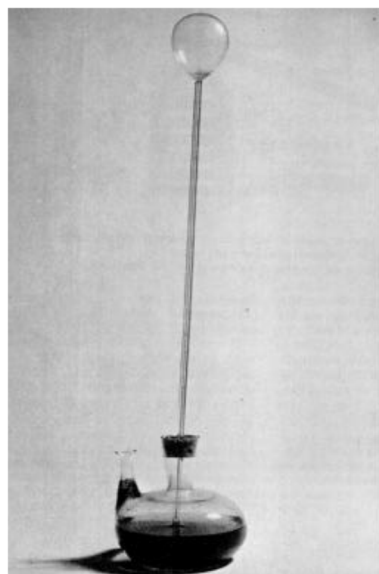


Figura 2.10 – Cópia do termoscópio construído por Galileo Galilei[2]

Após esta descoberta de Galileo foi possível a outros cientistas desenvolver este conceito, até que em 1714 Gabriel Fahrenheit construiu o primeiro termómetro de mercúrio que, apresentando uma boa precisão e uma boa repetibilidade, foi o primeiro termómetro a utilizar uma escala standard, a escala Fahrenheit. Nesta escala, os pontos de solidificação e de ebulição da água eram separados por 180 graus, atribuindo o valor de 32 graus ao gelo e de 212 graus para água fervente [3]. Em 1740, com auxílio deste instrumento, Anders Celsius propôs que os pontos de fusão e de ebulição da água fossem utilizados para definir uma escala de temperaturas, apresentando 0 graus para o ponto de ebulição e 100 graus para o ponto de fusão. Mais tarde, esta escala foi invertida, 0 graus para o ponto de fusão e 100 para o de ebulição, nascendo assim a escala centígrada, posteriormente denominada de escala Celsius.

Foi a partir deste ponto, em que começou a ser possível determinar a temperatura com grande precisão e elevada repetibilidade, que o conceito de temperatura e a sua medição começou a ter grande importância, nomeadamente em áreas como a Física e a Química. Nasceu, assim, uma necessidade de adoção de um sistema de unidades para esta grandeza física. Foi então aprovado pelo Sistema Internacional S.I. (1954) o kelvin como unidade termodinâmica de temperatura, sendo a fração de $1/273.16$ da temperatura do ponto triplo da água. No entanto, o S.I. reconhece que os valores de temperatura expressos em kelvin não são adequados para utilização no dia-

a-dia, acrescentando assim, a definição de grau Celsius, tendo em conta a equação (2.1), sendo $T(^{\circ}\text{C})$ a temperatura em graus Celsius e $T(\text{K})$ a temperatura em kelvin [2].

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (2.1)$$

A utilização de um sistema de unidades universal, aliado a termómetros precisos, nomeadamente o termómetro de mercúrio, foi o ponto de partida para o desenvolvimento dos termómetros utilizados nos dias de hoje.

Embora exista uma grande variedade de transdutores de temperatura, baseados em conceitos como a pressão de gás, dilatação de líquidos, radiação ou até mesmo baseados no efeito de Arquimedes, muitos destes transdutores não apresentam características que possibilitem uma fácil aplicação no sistema eletrónico a desenvolver.

Com base nos requisitos iniciais do protótipo a conceber, nomeadamente a possibilidade de comunicação com o sistema através de um sinal elétrico, digital ou analógico, os transdutores estudados para a implementação foram os seguintes:

- Termopares;
- Termómetros de resistência;

2.3.1 Termopares

O termopar é um dispositivo termoelétrico, composto por dois materiais diferentes, condutores ou semicondutores, que apresenta como princípio de funcionamento o efeito de Seebeck. Demonstrado por Thomas Johann Seebeck, este efeito revela que quando dois extremos de um material condutor se encontram a temperaturas distintas, aparece entre eles uma diferença de potencial proporcional à diferença de temperatura. Esta relação entre temperatura (ΔT) e potencial (ΔV) varia, consoante o material sendo a característica mais relevante o coeficiente de Seebeck do material (S), que é definida pela seguinte equação[4, 5]:

$$\Delta V = -S \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

Princípio de Funcionamento

Tal como referido, o princípio de funcionamento de um termopar tem como base o efeito Seebeck, sendo para isso utilizados dois materiais diferentes, com diferentes coeficientes de Seebeck, como Ilustrado na Figura 2.10.

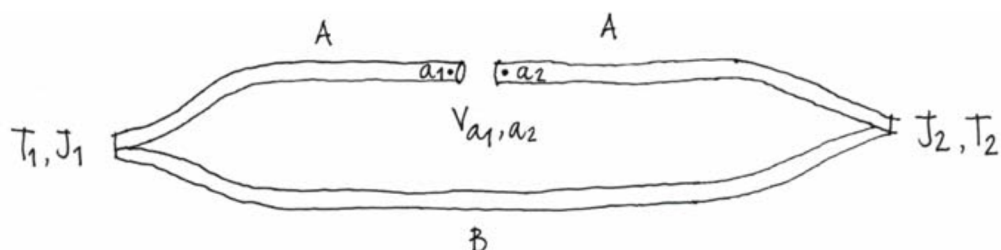


Figura 2.11 - Representação do circuito de um termopar[5]

O metal A e o metal B estão unidos, normalmente (soldados), nas suas extremidades denominadas de junção fria J_1 e junção quente J_2 . Estando estas junções sujeitas a temperaturas diferentes, na zona onde o metal B se encontra cortado (a_1, a_2) vai aparecer uma força eletromotriz V_{a_1, a_2} (f.e.m) que poderá ser lida por intermédio de um voltímetro. Para medições precisas é necessário utilizar um bom voltímetro, com elevada resolução e também elevada resistência interna, de forma a conseguir obter no circuito uma corrente de valor muitíssimo baixo e assim poder considerar desprezáveis os efeitos de Peltier e de Thomson, que descrevem o transporte de energia por calor, por intermédio de uma corrente elétrica[4].

Considerando que uma das junções se mantêm a uma temperatura constante e, conhecida T_1 , é então possível determinar qual a temperatura T_2 , da outra junção, através da leitura da f.e.m.

Normalmente, os termopares não são utilizados com um corte num dos materiais, mas sim com uma abertura numa das junções como demonstrado na Figura 2.12. Assim sendo, a temperatura T_2 da junção quente é função das características dos materiais A e B (coeficiente de Seebeck) e da temperatura T_1 (conhecida) da junção fria[4].

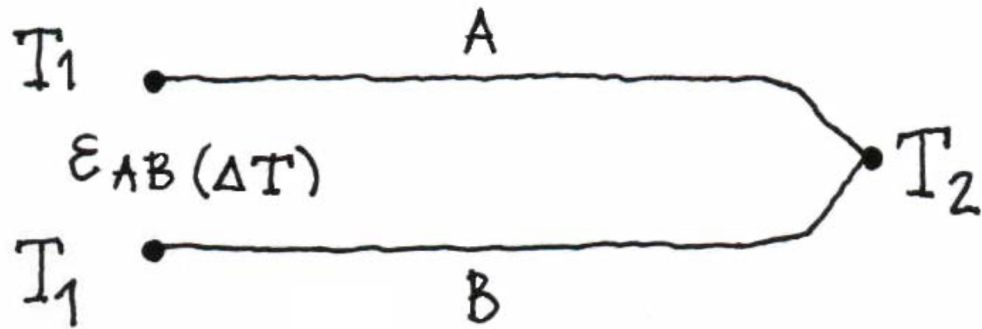


Figura 2.12 – Montagem usual de um termopar[5]

Conclui-se assim, que um termopar é um instrumento de medição ativo, uma vez que não necessita de alimentação externa, e que apresenta, como saída, uma f.e.m. proporcional a uma diferença de temperaturas, sendo portanto, necessário arranjar forma de ter uma das junções com uma temperatura bem definida, possibilitando assim, o cálculo da temperatura da outra junção.

Tipos de Termopares e suas características

Embora seja possível obter um termopar a partir de dois materiais condutores diferentes, em termos práticos a escolha destes materiais não pode ser aleatória, isto porque muitas combinações podem levar a obtenção de termopares que produzam uma f.e.m., cujo valor seja menos conveniente à sua medição.

Os diferentes tipos de termopares são então distinguidos, tendo em conta a combinação de materiais utilizados, existindo atualmente no mercado uma grande variedade de termopares, sendo os mais comuns os tipos representados na

Tabela 2.1. Nesta tabela estão, também, presentes as gamas de medição de cada tipo de termopar, representadas pelas temperaturas mínima e máxima que é possível ler, assim como, a f.e.m. respetiva. Estes valores foram obtidos tendo em conta um valor de 0°C para junção fria, sendo necessário fazer ajustes para outra temperatura de referência.

Tabela 2.1 – Tipos de termopares e gamas de medição[5, 6]

Termopar		Gama	
Materiais (A-B)	Tipo	T (°C)	f.e.m. (mV)
Cobre - Constantan	T	-164° a 350°	-5.602 a 17.816
Ferro - Constantan	M	0° a 749°	0 a 42.283
Cromel - Constantan	E	-164° a 1250°	-8.824 a 68.783
Cromel - Alumel	K	-164° a 1250°	-5.973 a 50.633
Platina(90%)/Rodio(10%) - Platina	S	0° a 1450°	0 a 14.973
Platina(87%)/Rodio(13%) - Platina	R	0° a 1768°	0 a 21.101
Nicrosil/Nisil	N	-270° a 1300°	-4.345 a 47.513

Com a análise da tabela anterior é possível verificar que as gamas de utilização dos termopares são razoavelmente extensas, no entanto, a relação entre a f.e.m. gerada nestes dispositivos e a temperatura não é linear, sendo esta relação definida por expressões polinomiais, normalmente compostas entre 8 a 14 termos. Contudo, caso a exatidão pretendida não ultrapasse o 0.1°C existem polinómios simplificados fornecidos pelo *National Physics Laboratory*.

De um modo geral, as temperaturas podem ainda ser obtidas através das tabelas normalizadas de cada um dos termopares, assim como da interpolação, dos valores tabelados.

Na Figura 2.13 estão representadas as curvas características dos termopares descritos anteriormente, apresentando a f.e.m. em função da temperatura da junção quente, tendo como referencia um valor de 0°C para a junção fria.

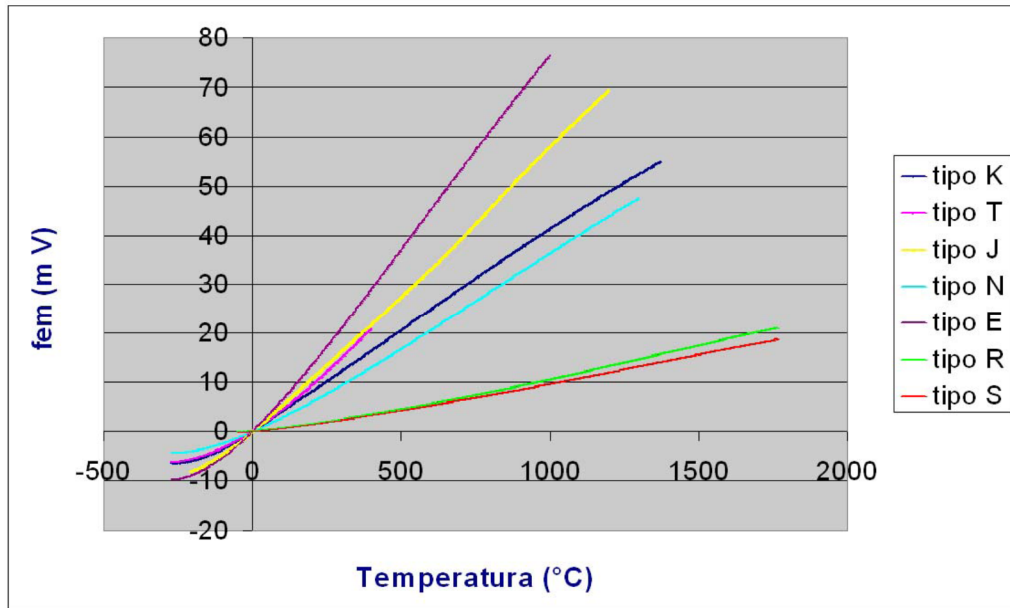


Figura 2.13 – Curva característica dos termopares estudados[5, 6]

Uma outra característica a ter em conta na escolha de um termopar é a sua sensibilidade (coeficiente de Seebeck do termopar), determinada pelo quociente entre a sua resposta (f.e.m.) e a entrada (temperatura da junção quente), como representado na seguinte equação:

$$S = \frac{dV}{dT} \quad (2.3)$$

Sendo S a sensibilidade, dV a variação da f.e.m. e dT a variação da temperatura da junção quente[5].

Pela análise da Figura 2.14 verifica-se que existem variações na sensibilidade dos diversos termopares, em função da variação da temperatura. É de realçar que o termopar do tipo K apresenta uma sensibilidade aproximadamente constante entre os 0°C e os 1000°C, com um valor rondando os 40µV/°C.

Os termopares do tipo R e S também apresentam um valor de sensibilidade relativamente constante ao longo da sua gama de medição, no entanto é uma sensibilidade 4 vezes inferior à do termopar tipo K.

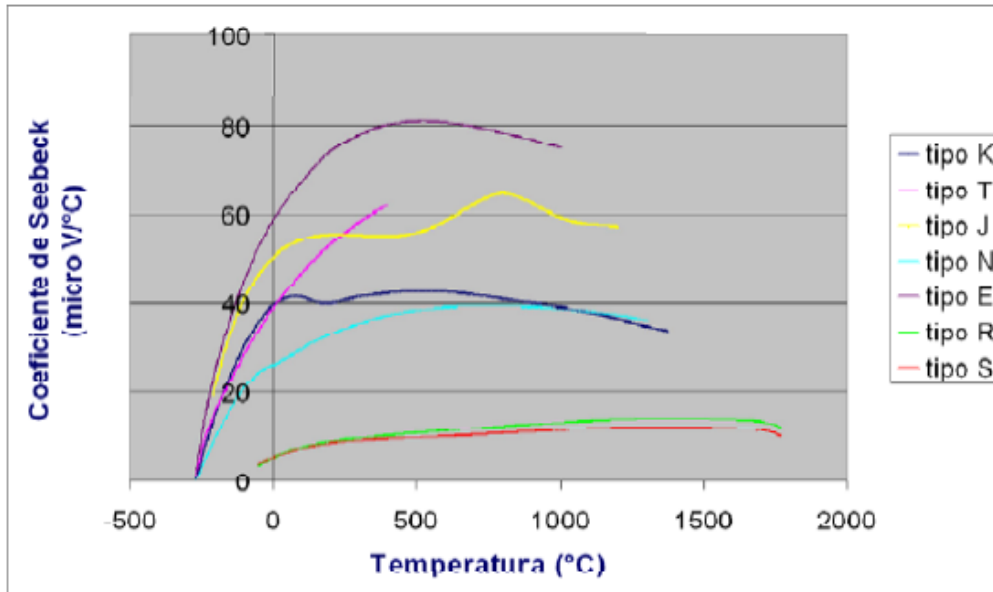


Figura 2.14 – Sensibilidade dos termopares[5]

2.3.2 Termômetros de Resistência

O termómetro de resistência, ou termo-resistência, é um transdutor de temperatura que tem como princípio de funcionamento a variação da resistência elétrica com a temperatura.

Os primeiros materiais a serem utilizados como termo-resistências foram os metais, como a platina ou o cobre, onde a resistência varia linearmente com a temperatura. Posteriormente, os materiais semicondutores também começaram a ser utilizados com base no mesmo princípio, sendo que, neste caso, a variação da resistência já não apresenta uma evolução razoavelmente linear com a temperatura, podendo esta variação ser positiva ou negativa. No caso da utilização de materiais semicondutores, estes são denominados de Termístor.

Na Figura 2.15 estão representadas as curvas da variação da resistência em função da temperatura para um material semicondutor e para alguns metais (níquel, tungsténio, cobre e platina) [4].

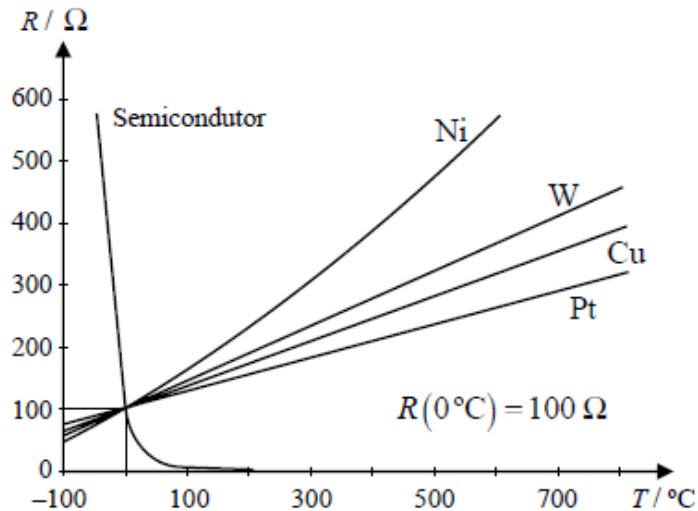


Figura 2.15 – Resistência em função da temperatura para um semicondutor e alguns metais [4]

2.3.2.1 Termo-resistências Metálicas

Uma termo-resistência do tipo metálico ou RTD's (*Resistance Temperature Detector*), é constituída por um núcleo de material isolante, normalmente cerâmica ou vidro, no qual se enrola uma resistência constituída por um fio ou por um filme metálico. Este enrolamento é colocado dentro de um encapsulamento (de vidro, cerâmico ou em aço inoxidável) como proteção contra a humidade, poeiras, vibrações, choques, etc. Numa das extremidades do encapsulamento são colocados os cabos de ligação ao exterior, tal como exemplificado na Figura 2.16 [4, 5].

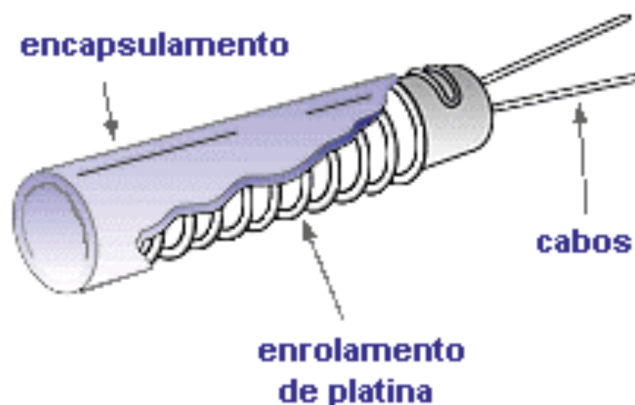


Figura 2.16 – Elementos de uma Termo-resistência (RTD) [5]

Diversos metais podem ser utilizados na construção de um RTD, contudo, a platina, o cobre e o níquel são os materiais mais utilizados atualmente, por três motivos:

- Encontram-se numa forma que se aproxima muito da sua forma pura, evitando assim, efeitos de resistência devido a impurezas;
- Apresentam uma relação entre resistência e temperatura bastante previsível;
- São fáceis de produzir em fios condutores bastante finos [5].

No entanto, de entre os três materiais enunciados, a platina é o mais utilizado atualmente no fabrico de RTD. Embora seja um material dispendioso, a platina apresenta vantagens significativas em relação aos outros materiais. Em primeiro lugar, sendo um metal nobre, apresenta uma maior estabilidade pelo facto de ser um material não reativo, numa gama extensa de temperaturas. Em segundo lugar, embora não seja inteiramente linear, apresenta uma resistividade bastante superior ao cobre e ao níquel e simultaneamente uma relação resistência/temperatura simples e bem definida. E por fim, permite uma elevada reprodutibilidade, do ponto de vista da produção, por ser possível de obter com um elevado grau de pureza[5].

Usualmente os RTDs são caracterizados de acordo com o valor da sua resistência nominal a 0°C, sendo o valor típico da platina de 100Ω para esta temperatura, levando a designação de Pt₁₀₀. Existem no entanto outros valores normalizados desde 10Ω (Pt₁₀) até alguns milhares (Pt₂₀₀₀ por exemplo).

A variação da resistência com a temperatura pode ser expressa de uma forma genérica pela seguinte equação:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n) \quad (2.4)$$

Onde R_0 é a resistência nominal (a 0°C), R_t a resistência do elemento sensor à temperatura t em °C, e a_1, a_2, \dots, a_n as constantes típicas do material do elemento sensor. No entanto, quando a utilização do RTD não exige grande exatidão, pode ser aplicada a seguinte equação:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \quad (2.5)$$

Sendo α o coeficiente de temperatura da resistência, definindo a pureza e o estado de recozimento da platina, sendo por isso bastante sensível à presença de impurezas. O valor médio de α , para uma gama de temperaturas entre os 0°C e os 100°C, pode ser obtido em função da resistência a 100°C (R_{100}) e a 0°C (R_0) através da seguinte equação [5].

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \times 100^\circ C} \quad (2.6)$$

Erros de medição

Uma vez que, o princípio de funcionamento deste tipo de transdutor se baseia na variação de resistência dos materiais, um dos principais problemas está relacionado com a introdução de resistência pelos cabos utilizados entre o RTD e o instrumento de medição/sistema de controlo.

Através da análise de uma tabela de calibração de pt₁₀₀ é possível verificar que para uma variação de temperatura entre 0°C e 10°C, corresponde uma variação de resistência aproximada de 3,9Ω. Comparado com o valor de resistência dos cabos de ligação que, dependendo do seu comprimento e do diâmetro, podem chegar às dezenas de Ω, este é um valor bastante pequeno, sendo por isso, bastante influenciável pelos cabos de medição e pela temperatura ambiente ou outras a que estes se encontrem.

Outro erro de medição associado ao RTD está relacionado com o auto-aquecimento. Este fenómeno deve-se ao facto de o elemento sensor ser percorrido por uma corrente, originando assim, um aquecimento devido a dissipação térmica por efeito Joule, levando assim o RTD a uma temperatura ligeiramente superior à temperatura do meio que o rodeia. A necessidade de ser percorrido por uma corrente deve-se ao facto de se tratar de um sensor passivo, isto é, necessita de uma fonte de alimentação (tensão ou corrente) para que o valor da resistência possa ser medido.

Atualmente existem diversas formas de minimizar estes erros associados à leitura do valor da resistência de um RTD. No caso da resistência introduzida pelos cabos de ligação, as soluções mais usuais são a utilização de vários cabos de ligação, usando configurações de 2, 3 ou 4 condutores, como representado na Figura 2.17 [4, 5].

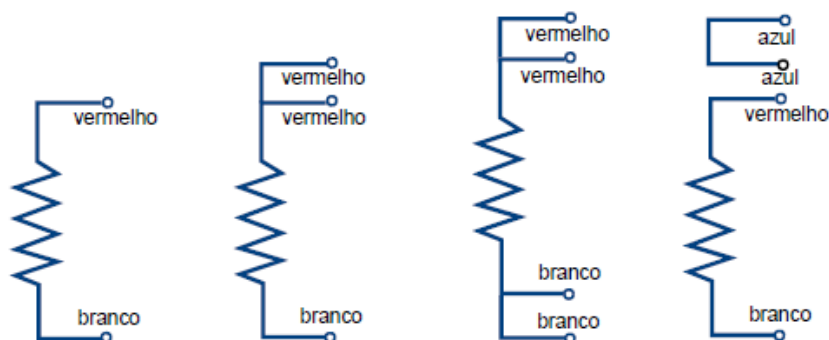


Figura 2.17 – Configurações dos cabos de ligação de um RTD[5]

O emprego de apenas 2 condutores é utilizada em aplicações menos exigentes, onde a resistência dos cabos pode ser considerada constante, estando a sua compensação implícita na instrumentação. No que diz respeito à implementação de 3 condutores, esta é a forma mais utilizada em termos industriais. Este tipo de configuração permite minimizar o efeito da resistência dos condutores e também da sua alteração com a temperatura ambiente, originando assim medições com uma exatidão considerada boa. A utilização dos 3 condutores é utilizada essencialmente para ser aplicada numa ponte de *Wheatstone* ou num transmissor de dois condutores.

Em relação ao auto-aquecimento, uma forma de minimizar os erros associados a este fenómeno é a utilização de uma corrente de alimentação, a mais baixa possível, sendo no entanto necessário ter em conta um bom compromisso entre auto-aquecimento e sensibilidade. A utilização de sensores com dimensões não muito reduzidas e com baixa resistência térmica, e a existência de um bom contacto térmico entre o RTD e o meio envolvente são fatores que também minimizam os efeitos do auto-aquecimento.

Outra forma de minimizar o problema associado ao aquecimento do sensor é através da utilização de uma corrente pulsada, sendo neste caso requerido a utilização de um circuito eletrónico mais sofisticado e, conseqüentemente, um custo mais elevado[5].

2.3.2.2 Termístores

Os termístores são elementos idênticos às termo-resistências metálicas, no que diz respeito ao seu princípio de funcionamento. Apresentam uma variação de resistência em função da temperatura. A principal diferença entre estes dois elementos sensores está no material base da sua construção. No caso dos termístores, estes são feitos à base de semicondutores, como os óxidos de níquel, cobalto ou manganês e sulfatos de ferro, alumínio ou cobre.

De um modo geral existem dois tipos de termístores que se distinguem por terem uma variação positiva ou negativa da resistência com a variação da temperatura. Os NTC (*Negative Temperature Coefficient*) apresentam uma variação negativa, isto é, a sua resistência diminui com um aumento da temperatura. Os PTC (*Positive Temperature Coefficient*), apresentam uma variação positiva e são utilizados em número bastante inferior em relação aos NTC, consequência da sua elevada não linearidade [4].

A grande vantagem dos termístores em relação aos RTD está na sua sensibilidade, podendo ser cerca de 10^3 a 10^6 vezes superior. No entanto e devido a sua não linearidade, não existe para os termístores curvas linearizadas de funcionamento, sendo por isso necessário recorrer sempre a uma calibração individual de cada sensor.

Na Figura 2.18 está ilustrada a evolução da resistência de um termistor NTC e de um RTD com a temperatura, onde é possível evidenciar a elevada sensibilidade e não linearidade do termistor[5].

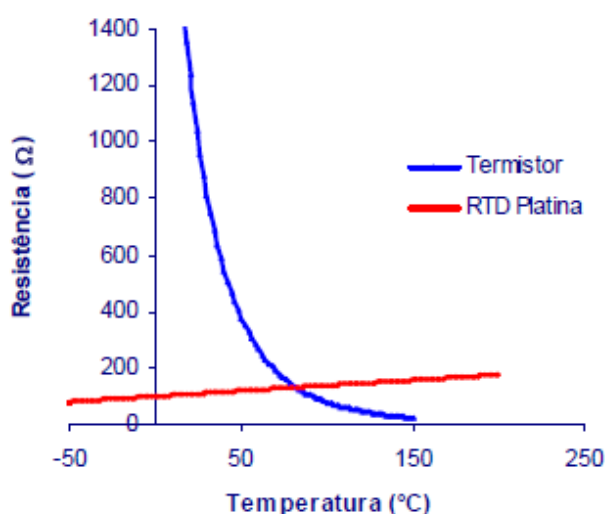


Figura 2.18 – Comparação das curvas características R(T) de um RTD com um termistor[5]

De um modo geral, os termístores podem ser utilizados numa gama de temperaturas que varia entre -100°C e 300°C, podendo para um NTC, em grande parte dos casos, ser utilizada a seguinte expressão:

$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.7)$$

Sendo R a resistência (Ω) do termístor à temperatura absoluta T (K), R_0 a resistência (Ω) do termístor à temperatura de referência T_0 (K) e β (K) o parâmetro característico do termístor.

Em relação aos termístores PTC, estes apresentam, também, uma grande não linearidade, pelo que, até atingir um determinado valor de temperatura, a sua variação é negativa como nos NTC (Figura 2.19), sendo por isso apenas utilizados numa determinada gama. Este tipo de termístor é utilizado essencialmente em aplicações para proteção contra sobreaquecimento[4].

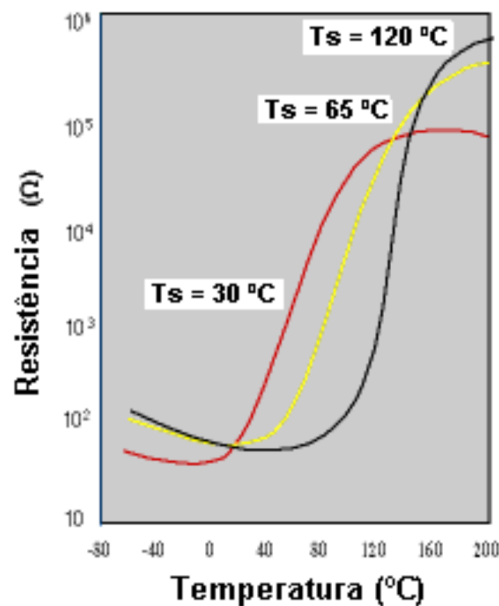


Figura 2.19 – Curvas características de 3 termístores PTC[5]

2.4 Medição de Caudal

Atualmente existem no mercado uma enorme variedade de transdutores de caudal baseados em princípios de funcionamento totalmente distintos, podendo no

entanto, ser divididos em dois grandes grupos, designando-os por transdutores invasivos e não invasivos. A principal diferença entre estes dois grupos está na necessidade de introduzir componentes no interior do fluido, podendo estes ser fixos ou móveis.

No que diz respeito à medição do caudal propriamente dito, esta pode ser feita de forma direta, através da medição da velocidade do fluido, ou de forma indireta, através de diferença de pressões, por exemplo.

As unidades utilizadas pelo Sistema Internacional são os metros cúbicos por segundo (m^3/s). No entanto e dependendo dos contextos, o caudal volumétrico pode ser expresso, por exemplo, em litros por minuto (l/min).

Embora tenha sido definido inicialmente que o transdutor utilizado iria ser um novo protótipo a desenvolver no decorrer da dissertação, ao longo desta secção serão apresentados alguns dos transdutores existentes no mercado, de forma a tentar abranger a maioria dos princípios de funcionamento destes.

2.4.1 Transdutores invasivos

Os transdutores invasivos são caracterizados pela presença de componentes, fixos ou móveis, ou pela existência de variação de secção de passagem do fluido. Normalmente este tipo de transdutor é baseado em dois princípios distintos, isto é, por princípios mecânicos ou baseados em diferença de pressões.

2.4.1.1 Transdutores Mecânicos

Caudalímetro de pistões

Também conhecido como caudalímetro rotativo de pistões, este transdutor usualmente é utilizado em contadores de água, sendo portanto utilizados maioritariamente como transdutores de volume. Normalmente são utilizados 4 pistões idênticos colocados no interior de 4 câmaras com um volume conhecido, tal como representado na Figura 2.20.

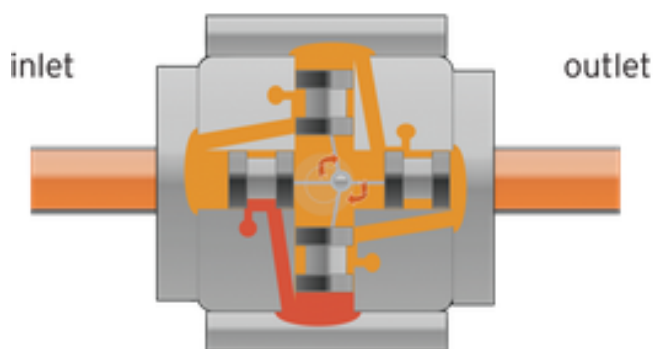


Figura 2.20 – Esquema de funcionamento de um caudalímetro de pistões[7].

Conhecendo o deslocamento dos pistões é possível saber qual o volume de fluido deslocado a cada movimento de avanço-recuo do pistão e, conseqüentemente, saber qual o volume de fluido que atravessa o transdutor em cada rotação. Utilizando um contador de voltas, um encoder por exemplo, é possível calcular qual o volume de líquido que passou pelo transdutor[7].

Caudalímetro de Engrenagens

O princípio de funcionamento deste transdutor é semelhante ao anterior, sendo que, neste caso, existem duas rodas dentadas engrenadas uma na outra que são atuadas com a passagem do fluido. No esquema da Figura 2.21 está representado um caudalímetro de engrenagens.

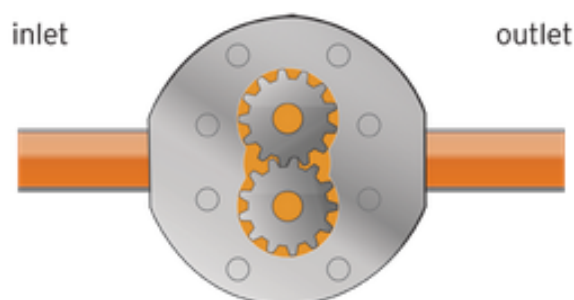


Figura 2.21 – Esquema de funcionamento de um caudalímetro de engrenagens [7]

Após entrar no transdutor, o fluido circula pelo exterior das engrenagens saindo pelo lado oposto. O volume de fluido que se encontra entre cada dente da engrenagem é conhecido, podendo assim, ser calculado o volume total por cada rotação

da roda. Acoplando um dispositivo de leitura de rotações ou até mesmo de velocidade de rotação é possível calcular o volume/caudal que atravessa o transdutor[7].

Rotâmetro

Os rotâmetros, também conhecidos como caudalímetros de área variável, não apresentam as características mecânicas tão evidentes como nos anteriores, no entanto enquadram-se neste tipo de transdutores, por apresentarem uma peça móvel fundamental ao seu funcionamento. Este tipo de transdutores é composto por um tubo cônico transparente colocado na vertical, e por um flutuador no seu interior. Ao circular no interior do tubo, no sentido ascendente, o fluido provoca uma força de impulsão (força de arrasto) no flutuador com sentido contrário à força gravítica, como ilustrado na Figura 2.22.

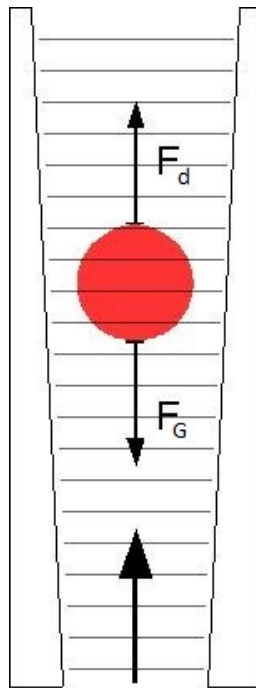


Figura 2.22 – Esquema representativo do funcionamento de um rotâmetro [8]

Consoante a posição do flutuador, a área de passagem de fluido vai sendo diferente, sendo esta conhecida para todas as posições do flutuador. Considerando a equação (2.8) relativa à força de arrasto (F_d) onde C_d representa o coeficiente de arrasto (determinado experimentalmente), ρ a massa volúmica do fluido, v a velocidade

relativa entre o fluido e o flutuador e A a área de passagem, torna-se possível o cálculo da velocidade do fluido na área de passagem.

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A \quad (2.8)$$

Para uma situação de equilíbrio, onde a força de arrasto equilibra a força gravítica, a única incógnita da equação passa a ser a velocidade, sendo então possível determinar qual o valor do caudal, multiplicando o valor da velocidade pela área de passagem[8, 9].

2.4.1.2 Transdutores baseados na pressão

Todos os transdutores que apresentam uma relação de pressões como base do seu funcionamento, têm como princípio base as equações de Bernoulli, que para um fluido incompressível se resume à equação (2.9) ao longo da linha de corrente.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z + p = const. \quad (2.9)$$

Onde v é a velocidade do fluido num ponto em análise, ρ a massa volúmica, g a força gravítica, z a altura em relação a um plano horizontal de referência e p a pressão do ponto em análise.

Com base neste princípio foi possível desenvolver transdutores que se baseiam na diferença de pressões, como é o caso do tubo de Venturi (Figura 2.23) e da placa orifício (Figura 2.24) ou na leitura da pressão total, como é o caso do tubo de Pitot.

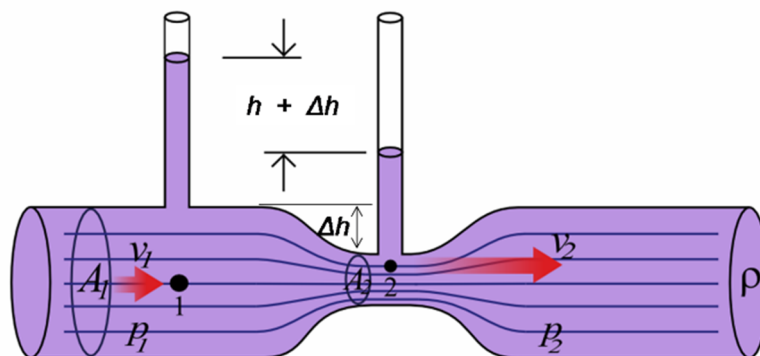


Figura 2.23 – Esquema de funcionamento de um tubo de Venturi[8]

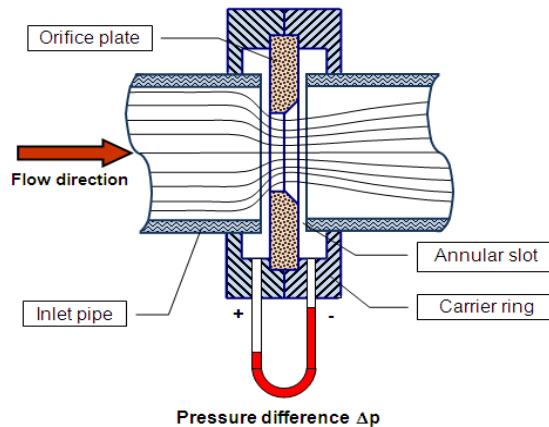


Figura 2.24 – Esquema de funcionamento de ma placa orifício[8]

Nos dois primeiros casos é feita uma leitura das pressões estáticas do fluido em zonas com área de passagem diferentes e, através desta diferença de pressões, é possível então calcular a velocidade do fluido numa zona onde a área de passagem também é conhecida, determinando assim o valor do caudal[10].

No que diz respeito ao tubo de pitot, este transdutor é constituído por um tubo que é introduzido no interior do fluido, com a mesma direção do escoamento, de forma a poder ser medido o valor da pressão total, pressão dinâmica mais pressão estática. Existem, no entanto, algumas variações deste tipo de transdutor que permitem medir o valor da pressão estática, como representado na Figura 2.25

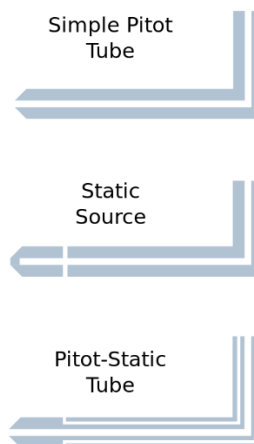


Figura 2.25 – Variantes do tubo de Pitot para medição da pressão (total, estática e ambas) [8]

2.4.2 Transdutores não invasivos

Contrariamente aos transdutores apresentados até este ponto, os transdutores não invasivos caracterizam-se pela não existência de componentes no interior do fluido nem de variações de secção que provocam alterações nas características do escoamento. De um modo geral, estes transdutores fazem uma leitura do caudal pela parte exterior do escoamento, o que pode representar uma grande vantagem em aplicações onde é necessário manter um escoamento constante.

Em termos de custos, os transdutores não invasivos apresentam valores bastante mais elevados do que os invasivos, o que será um ponto negativo no que diz respeito à sua utilização no protótipo a desenvolver. Por este motivo, nesta secção, apenas serão abordados dois transdutores não invasivos, um baseado em ultra-som e outro no efeito Doppler.

2.4.2.1 Transdutor de Ultra-som

Existem atualmente no mercado alguns transdutores a funcionar, tendo por base, a utilização de ultra-som, nomeadamente relacionando ultra-som com o efeito Doppler. No entanto, como este princípio será abordado noutra transdutor, este tópico será dedicado a descrição de um transdutor de ultra-som baseado no tempo de voo.

Neste tipo de transdutores, é colocado um corpo de prova a envolver o tubo onde o fluido vai escoar. Num dos lados são colocados dois emissores/recetores de ultra-som, direcionado para um refletor colocado no lado oposto do tubo, tal como representado na Figura 2.26.

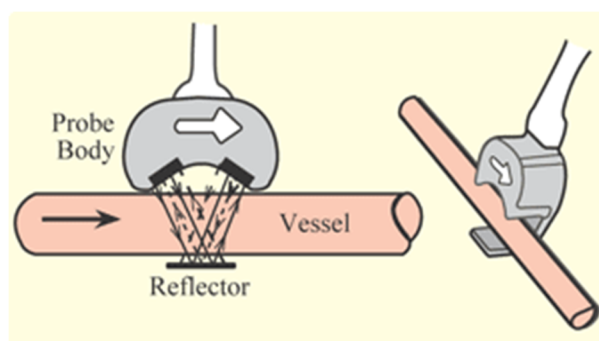


Figura 2.26 – Representação do funcionamento de um transdutor de ultra-som baseado no tempo de transição[8]

Quando existe um escoamento de um fluido no interior do tubo, existe um emissor que envia sinais ultrassónicos num sentido a favor do escoamento, e outro que envia o ultra-som no sentido contrário ao escoamento. Estes dois sinais são emitidos ao mesmo tempo e é calculado o tempo que demoram até serem detetados pelo receptor. Este tempo, denominado de tempo de voo, depende da velocidade e da direção do escoamento, pelo que, através da diferença de tempos entre os sinais, é possível calcular a velocidade do fluido no interior do tubo e consequentemente o caudal[11].

2.4.2.2 Laser Doppler Velocimeter (LDV)

Também denominado de *laser Doppler anemometer (LDA)*, este transdutor é construído por um feixe de laser dividido em dois “braços” que se interseçam no interior do fluido em movimento, e por um fotodetetor, como representado na Figura 2.27.

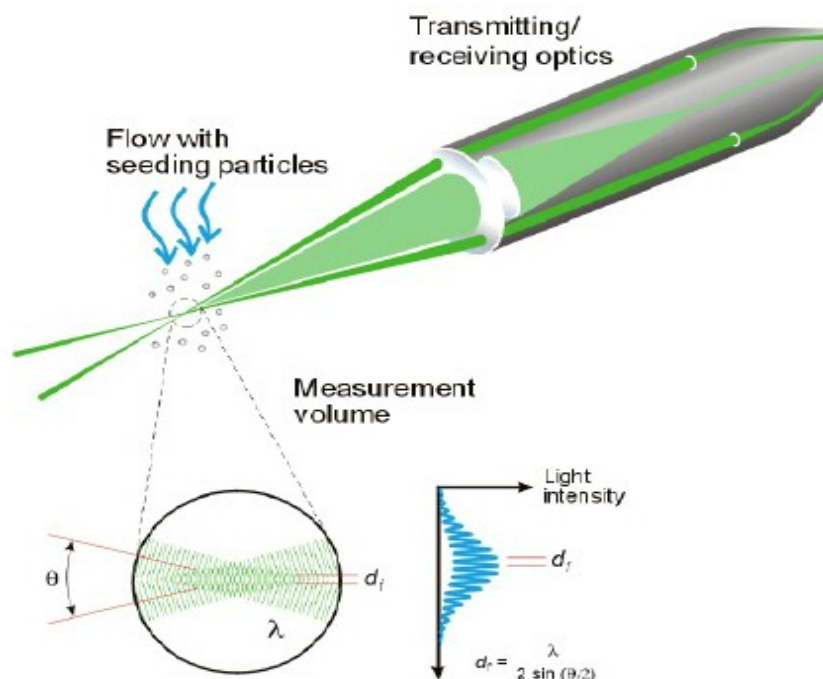


Figura 2.27 – Esquema representativo do funcionamento de um LDV[12]

A zona de interceção dos dois “braços” do lazer é denominada por volume de medição e é caracterizada pela existência de planos intercalados de luz e sombra, denominados de franjas ou de interferência. A intensidade da luz em cada franja varia de uma forma idêntica à representada pela Figura 2.28

Quando uma partícula atravessa o volume de medição provoca uma reflexão do laser que é detetada pelo fotodetetor e que, devido a existência das franjas, capta um sinal idêntico ao representado na Figura 2.28. Através da determinação da frequência deste sinal é possível determinar a velocidade a que a partícula se desloca, determinando, assim, o valor do caudal.

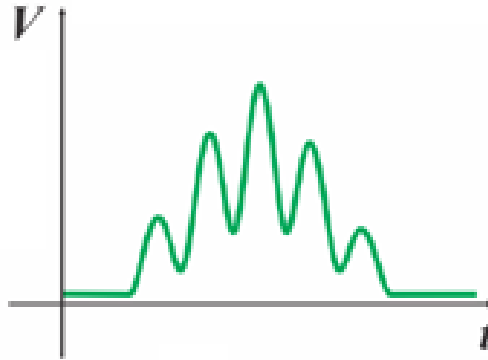


Figura 2.28 – Exemplo de um sinal detetado pelo fotodetetor [13]

No entanto, para além da velocidade das partículas, com este transdutor também é possível determinar o sentido do escoamento. É neste ponto que é aplicado o princípio do efeito de Doppler. Ao atravessar o volume de medição, uma partícula aproxima-se de um dos feixes do laser e afasta-se do outro. Esta aproximação/afastamento altera a frequência do sinal refletido, isto é, para o caso de uma aproximação existe um aumento de frequência e no afastamento uma diminuição.

Apesar da frequência do laser ser bastante elevada, 45.5 petahertz para o vermelho por exemplo, com o princípio do efeito de Doppler, a partícula reflete a luz a duas frequências diferentes, uma ligeiramente superior aos 45.5 petahertz e outra ligeiramente inferior. Sendo esta frequência impossível de medir com componentes convencionais, produz-se a interferência entre os 2 feixes obtidos da mesma origem por uso de um divisor de feixe. Consequentemente, quando se cruzam no local de medição aparecem frequências de máximos e de mínimos. Tal como, quando se atiram simultaneamente duas pedras para um lago em repouso, produzindo dois locais distintos de ondas perfeitamente circulares. À medida que estas ondas se vão afastando da origem

e interação com as cristas das ondas produzidas pela outra pedra temos somas denominadas de máximos e subtrações denominadas de mínimos, sendo que, os máximos distam de meio comprimento de onda. Assim, para o vermelho de, por exemplo, 635nm temos um espaçamento de 317,5nm entre dois máximos ou seja dois círculos escuros. Quando as partículas passam por esta superfície alteram a uniformidade do claro - escuro, permitindo assim, efetuar uma contagem de número de partículas, sentido e direção, por superfície ou até volume, conforme a complexidade do sistema laser aplicado [12, 13].

2.5 Conclusão

No que diz respeito ao estudo da dissertação anterior e, comparando os resultados finais obtidos com os objetivos propostos para a presente dissertação, apesar da válvula utilizada ser a mesma, todo o sistema de atuação terá de ser refeito de forma a poder cumprir requisitos, como a capacidade de tornar a válvula proporcional ou a possibilidade de escolher o estado inicial, aberto ou fechado. Também, o acoplamento entre o motor e a válvula deverá ser analisado por se tratar de uma ligação rígida.

Em termos da escolha de transdutores, como foi referido inicialmente, o transdutor de caudal será desenvolvido, tendo por base uma nova ideia para o princípio de funcionamento. No entanto, tendo em conta os transdutores estudados e a aplicação em que vai ser inserido, seria interessante a utilização de um transdutor que tivesse a capacidade de medição direta do volume.

Por fim, no que diz respeito aos transdutores de temperatura, o que apresenta características mais vantajosas para o protótipo em desenvolvimento é o termopar, essencialmente, pelo facto, de não necessitar de uma instrumentação associada, muito complexa, que permita a sua leitura, sendo apenas necessário a compensação da junção fria, que poderá ser feio por intermédio de um circuito integrado. A utilização de um transdutor resistivo implicaria ainda a necessidade de compensar os erros, como a resistência dos cabos e o auto-aquecimento.

3 Projeto mecânico

3.1 Introdução

Após feito um enquadramento da presente dissertação no capítulo 1 e da apresentação do estudo relativo aos possíveis transdutores de temperatura e de caudal, a serem utilizados no protótipo a desenvolver (capítulo 2), o passo seguinte passa pela escolha de todos os componentes a utilizar e pelo desenvolvimento de um projeto mecânico capaz de satisfazer todos os requisitos do protótipo.

Como referido inicialmente, a presente dissertação surgiu como continuação de uma dissertação, na qual foi desenvolvida a válvula em estudo. Como tal, foi necessário fazer um estudo da dissertação anterior, de forma a compreender se o projeto mecânico desenvolvido poderia ser aproveitado na presente dissertação.

Uma vez que existia a possibilidade de, após desenvolver todo o projeto com auxílio a um software CAD, criar fisicamente o protótipo com alguma rapidez através de uma impressora 3D presente no laboratório de trabalho, optou-se por desenvolver o novo sistema de atuação de raiz, deixando de parte o sistema desenvolvido na dissertação anterior. O ponto de partida para o desenvolvimento do projeto mecânico da presente dissertação foi apenas a válvula já existente, representada na Figura 3.1.

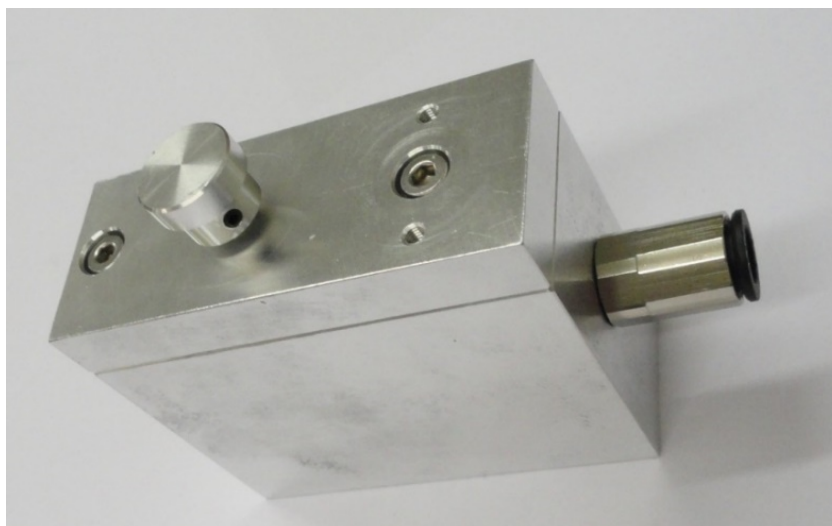


Figura 3.1 – Válvula utilizada sem sistema de atuação

Tal como referido, todo o projeto mecânico foi concebido com objetivo de poder ser materializado através de uma impressora 3D, sendo por isso utilizado um *software* CAD, o SolidWorks, para o desenvolvimento dos desenhos 3D das peças a serem produzidas.

A prototipagem, feita através da impressora, consiste na deposição do material por camadas, sendo por isso necessário ter em conta alguns aspetos no desenvolvimento dos componentes do protótipo, como por exemplo:

- Criação de uma base larga e estável capaz de suportar toda a peça, onde irá iniciar a impressão;
- Dilatação do material, originando peças com dimensões ligeiramente diferentes às definidas no desenho 3D;
- Evitar a impressão de peças em que as camadas superiores apresentam dimensões bastante superiores às camadas inferiores.
- Facilidade de acesso a zonas da peça que necessitam de ser maquinadas, nomeadamente furos.

Em relação às escolhas efetuadas, no que diz respeito aos transdutores para a medição de temperatura, foi utilizado um termopar do tipo K, e para o caudal foi desenvolvido um protótipo baseado num novo princípio de funcionamento, explicado em detalhe no capítulo 5.

Em termos de componentes utilizados para o sistema de atuação, estes encontram-se apresentados, com mais detalhe, no capítulo 4, referente ao desenvolvimento do projeto eletrónico, sendo que, para o presente capítulo, se torna importante apenas referir o princípio básico de funcionamento de alguns componentes, bem como as suas dimensões, por forma a serem incorporados no protótipo final.

Sendo o transdutor de caudal baseado num princípio de funcionamento inovador, o presente capítulo, onde será apresentado todo o desenvolvimento mecânico do protótipo final, encontra-se dividido em dois tópicos distintos, um dedicado ao sistema de atuação da válvula e outro dedicado ao desenvolvimento do transdutor de caudal.

3.2 Atuação da Válvula

O desenvolvimento do protótipo referente à atuação da válvula teve, como ponto de partida, a válvula de gaveta rotativa proveniente do trabalho anterior, sendo todos os componentes idealizados de forma a poderem ser produzidos em prototipagem rápida por intermédio da impressora 3D.

O primeiro passo a tomar no desenvolvimento do protótipo passa por definir todos os seus requisitos, bem como, todos os componentes a serem utilizados. No que diz respeito aos requisitos do protótipo destacam-se os seguintes:

- Possibilidade de implementação na válvula já existente;
- Ligação mecânica entre o motor e a válvula;
- Implementação de dispositivos de fim de curso (funcional e de emergência).

Em termos de componentes, foram utilizados os seguintes:

- Motor DC → Atuação da válvula;
- Conjunto led emissor e foto transistor recetor → Fim de curso funcional;
- *Micro switch* inversor → Fim de curso de emergência;
- *Encoder* → Leitura da posição.

O funcionamento de todos estes componentes será explicado de forma detalhada no capítulo 4, sendo que, para o desenvolvimento do projeto mecânico, apenas

serão referidos os aspetos de funcionamento considerados relevantes. No que diz respeito às características físicas dos componentes mencionados, estas são bastante importantes tendo em conta a sua implementação no protótipo, pelo que foram desenvolvidos desenhos 3D representativos dos dispositivos de fim de curso, Figura 3.2 e Figura 3.3, e do Motor DC, Figura 3.4. A representação do *encoder* não se torna relevante, uma vez que este se encontra acoplado ao motor numa parte superior do protótipo.

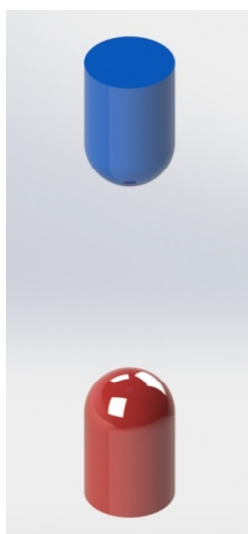


Figura 3.2 – Representação 3D dos leds do dispositivo de fim de curso funcional

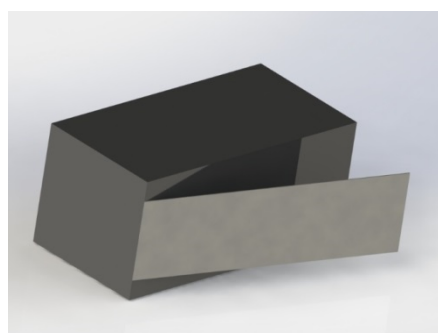


Figura 3.3 – Representação 3D do *micro switch* relativo ao dispositivo de fim de curso de emergência



Figura 3.4 – Representação 3D do motor DC

Ao longo do presente subcapítulo serão apresentados todos os componentes principais do protótipo desenvolvido, sendo que o resultado final se encontra ilustrado na Figura 3.5

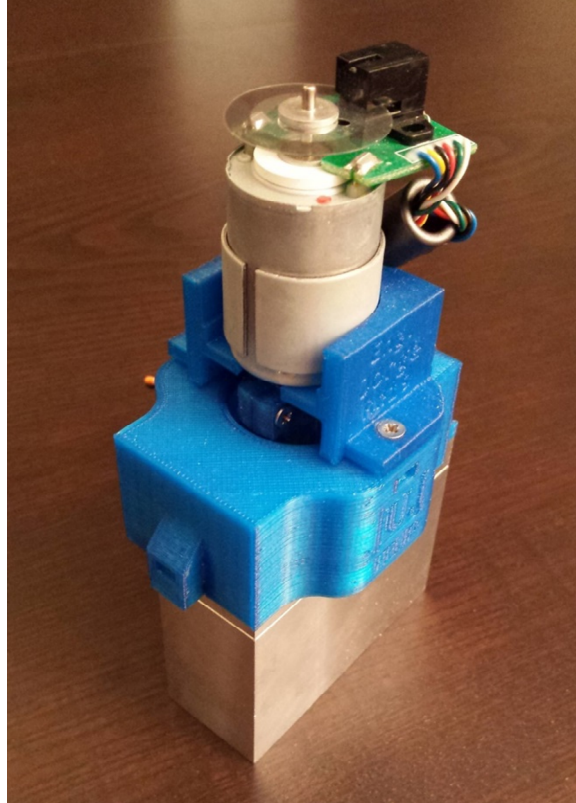


Figura 3.5 – Protótipo desenvolvido para atuação da válvula

3.2.1 Ligação Válvula-Motor

Contrariamente ao que foi desenvolvido no trabalho anterior, onde o motor foi acoplado diretamente à gaveta da válvula (acoplamento rígido), no presente protótipo houve o cuidado de desenvolver um sistema de transmissão que permitisse obter um acoplamento elástico.

Este tipo de acoplamento torna-se bastante importante no desenvolvimento do projeto, uma vez que todo o protótipo foi produzido através de uma impressora 3D. Este processo de prototipagem leva à obtenção de peças com dimensões ligeiramente diferentes das projetadas no desenho 3D, devido a folgas de resolução de impressão, podendo originar um pequeno desalinhamento entre os eixos do motor e o da gaveta.

Após uma pesquisa sobre este tipo de acoplamentos já existentes, optou-se pela utilização de um acoplamento do tipo cardan, permitindo assim, otimizar a transmissão de movimento e binário do motor para a gaveta, mesmo que os seus eixos se encontrem ligeiramente desalinhados, quer estejam descentrados, inclinados ou ambos.

Na Figura 3.6 e na Figura 3.7 está representado o sistema de cardan utilizado no protótipo final, onde na parte superior (verde) está fixo o motor, e na parte inferior (amarelo) está fixa a gaveta da válvula.

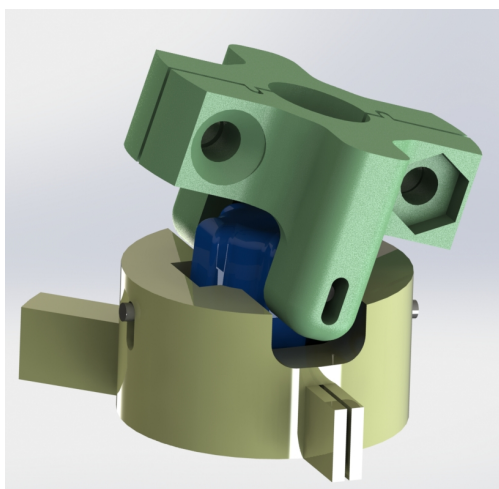


Figura 3.6 – Cardan utilizado para acoplar o motor à válvula

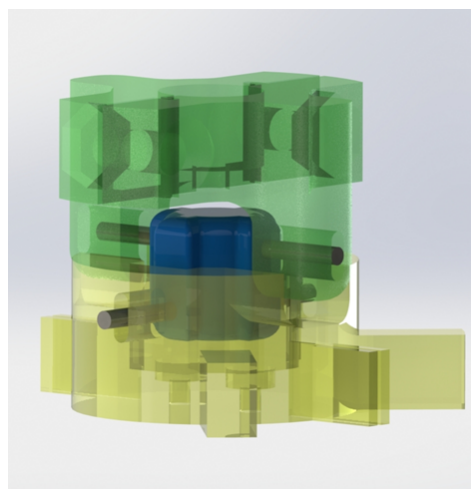


Figura 3.7 – Vista dos componentes interiores do cardan

Uma vez que na extremidade do veio do motor existe de origem uma roda dentada de dimensões reduzidas, seria impossível produzir, através da impressora 3D, uma peça de acoplamento direto na ponta do motor. Optou-se então pela utilização de duas peças que, por intermédio de dois conjuntos parafuso/porca M3, criassem aperto suficiente para transmitir o movimento do motor para o cardan, tal como representado na Figura 3.8 e na Figura 3.9.

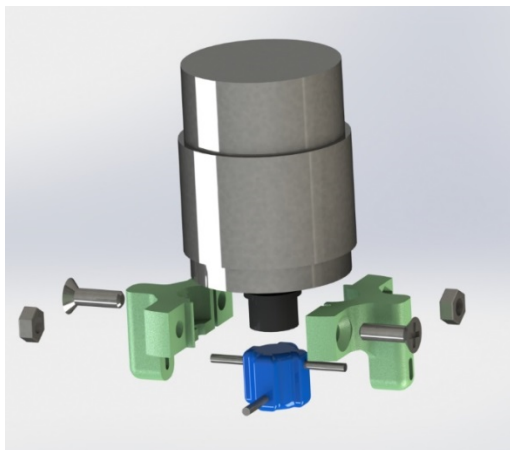


Figura 3.8 – Vista explodida da ligação entre o motor e o cardan

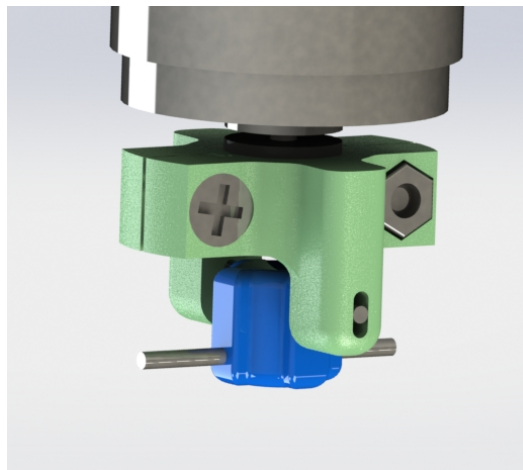


Figura 3.9 – Ligação entre o motor e o cardan

No que diz respeito à fixação da gaveta, esta foi feita por intermédio de dois parafusos M2.5, que enroscam em dois orifícios já existentes, provenientes do projeto anterior, como representado na Figura 3.10.

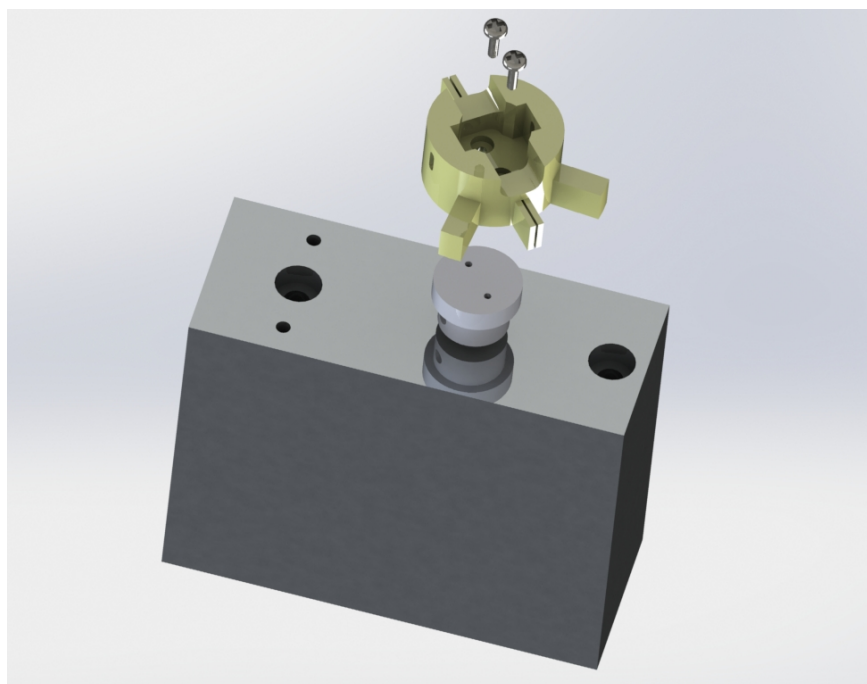


Figura 3.10 – Vista explodia da ligação entre o cardan e a válvula

3.2.2 Dispositivos de fim de curso

Também, no que diz respeito aos dispositivos de fim de curso, houve uma necessidade de melhorar a solução implementada no protótipo anterior, passando a utilizar dois tipos de fim de curso (funcionais e de emergência).

Os dispositivos de fim de curso funcionais baseiam-se em tecnologia ótica, compostos por um conjunto emissor/recetor, e são utilizados para deteção das posições extremas da válvula. São, portanto, os dispositivos utilizados quando a válvula se encontra em funcionamento normal.

A atuação dos dispositivos de fim de curso funcionais é feita por intermédio de uma pequena barreira, que interceta o espaço compreendido entre o emissor (vermelho) e o recetor (azul), tal como representado na Figura 3.11. Desta forma é possível garantir um correto funcionamento deste sensor, uma vez que, quando o dispositivo não está atuado, o recetor encontra-se a detetar constantemente o sinal do emissor.

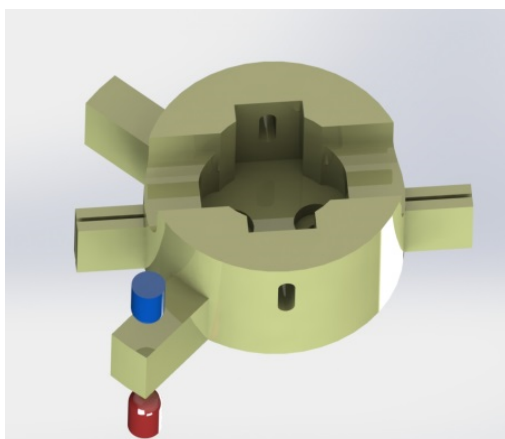


Figura 3.11 – Dispositivo de fim de curso funcional atuado pela barreira entre o emissor e o recetor

No que diz respeito aos dispositivos de fim de curso de emergência, estes são compostos por um *micro switch* inversor que funciona como batente. Estes dispositivos de apenas serão atuados em caso de anomalia grave, improvável e inesperada no funcionamento da válvula, ou seja, em casos de emergência, garantindo assim que a válvula não ultrapasse os seus limites de funcionamento.

Para implementar os dispositivos de fim de curso no protótipo foi aproveitada a parte inferior do cardan, através de duas saliências responsáveis por fazer de barreira

no dispositivo ótico assim como pela atuação dos dispositivos de fim de curso de emergência, tal como se pode visualizar na Figura 3.12. Nesta figura é possível observar a solução desenvolvida para a fixação do protótipo à válvula, através de uma base fixa por intermédio de dois parafusos M3 roscados, em dois orifícios já existentes no corpo da válvula.

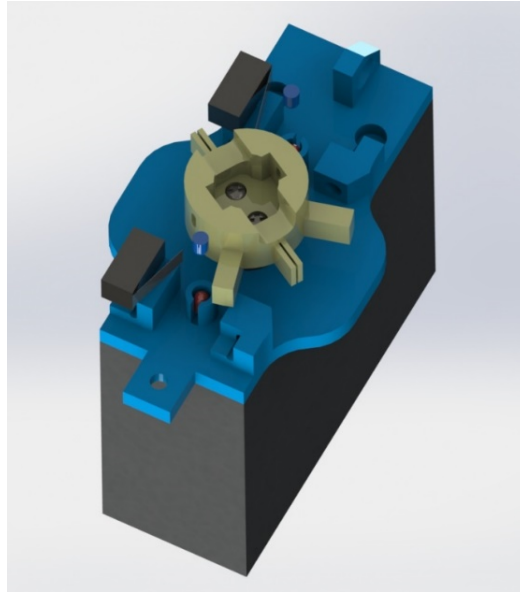


Figura 3.12 – Montagem dos dispositivos de fim de curso no protótipo

Esta base também é utilizada para alocação dos dispositivos de fim de curso, existindo para esse efeito dois orifícios para a colocação dos led emissores, estando os recetores colocados em orifícios idênticos na tampa do protótipo, apresentada mais a frente. Em relação aos dispositivos de fim de curso de emergência, uma vez que é necessário fazer um ajuste da sua posição para garantir que são atuados de forma correta, estes são colados na base através de uma fixação permanente adequada.

3.2.3 Leitura de posição

Embora no protótipo final a leitura de posição seja efetuada por intermédio de um *encoder* acoplado ao motor, numa fase inicial do projeto o motor que se pretendia utilizar era outro, sendo que, não continha nenhum transdutor de posição incorporado, como que se poderá verificar mais a frente no capítulo 4, onde se faz referência aos componentes utilizados.

Foi então, idealizado um transdutor de posição, com princípio de funcionamento ótico, que apresenta, como principal característica, o facto de não provocar atritos que dificultariam a atuação da válvula.

O princípio de funcionamento deste transdutor consiste em colocar uma folha de plástico, semi-opaco, entre o emissor e o recetor e solidária com o movimento de rotação da gaveta da válvula. Desta forma, seria possível variar a intensidade detetada pelo recetor consoante a posição da gaveta, tal como representado pela Figura 3.13.

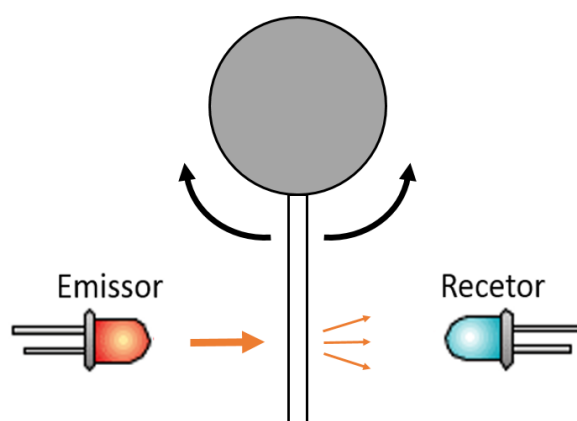


Figura 3.13 – Representação do funcionamento do transdutor de posição angular

A solução utilizada para a implementação deste transdutor foi através da colocação dos leds emissor e recetor na base do protótipo, e a folha de plástico fixa na parte inferior do cardan, como se verifica na Figura 3.14. A colocação de dois transdutores de posição na válvula servia para duplicar o valor da sensibilidade da leitura da posição.

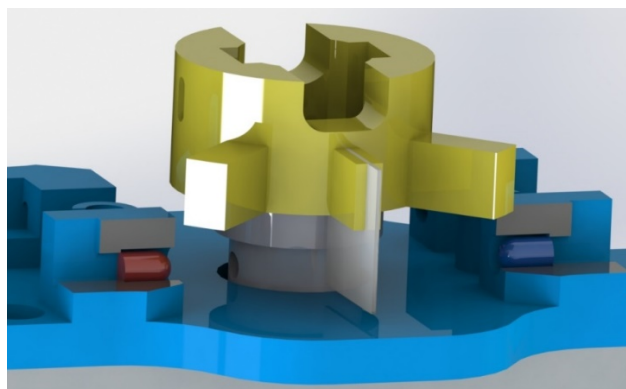


Figura 3.14 – Implementação do transdutor de posição no protótipo

No entanto, este transdutor não foi utilizado no protótipo final porque seria necessário recorrer a um sistema complementar para detetar o sentido e a direção para o qual a válvula se estaria a deslocar, uma vez que, a partir de uma posição central, a evolução do sinal da válvula é idêntico nos dois sentidos, tal como se verifica pela análise da sua característica representada na Figura 3.15.

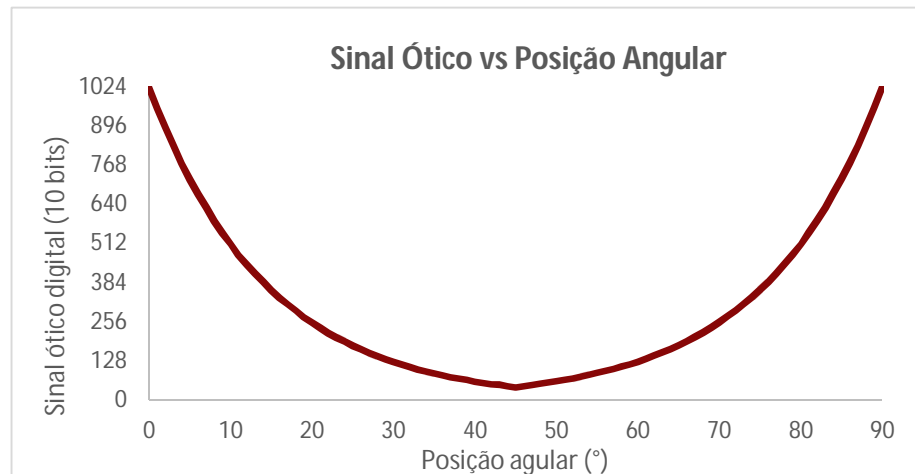


Figura 3.15 – Evolução do sinal ótico com a posição angular da válvula

3.2.4 Suporte do motor e tampa

A forma utilizada para fixar o motor no protótipo final foi através de um suporte fixo na parte superior da tampa por intermédio de dois conjuntos de parafuso/porca M3 (Figura 3.16).

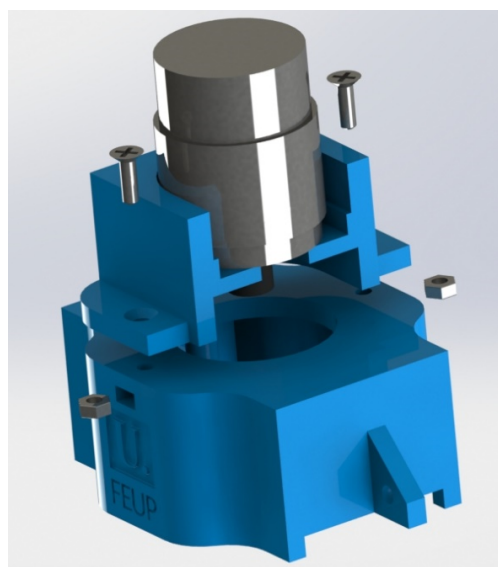


Figura 3.16 – Vista explodida do sistema de fixação do suporte do motor à tampa do protótipo

A fixação do motor ao suporte é feita através de dois parafusos M2 colocados na parte inferior do motor, tal como representado pela Figura 3.17. A abertura lateral do suporte do motor, deve-se ao facto de ser necessário realizar o aperto do módulo superior do cardan ao motor, por utilização de uma chave, Figura 3.18.

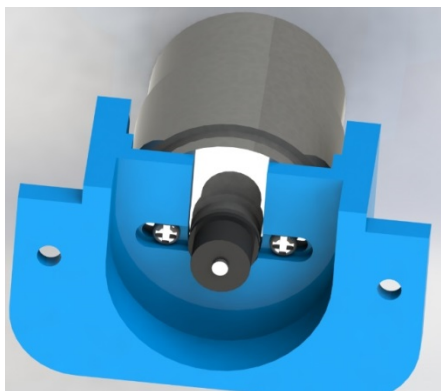


Figura 3.17 – Fixação do motor por intermédio de dois parafusos

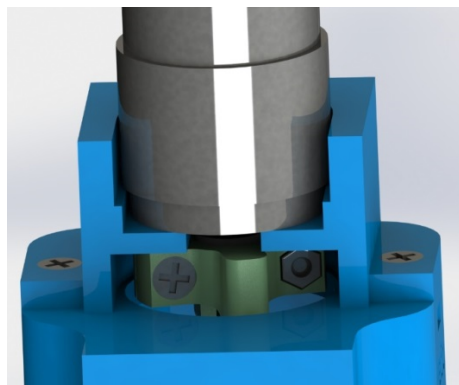


Figura 3.18 – Abertura lateral do suporte do motor

No que diz respeito à tampa do protótipo, esta é fixa à base, também com dois conjuntos de parafuso/porca (Figura 3.19), e é nela que se encontram colocados os leds recetores referentes aos dispositivos de fim de curso funcionais (Figura 3.20).

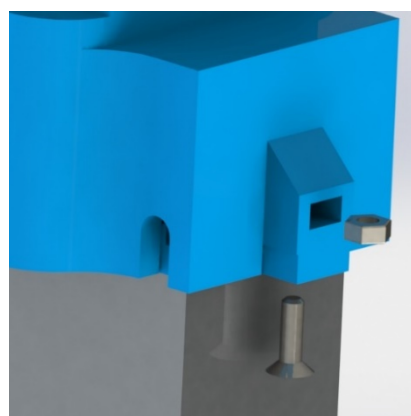
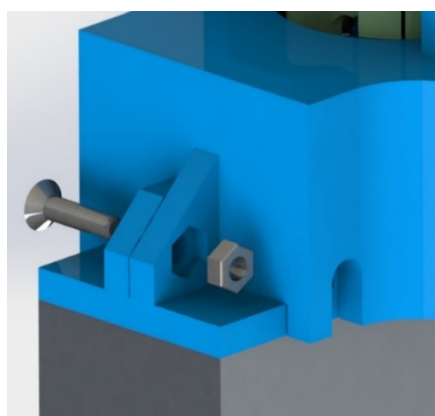


Figura 3.19 – Fixação da tampa do protótipo à base através de conjunto parafuso/porca

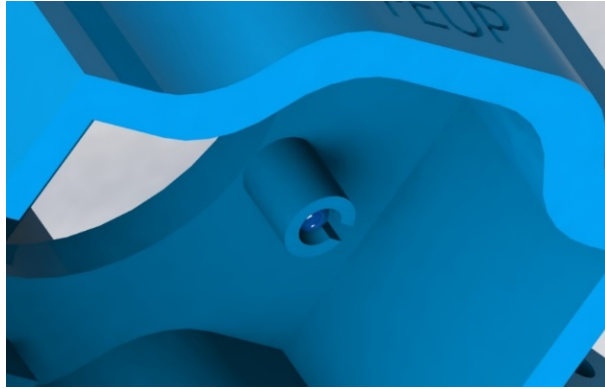


Figura 3.20 – Colocação do recetor referente ao fim e curso ótico no interior da tampa

Nas laterais da tampa estão colocados dois orifícios, visíveis na Figura 3.19, utilizados para a passagem dos fios de ligação elétrica relativos aos dispositivos de fim de curso. O formato arredondado da parte lateral é consequência do projeto inicial, onde se pretendia incluir o transdutor de posição baseado em princípio ótico.

3.3 Transdutor de Caudal

Embora o objetivo proposto inicialmente fosse a implementação de um transdutor de caudal na própria válvula, uma vez que se trata do desenvolvimento de uma ideia inovadora, optou-se pelo desenvolvimento de um protótipo exclusivamente para o transdutor, Figura 3.21, de forma a poder ser verificado o seu princípio de funcionamento, assim como a elaboração de testes. Posteriormente, caso houvesse tempo disponível, seria desenvolvido um protótipo de dimensões reduzidas de forma a poder ser acoplado diretamente à válvula.



Figura 3.21 – Protótipo do transdutor de caudal desenvolvido

Tal como no protótipo desenvolvido para a atuação, também neste caso, é necessário entender o princípio básico de funcionamento do transdutor, assim como os componentes necessários.

De uma maneira bastante simples pode dizer-se que o funcionamento do transdutor se baseia na análise do escoamento no interior de um tubo, por intermédio de um sensor de imagem, sendo para isso necessário, para além do sensor, um led capaz de iluminar o volume da passagem do fluido, e uma lente de focagem, na parte recetora de imagem. A montagem destes componentes deverá ser feita de uma forma idêntica à representada na Figura 3.22.

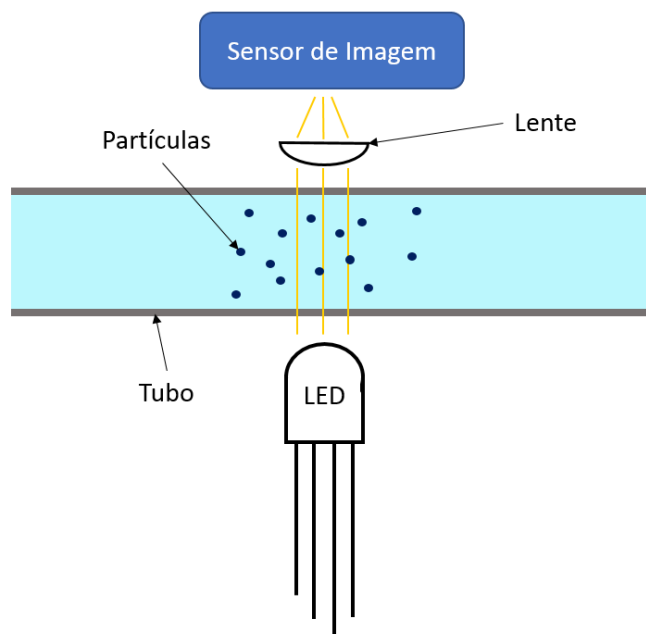


Figura 3.22 – Esquema representativo da montagem do transdutor de caudal

3.3.1 Componentes e implementação.

Como explicado anteriormente, os componentes necessários para a o funcionamento correto do transdutor, para além de um tubo transparente, são um led e um sensor de imagem juntamente com uma lente de focagem.

No que diz respeito ao led, de forma a ser possível otimizar o funcionamento do transdutor, foi utilizado um led RGB (*Red, Blue and Green*), podendo assim, variar a cor da luz utilizada para iluminar o tubo, possibilitando a sua aplicação em escoamento de fluidos com características distintas. Em relação ao sensor de imagem e à lente de

focagem, foram utilizados componentes de um rato ótico, uma vez que este dispunha de uma placa de circuito impresso onde se encontrava o sensor de imagem implementado com toda a eletrónica associada, Figura 3.23, assim como a lente de focagem (Figura 3.24), com um formato que permite a sua colocação na posição correta, simplificando todo o processo. Por fim, para o escoamento de fluido, foi utilizado um tubo flexível transparente, idêntico ao representado na Figura 3.25, com um diâmetro exterior de 6 mm e diâmetro interior de 4 mm.

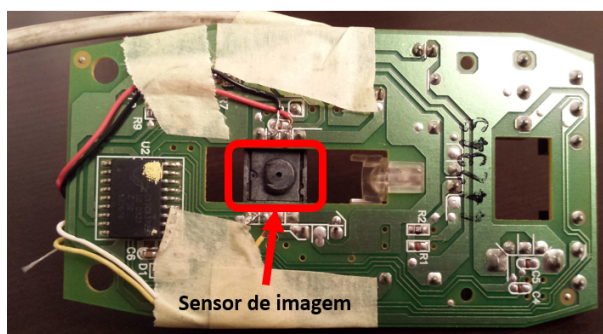


Figura 3.23 – Circuito impresso, com a eletrónica associada, retirado de um rato ótico

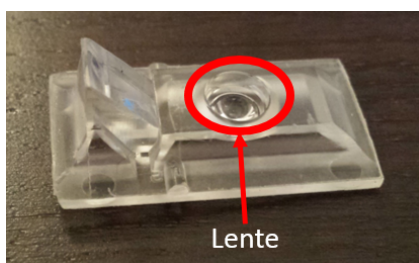


Figura 3.24 – Lente de focagem retirada de um rato ótico



Figura 3.25 – Tubo utilizado para a passagem de fluido

A escolha destes componentes, bem como o seu funcionamento, encontram-se explicados detalhadamente no capítulo 5, dedicado exclusivamente ao desenvolvimento deste transdutor.

3.3.2 Implementação dos componentes

De forma a implementar os componentes, tendo por base o esquema representado inicialmente pela Figura 3.22, foi desenvolvido um pequeno suporte, responsável pela fixação do tubo, do led e da lente de focagem, e ainda uma caixa utilizada para a colocação da placa de circuito impresso com toda a eletrónica.

Em relação ao suporte, representado pelas Figura 3.26 e Figura 3.27, este é constituído por um orifício que o atravessa horizontalmente de um lado ao outro, sendo que, na parte superior se encontra “aberto” de forma a ser possível fixar o componente que contem a lente de focagem, representado anteriormente pela Figura 3.24. Na zona inferior do suporte existe um orifício, em posição ortogonal, utilizado para a colocação do led RGB.

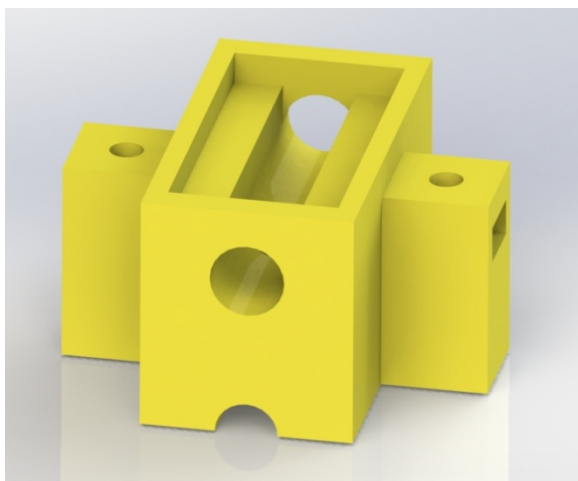


Figura 3.26 – Suporte para componentes do transdutor de caudal

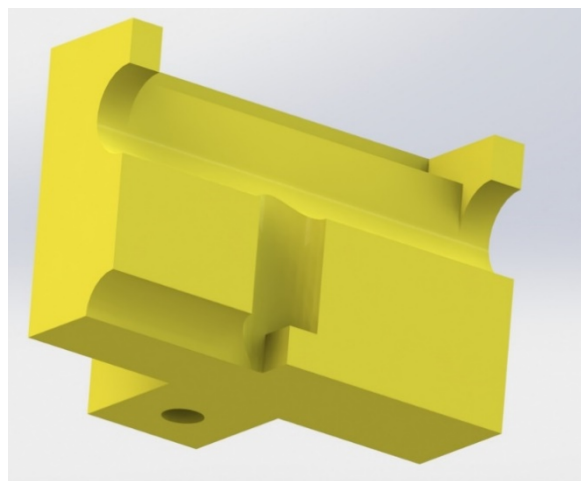


Figura 3.27 – Vista em corte do suporte para componentes do transdutor de caudal

Ainda na Figura 3.26 e na Figura 3.27 é possível verificar a existência de um rasgo com formato circular, existente na face inferior, utilizado para a passagem dos fios do RGB para o exterior do protótipo, e dois furos verticais colocados nas saliências laterais, utilizados para o sistema de fixação na caixa onde será colocado o circuito a eletrónico.

No que diz respeito à eletrónica implementada neste protótipo, como já foi referido, foi utilizada uma placa de circuito impresso de um rato ótico. A solução utili-

zada para a implementação da eletrónica no protótipo, de forma a encaixar no componente que contem a lente de focagem, foi através de uma caixa, fixa no suporte por intermédio de dois conjuntos de parafuso/porca, como representado na Figura 3.28 e na Figura 3.29, através do aperto entre o parafuso e a porca.

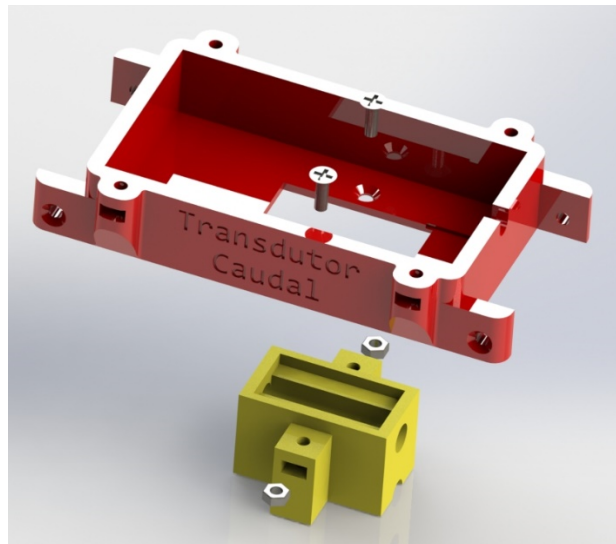


Figura 3.28 – Vista explodida da montagem entre o suporte e a caixa

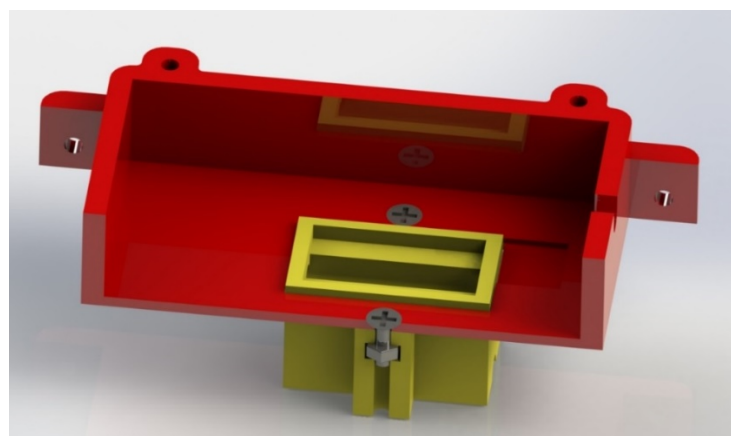


Figura 3.29 – Vista em corte da montagem entre o suporte e a caixa

Os quatro orifícios presentes na parte superior da caixa, assim como os quatro orifícios horizontais presentes nas saliências laterais, foram projetados para a fixação da caixa com outros componentes, nomeadamente uma tampa e a base do transdutor, apresentados no tópico seguinte.

A implementação dos componentes no protótipo final encontra-se representada na Figura 3.30, na Figura 3.31 e na Figura 3.32. Apenas não é possível visualizar o

led RGB devido a este se encontrar na parte inferior do tubo, estando a sua posição representada na Figura 3.30.

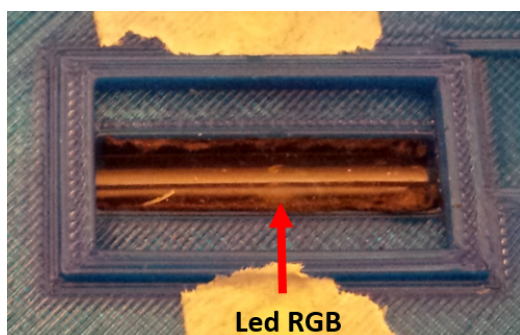


Figura 3.30 – Localização do tubo e o led RGB no protótipo final



Figura 3.31 – Localização da lente de focagem no protótipo final

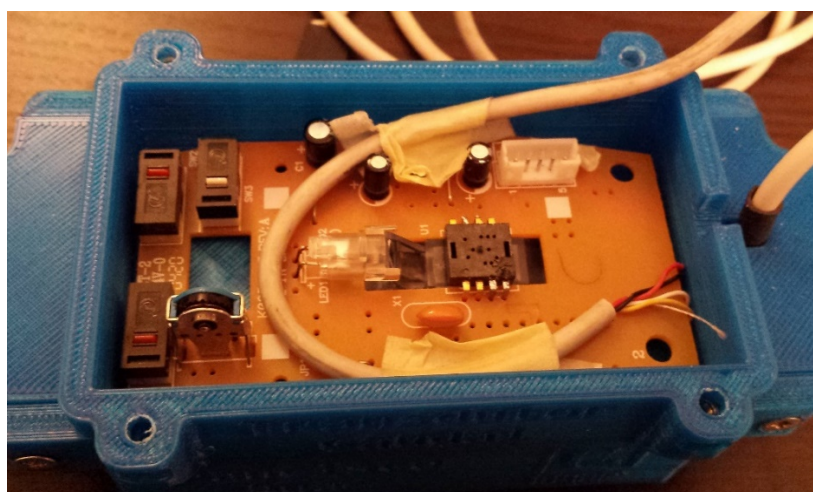


Figura 3.32 – Localização da placa de circuito impresso no protótipo final

3.3.3 Montagem final

De forma a ser possível implementar o transdutor desenvolvido em projetos distintos, foram utilizadas duas conexões do tipo SCK (Figura 3.33), em cada extremidade do tubo, sendo que, neste caso foram utilizadas conexões para tubos com o mesmo diâmetro (6 mm), podendo no entanto ser utilizadas ligações para diâmetros diferentes, consoante a aplicação.



Figura 3.33 – Conexão utilizada no protótipo final

Para a fixação das conexões ao exterior, assim como, para suportar as peças anteriormente apresentadas, foi criada uma base, com dimensões idênticas às da caixa da eletrónica, representada na Figura 3.34.

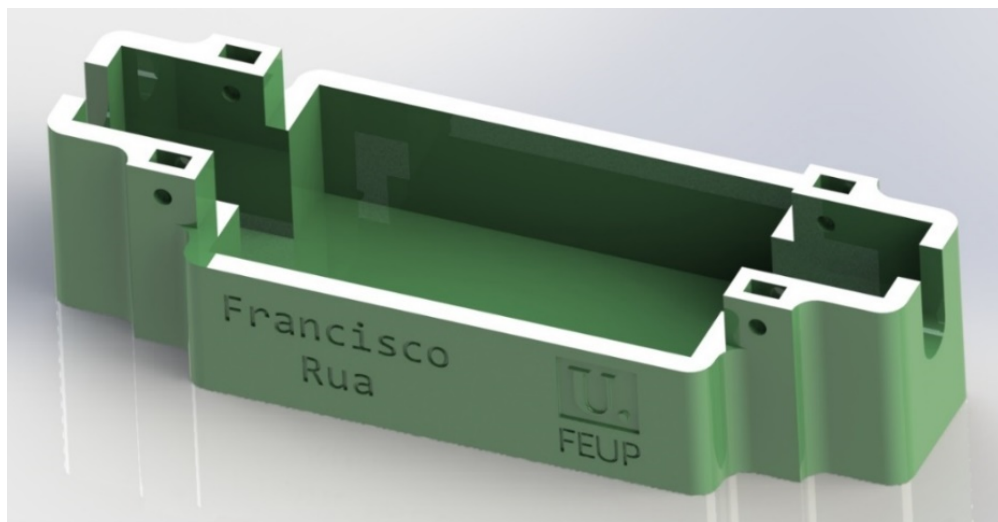


Figura 3.34 – Base do transdutor de caudal

Nas faces laterais mais pequenas é possível observar a existência de um rasgo utilizado para a colocação das conexões, sendo estas fixas por intermédio do aperto das porcas do elemento de conexão contra as paredes da base, como demonstrado na Figura 3.35.



Figura 3.35 – Fixação de uma conexão na base do protótipo final

Os orifícios presentes na parte superior da base são utilizados para a fixação desta à caixa da eletrónica e às tampas laterais do protótipo através de conjuntos porca/parafuso, tal como ilustrado na Figura 3.36 e na Figura 3.37.

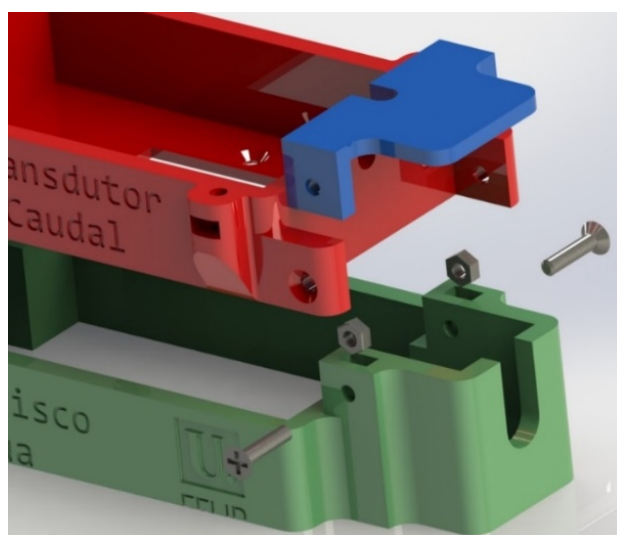


Figura 3.36 – Vista explodida da montagem entre a base, a caixa da eletrónica e a tampa lateral

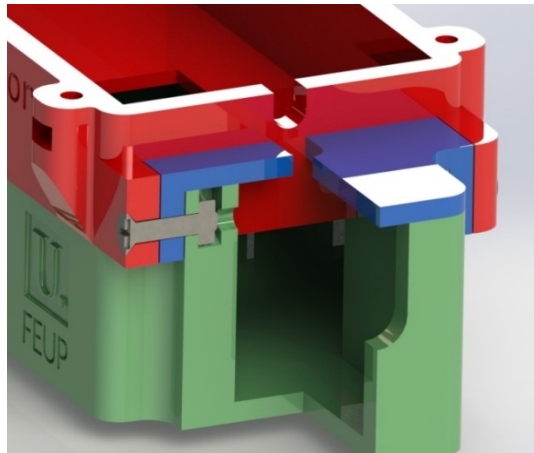


Figura 3.37 – Vista em corte da montagem entre a base, a caixa da eletrónica e a tampa lateral

Por fim, como referido inicialmente, existe também uma tampa para a parte superior da caixa da eletrónica, também esta fixa recorrendo a conjunto porca/parafuso, como se pode verificar na Figura 3.38, onde está representada a montagem final dos todos os componentes.

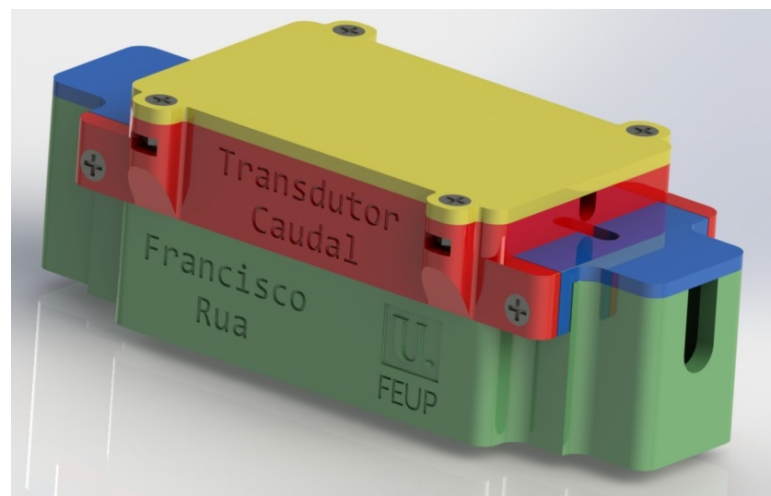


Figura 3.38 – Transdutor de caudal desenvolvido

3.4 Conclusão

A possibilidade de utilizar uma impressora 3D no desenvolvimento do projeto mecânico, embora apresente algumas limitações, no que diz respeito às geometrias das peças a serem impressas, revelou-se bastante útil, uma vez que permitiu obter as peças desenvolvidas num curto espaço de tempo, permitindo assim, verificar o correto funcionamento de todos os componentes através da realização de testes.

Embora o objetivo inicial de implementar os transdutores na própria válvula não tenha sido atingido devido ao tempo limitado para a elaboração da dissertação, a opção por criar um protótipo exclusivo para o transdutor de caudal tornou-se bastante útil para a validação do seu funcionamento, assim como para, a elaboração de testes.

Em relação ao sistema de atuação, considera-se que o protótipo desenvolvido apresenta umas dimensões um pouco exageradas, sendo que, recorrendo a um processo produtivo diferente da impressão 3D, e alterando o motor, por um de menores dimensões, como idealizado inicialmente, levará a uma solução para a atuação da válvula mais compacta. Todavia, a prova do conceito de funcionamento foi demonstrada.

4 Projeto eletrónico

4.1 Introdução

Toda a eletrónica associada ao desenvolvimento do protótipo aqui apresentado foi implementada tendo por base a utilização de microcontroladores para o controlo e comando da válvula, tal como foi efetuado na dissertação anterior. No entanto, devido aos requisitos impostos no desenvolvimento de um novo protótipo, a eletrónica do projeto anterior não pode ser utilizada, sendo desenvolvido um novo projeto de raiz.

Inicialmente, toda a eletrónica foi desenvolvida na placa de testes representada na Figura 4.1, com o objetivo de testar todos os componentes e as suas ligações, bem como, desenvolver os códigos em MPLAB referente a cada componente. Posteriormente, depois de estarem definidos todos os componentes a serem utilizados bem como, as suas ligações, foram desenvolvidas diversas placas de circuito impresso com o intuito de implementar toda a eletrónica no protótipo final.

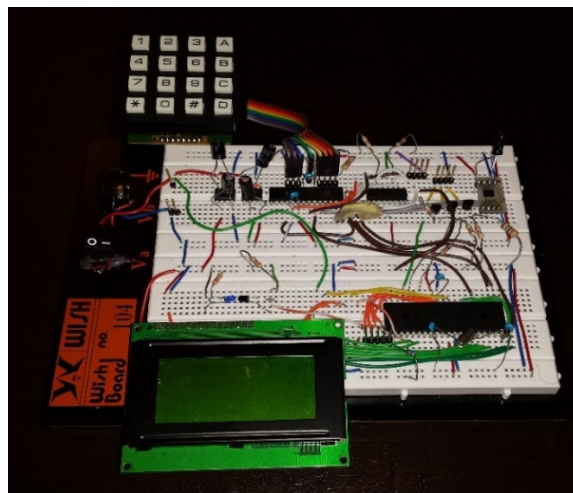


Figura 4.1 – Placa de testes utilizada para desenvolver o projeto eletrónico

De um modo geral, o projeto eletrónico pode ser dividido em dois módulos distintos; monitorização e comando, e atuação e controlo. Na Figura 4.2 estão representados estes dois módulos com os seus componentes principais, assim como a interligação entre estes. Em cada um dos módulos é utilizado um microcontrolador como elemento principal, responsável por controlar os periféricos respetivos.

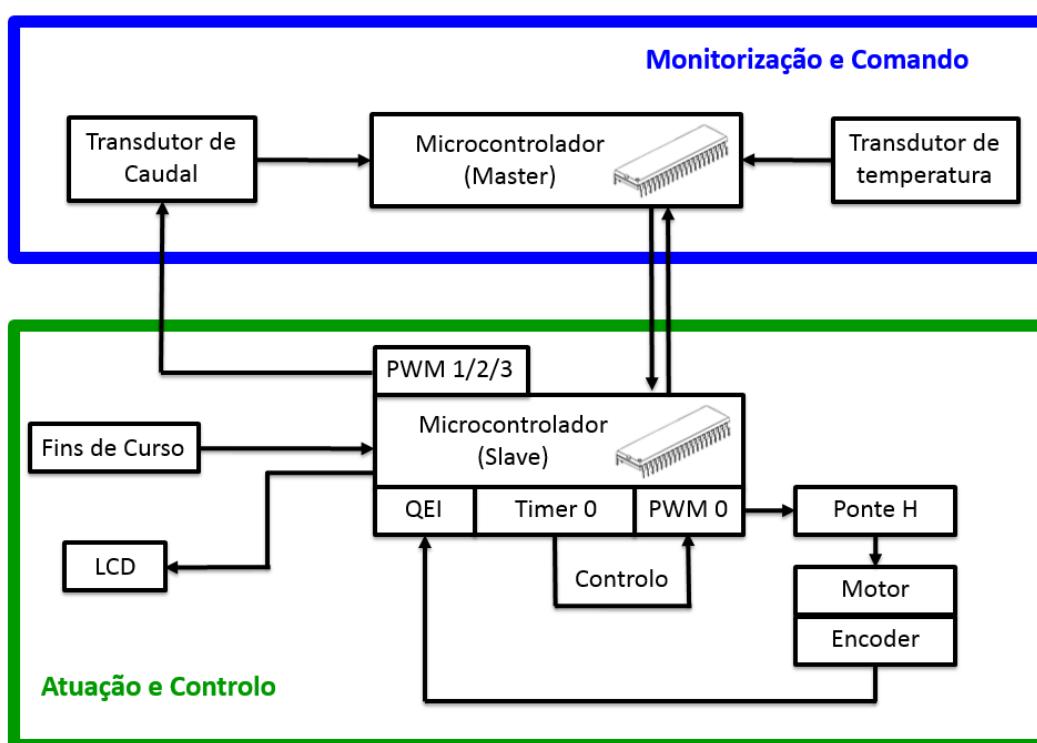


Figura 4.2 – Arquitetura representativa da divisão dos módulos

O primeiro módulo referente à monitorização e comando da válvula é o módulo principal, sendo responsável por comandar todas as fases de funcionamento. Este módulo tem como principais funções a leitura dos transdutores, de temperatura e de caudal, e a introdução de dados através de um teclado alfanumérico.

O segundo módulo, relativo à atuação e controlo, tem como principal objetivo o controlo do motor, bem como receber/enviar as informações de todos os componentes a ele associados, tais como dispositivos de fim de curso, encoder, LCD, etc..

No que diz respeito à implementação do projeto eletrónico no protótipo final, foram desenvolvidas, com auxílio do software *EAGLE*, duas placas de circuito impresso,

Figura 4.3 e Figura 4.4, referentes a cada um dos módulos. Uma vez que os conhecimentos relativos à produção de placas de circuito impresso eram bastante escassos, assim como do *software* utilizado, as placas foram desenvolvidas colocando os componentes de forma a tornar as ligações mais simples e obter, dentro do possível, com o tempo disponível, placas com um avançamento o mais reduzido possível.

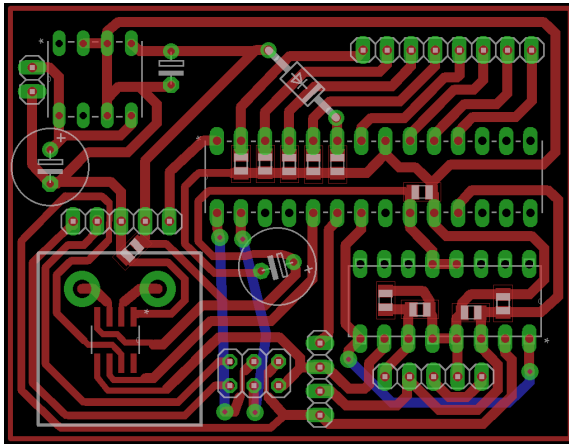


Figura 4.3 – Placa de circuito impresso do módulo de monitorização e comando

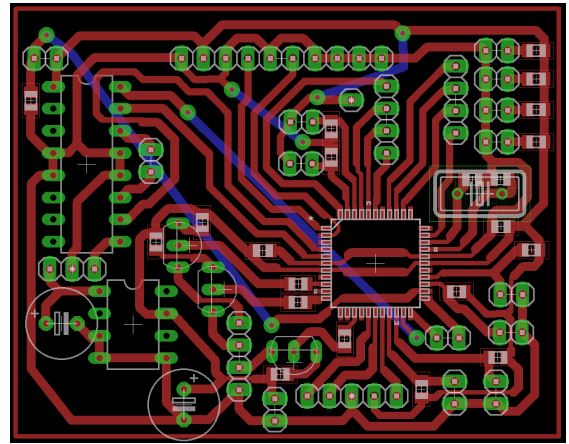


Figura 4.4 – Placa de circuito impresso do módulo de atuação e controlo

Na Figura 4.5 está ilustrado o resultado final do desenvolvimento das placas, sendo utilizada uma pequena placa de testes apenas para fazer as ligações relativas à alimentação e à interface homem-máquina (teclado e LCD)

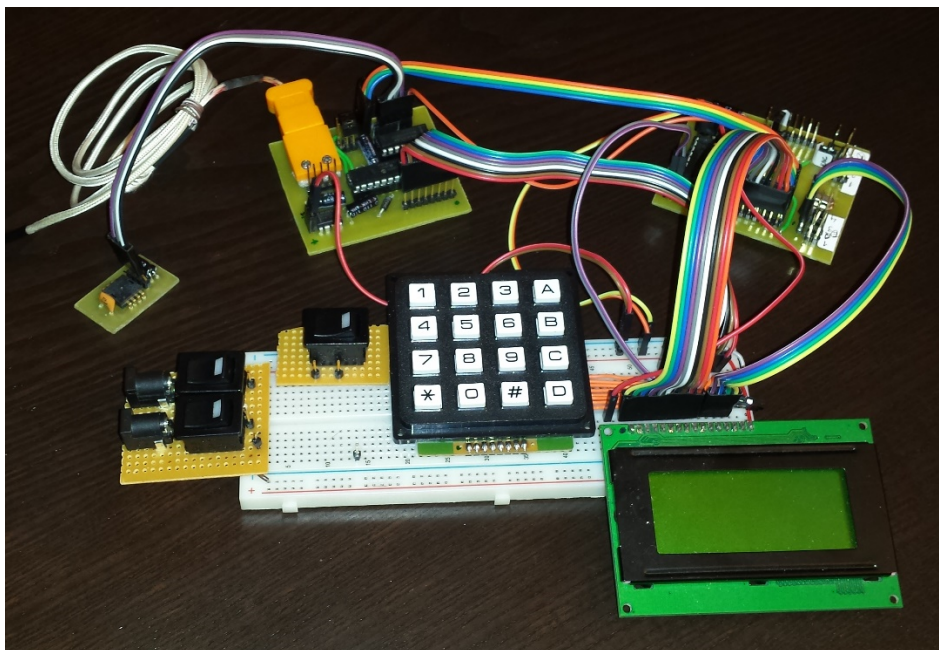


Figura 4.5 – Projeto eletrónico final

Tendo por base a constituição do projeto eletrónico descrito, neste capítulo será feita uma abordagem sobre os microcontroladores utilizados e suas características mais relevantes, sendo depois abordados, de uma forma mais aprofundada, os dois módulos deste projeto.

4.2 Microcontroladores

Muitas vezes confundidos com microprocessadores, os microcontroladores são, na realidade, a junção de diversos periféricos a um microprocessador num só dispositivo eletrónico, ou seja, um microcontrolador pode ser definido como um dispositivo eletrónico constituído por um microprocessador programável, memórias RAM (*Random Access Memory*) e ROM (*Read Only Memory*), portas digitais I/O (Input/Output), conversores analógicos/digitais, entre outros periféricos, tal como representado no esquema da Figura 4.6.

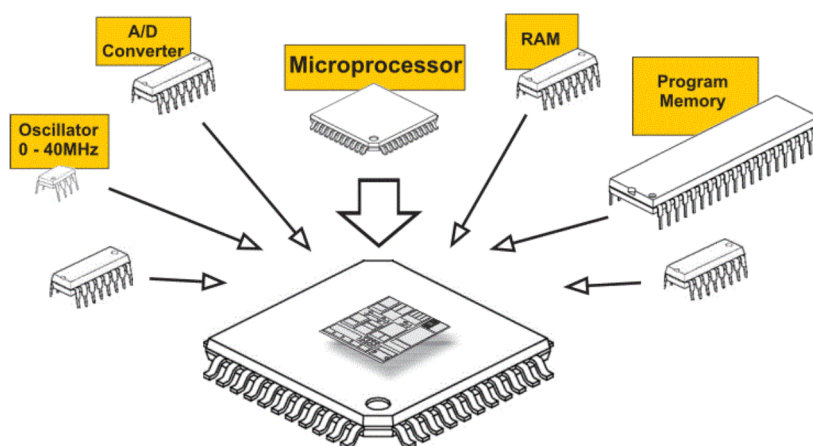


Figura 4.6 – Periféricos integrados num microcontrolador[14]

A utilização de um microcontrolador em detrimento de outro elemento de comando, como um autómato por exemplo, deve-se a fatores como o preço, tamanho e funções disponibilizadas. No que diz respeito aos dois primeiros fatores, o microcontrolador é sem dúvida uma escolha mais vantajosa, apresentando um preço claramente inferior, custando apenas alguns euros contra as centenas de euros pelos autómatos, e umas dimensões bastante reduzidas (alguns milímetros). Em relação às funções disponibilizadas, os microcontroladores apresentam a vantagem de possuir diversas funcionalidades já incorporadas, no entanto, consoante a aplicação, o uso de um microcontrolador poderá não ser tão adequado.

4.2.1 Escolhas efetuadas

Existem atualmente no mercado diversas empresas dedicadas à produção de microcontroladores, sendo que algumas, como a "*Microchip*", atual líder neste mercado, disponibiliza amostras grátis com o objetivo de possibilitar, a um eventual comprador, a realização de testes e assim poder escolher qual o microcontrolador que se enquadra melhor com a sua aplicação.

A escolha dos microcontroladores utilizados para o projeto eletrónico foi feita enquadrando os requisitos do sistema com as amostras disponibilizadas pela "*Microchip*".

4.2.1.1 Módulo de atuação e controlo

Uma vez que o microcontrolador utilizado neste módulo tem como principal função a atuação e controlo do motor, o componente selecionado tem de ser capaz de efetuar as seguintes tarefas:

- Atuar o motor nos dois sentidos de rotação;
- Capacidade de ler o transdutor de posição;
- Leitura dos dispositivos de fim de curso utilizados;
- Possibilidade de comunicação com o exterior de forma a ser implementável também noutros sistemas.

A escolha recaiu sobre o microcontrolador da família PIC18FXX31, um micro de 8 bits, que disponibiliza módulos como o PWM (*Pulse-Width Modulation*), ou MLI (Modulação de Largura de Impulsos), e o QEI (*Quadrature Encoder Interface*), utilizados para o comando do motor e leitura de sinais provenientes de um *encoder* respetivamente.

Em termos de dispositivos de fim de curso, este microcontrolador apresenta várias entradas/saídas digitais e ainda conversores analógico/digital associado a 9 entradas, que poderão ser utilizadas para a implementação de um transdutor de posição absoluto, alternativo ao *encoder*.

Este microcontrolador disponibiliza ainda um módulo SSP (*Synchronous Serial Port*), que possibilita a comunicação com outros microcontroladores, por intermédio de protocolos como SPI (*Serial Peripheral Interface*) ou I²C (*Inter-Integrated Circuit*).

A escolha deste microcontrolador também teve em conta a capacidade de ligação a um LCD (8 saídas digitais) como output de dados, e ainda a capacidade de efetuar um ajuste ao transdutor de caudal, sendo necessário 3 geradores PWM independentes, como será explicado no capítulo dedicado a este transdutor.

A seleção final recaiu sobre o PIC18F4431, pelo facto de o módulo PWM apresentar 4 geradores independentes, sendo um utilizado para a atuação do motor e os restantes 3 para o transdutor de caudal. A existência de 40 pinos, neste microcontrolador, também foi um dos fatores que influenciou a sua escolha, possibilitando a implementação todas as ligações necessárias.

4.2.1.2 Módulo de monitorização e comando

Numa fase inicial do desenvolvimento do protótipo apenas estava prevista a utilização de um microcontrolador, no entanto, devido aos protocolos de comunicação utilizados para comunicar com os transdutores de temperatura e caudal, foi necessário a implementação de um novo microcontrolador que fosse capaz de fazer a “gestão” de todas as comunicações, apresentando as seguintes características:

- Comunicação com o módulo de atuação;
- Monitorização dos transdutores de caudal e temperatura;
- Possibilidade de comunicação com o “exterior”;
- Implementação de um teclado alfanumérico para input de dados.

A escolha recaiu noutra microcontrolador de 8 bits, desta vez o PIC18F46J50 que apresenta dois módulos MSSP (*Master Synchronous Serial Port*), idênticos ao módulo SSP apresentado anteriormente, sendo um dos módulos utilizado para comunicação com o outro microcontrolador e com os transdutores, por intermédio do protocolo SPI, deixando o segundo módulo MSSP livre para uma possível comunicação com o exterior. Este microcontrolador apresenta ainda um módulo USB disponível para uma possível ligação a um computador, por exemplo.

4.2.2 Comunicação SPI

O protocolo de comunicação utilizado para a comunicação entre os dois microcontroladores e entre o microcontrolador, referente à monitorização, e os transdutores é o SPI (*Serial Peripheral Interface*). Este é um protocolo baseado na ideologia *Master-Slave*, no qual existe um dispositivo *Master*, responsável pelo início de todas as comunicações, que pode comunicar com um ou mais dispositivos *Slave*.

Por se tratar de um protocolo de comunicação síncrono, existe a necessidade da utilização de um sinal de *clock* (relógio) controlado pelo *Master*, que controla todos os "*timings*" da comunicação.

O SPI é também um protocolo baseado na troca de informação, isto é, em todas as comunicações existe uma troca de informação entre o *Master* e o *Slave*, não sendo possível a existência de um dispositivo que apenas envie ou apenas receba informação.

No caso de existir uma necessidade de um *Master* comunicar com vários *Slaves* é necessário possibilitar a escolha com o qual será feita a comunicação. Para isso é utilizada uma saída digital do *Master* para cada um dos seus *Slaves*. Estas saídas digitais normalmente encontram-se com o valor lógico 1, tomando o valor 0 quando se pretende estabelecer uma comunicação com o respetivo *Slave*.

A comunicação SPI é tradicionalmente composta por 4 fios de ligação, dois responsáveis pela troca de informação, SDI (*Serial Data Input*) e SDO (*Serial Data Output*) e os outros dois responsáveis pelo controlo da comunicação, SCK (*Serial Clock Signal*), utilizado para enviar o sinal de *clock*, e SS (*Slave select*) que permite a seleção do *slave* para a comunicação, tal como representado na Figura 4.7.

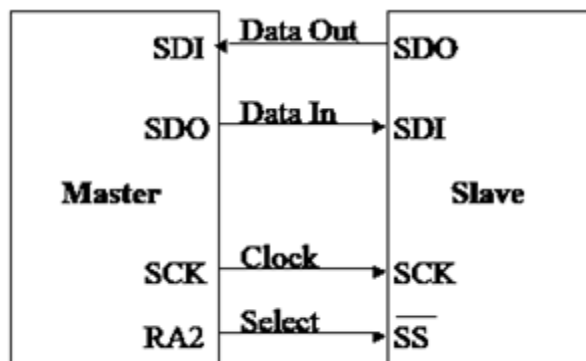


Figura 4.7 – Ligações SPI entre Master e Slave[15]

4.3 Atuação e controlo

4.3.1 Componentes Eletrónicos

Microcontrolador

Como foi justificado anteriormente, o microcontrolador utilizado para o controlo deste módulo foi o PIC18F4431, sendo as suas características mais relevantes para a sua escolha a existência de 4 geradores PWM independentes e o módulo QEI que facilita a implementação do encoder.

Este microcontrolador é caracterizado por pertencer à família de 8 bits da Microchip, isto é, baseia-se numa arquitetura de 8 bits de dados e 16 bits por instrução. Necesita de uma alimentação entre 4,2V e 5,5V e possui um oscilador interno que pode variar entre 31kHz e 8MHz. A velocidade de processamento pode chegar a atingir 48 MHz através do uso de um cristal externo.

Inicialmente, na placa de testes, este microcontrolador foi utilizado com um encapsulamento do tipo PDIP (Figura 4.8), facilitando a montagem/desmontagem na placa. Posteriormente, ao produzir as placas de circuito impresso, foi utilizado um encapsulamento do tipo TQFP (Figura 4.9) de forma a reduzir o tamanho da placa.



Figura 4.8 – Encapsulamento PDIP



Figura 4.9 – Encapsulamento TQFP

Embora a Microchip também disponibilize este microcontrolador na versão LF (PIC18LF4431), o que significa que poderia ser alimentado numa gama de alimentação mais alargada, nomeadamente com uma tensão de 3,3V idêntica à do outro microcontrolador, esta hipótese foi posta de parte por dois motivos. Em primeiro lugar pelo facto de a gama de alimentação diminuir à medida que se aumenta a frequência do oscilador e, uma vez utilizado um oscilador externo de 16MHz, implicaria que os 3,3V

iriam estar próximos do valor mínimo de alimentação, podendo introduzir alguns problemas de funcionamento fiável. O segundo motivo está relacionado com a simplificação da placa de circuito impresso, uma vez que existe a necessidade de alimentar outros componentes deste modulo com uma alimentação de 5V, tornando-se mais simples ter todos os elementos do circuito alimentados com a mesma tensão.

No que diz respeito aos pinos, tal como em todos os microcontroladores da Microchip, estes são multiplexados, ou seja, cada pino pode ser individualmente programado para uma das várias funções disponíveis, como saída digital, entrada analógica, saída PWM, etc.. As funções disponíveis para cada pino estão representadas na Figura 4.10. Na Tabela 4.1 – Utilização dos pinos do PIC18F4431 está descrita qual a utilização dada a cada pino.

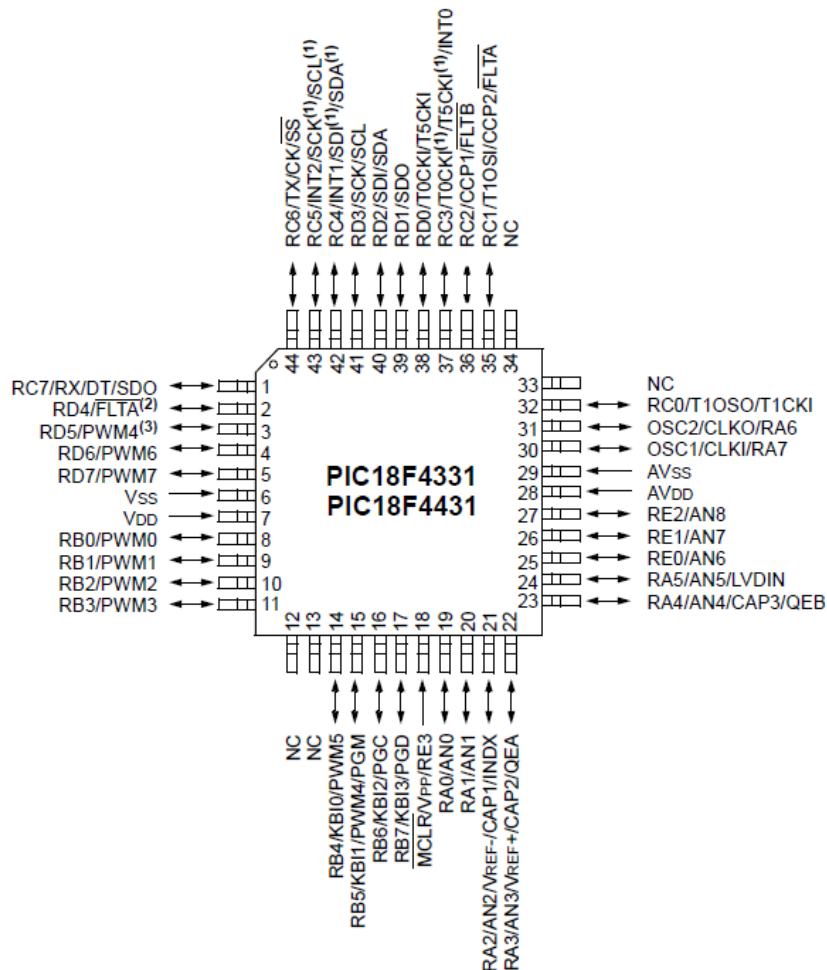


Figura 4.10 – Diagrama de pinos do PIC18F4431 para o encapsulamento TQFP [16]

Tabela 4.1 – Utilização dos pinos do PIC18F4431

Pino	Utilização	Pino	Utilização
1	LCD	23	Encoder (B)
2	LCD	24	Escolha estado inicial
3	-----	25	Entrada analógica
4	Motor	26	Entrada analógica
5	Motor	27	-----
6	GND	28	+5V
7	+5V	29	GND
8	-----	30	Cristal externo
9	RGB (vermelho)	31	Cristal externo
10	-----	32	LCD
11	RGB (azul)	33	-----
12	-----	34	-----
13	-----	35	LCD
14	RGB (verde)	36	LCD
15	-----	37	LCD
16	-----	38	-----
17	-----	39	SPI (SDO)
18	-----	40	SPI (SDI)
19	Fim de curso	41	SPI (SCK)
20	Fim de curso	42	Fim de curso de emergência
21	Ponte H	43	Fim de curso de emergência
22	Encoder (A)	44	SPI (SS)

Oscilador

A necessidade de utilização de um oscilador externo deveu-se ao facto de os 8MHz disponibilizados pelo cristal interno do microcontrolador, não serem suficientes para gerar um sinal de PWM com uma frequência suficientemente elevada que não fosse audível.

Foi utilizado um oscilador de cristal de quartzo com uma frequência de 16MHZ, idêntico ao representado na Figura 4.11, que utiliza a ressonância de um cristal de um material piezoelétrico, nomeadamente o quartzo, de forma a criar um sinal elétrico com uma frequência precisa. O cristal utilizado apresenta uma frequência de 16MHZ



Figura 4.11 – Oscilador externo utilizado

Regulador de tensão

Para que todos os componentes deste módulo sejam alimentados com uma tensão de 5V é necessário a utilização de um regulador de tensão na entrada. O regulador escolhido foi o MAX 667 (Figura 4.12), da empresa *Maxim Integrated*, que permite uma tensão de entrada de 3.5V até 16.5V, apresentando à saída uma tensão estável de 5V com uma corrente máxima de 250mA.

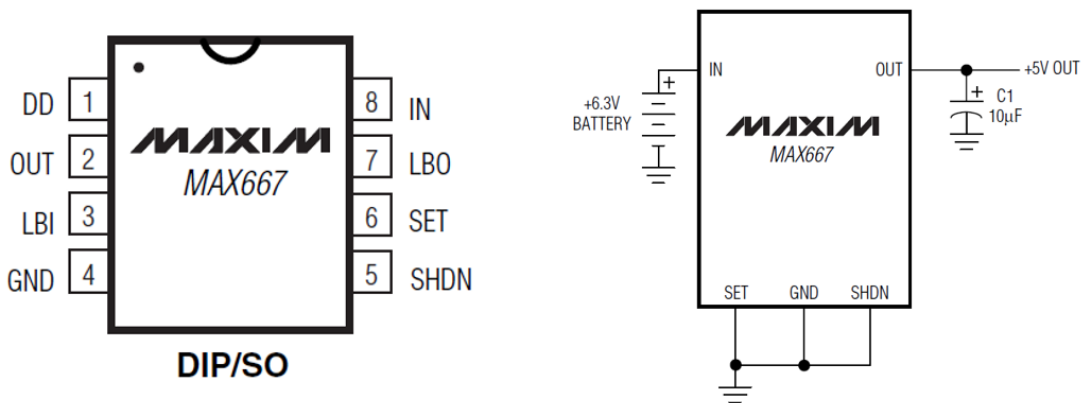


Figura 4.12 – Diagrama de pinos do regulador de tensão MAX 667 e montagem do mesmo

Dispositivos de fim de curso & estado inicial

De forma a minimizar a existência de contato entre componentes, originando desgaste e criando forças de atrito, em termos funcionais, foram utilizados dois dispositivos de fim de curso baseados em tecnologia ótica. Como segurança, em caso de falha muito grave e imprevisível do sistema, foram também implementados dois dispositivos de fim de curso mecânicos, idênticos aos utilizados na dissertação anterior.

Os dispositivos de fim de curso funcionais são constituídos por um led emissor de infravermelhos (940 nm) e um foto-transistor recetor no mesmo comprimento de

onda. O princípio de funcionamento deste sensor baseia-se na atuação de um transístor sensível à radiação infravermelha (foto-transístor), onde a corrente que passa pelo transístor é proporcional à intensidade de radiação.

Na Figura 4.14 está representado o modo de funcionamento deste dispositivo de fim de curso, colocando o led de infravermelhos a emitir na direção do recetor, atuando, assim, o fototransistor. Quando o fim de curso é atingido, existe um barreira que impede a radiação de chegar ao recetor, ficando assim o transístor aberto.

A leitura deste sensor é feita através do valor da tensão no pino coletor do transístor, como representado na Figura 4.14, apresentando um valor aproximado de 5V quando atuado, e um valor de 0V para a uma posição de não atuado.

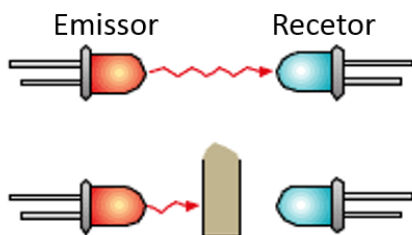


Figura 4.13 – Funcionamento do dispositivo de fim de curso funcional

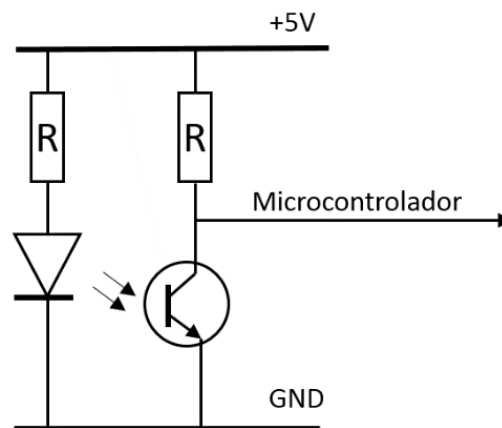


Figura 4.14 – Circuito elétrico associado ao dispositivo de fim de curso funcional

Em relação aos dispositivos de fim de curso de emergência foram utilizados dois *micro switches* inversores (Figura 4.15), que são atuados conforme foi explicado no capítulo referente ao projeto mecânico. A montagem deste componente é feita como se fosse um *switch* normalmente fechado, sendo aberto quando o fim de curso é atingido, como representado na Figura 4.16.



Figura 4.15 – *Micro switch* mecânico utilizado.

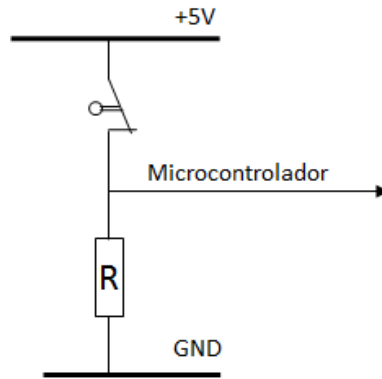


Figura 4.16 – Circuito elétrico associado ao dispositivo de fim de curso mecânico

Desta forma é possível garantir que os dispositivos de fim de curso de emergência, em termos eletrônicos, estão a funcionar devidamente, uma vez que a entrada digital do microcontrolador se encontra sempre com um valor de 5V, apresentado um valor de 0V em casos de emergência (dispositivo atuado) ou por este não se encontrar em funcionamento.

Seleção do estado inicial

Um dos objetivos principais do desenvolvimento da válvula consistiu na possibilidade de escolha do seu estado inicial, ou estado de repouso, como sendo normalmente aberto ou normalmente fechado. A solução utilizada passa pela implementação de um *switch* mecânico biestável (Figura 4.17), ligado ao microcontrolador de forma idêntica à dos dispositivos de fim de curso de emergência (Figura 4.16). Assim é possível definir o estado inicial pretendido, com a válvula desligada, sendo este requisito satisfeito apenas após a inicialização do sistema.



Figura 4.17 – *Switch* mecânico utilizado para seleção do estado inicial

Ponte H

De forma a ser possível atuar o motor em ambos os sentidos (abrir e fechar a válvula) recorreu-se a uma ponte H, como a representada esquematicamente na Figura 4.18. Esta ponte é constituída por 4 transístores que, atuados de forma alternada, permitem que a corrente atravessa o motor em sentidos diferentes, tal como representado.

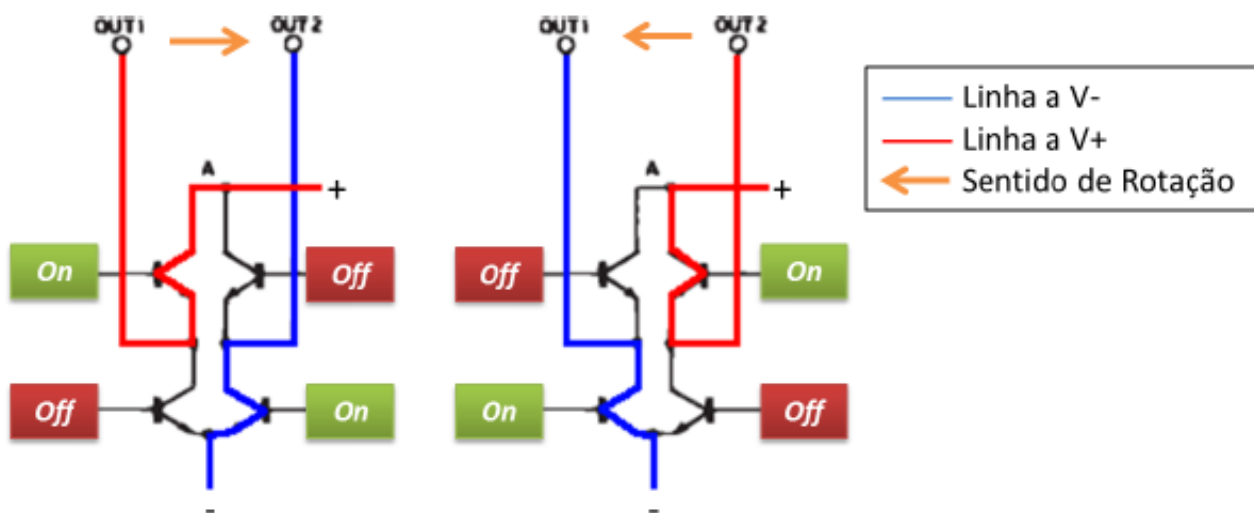


Figura 4.18 – Princípio de funcionamento da ponte H

A implementação desta ponte no circuito foi feita através de um circuito integrado da *ST Microelectronics*, o L293D, que contém uma ponte H incorporada, assim como, os díodos de roda livre, que possibilitam a dissipação de toda a energia acumulada nas bobinas do motor, prevenindo assim, os efeitos negativos que a força contra-electromotriz produziria no circuito.

Para a utilização deste circuito integrado são necessárias duas alimentações: uma relativa a eletrónica associada, idêntica à dos restantes componentes utilizados neste módulo (5V), e outra referente à alimentação do motor, podendo variar entre os 4.5V e os 36V. Este circuito integrado apresenta ainda uma capacidade de corrente de 600mA por canal.

Motor & Encoder

O motor escolhido inicialmente para implementar no protótipo era um motor DC (Figura 4.19) idêntico ao utilizado na dissertação anterior, sendo este, de dimensões superiores e com um binário bastante mais elevado (12 kg/cm a 6 V), podendo ser alimentado com uma tensão entre 4.8V e 7.2V.



Figura 4.19 – Motor DC escolhido inicialmente mas não utilizado

No entanto, devido a problemas relacionados com a encomenda deste componente, optou-se pela utilização de um motor DC disponível no laboratório (Figura 4.20), que apresenta como principal vantagem, o fato de ter já incorporado um *encoder* (Figura 4.21).



Figura 4.20 – Motor DC utilizado no protótipo final



Figura 4.21 – Encoder utilizado

No que diz respeito ao motor, este apresenta uma gama de alimentação que pode ir até aos 30V. Em termos funcionais, isto é, com o motor montado no protótipo,

verificou-se que seria necessário ter uma alimentação mínima de aproximadamente 4.5V, sendo que, para uma velocidade razoável de abertura/fecho da válvula, são necessários cerca de 12V.

Em relação ao *encoder*, este possui uma pista com 448 divisões e dois sensores colocados em quadratura, possibilitando uma resolução de 1792 impulsos por rotação. O *encoder* necessita de uma alimentação de entre 2.5V e 5V, compatível com todo o circuito eletrónico.

Transístores & Led RGB

Este conjunto, composto por 3 transístores NPN (Figura 4.22), e um led RGB (Figura 4.23), é utilizado para fazer um ajuste da luminosidade fornecida ao transdutor de caudal, como explicado no capítulo referente a este transdutor.

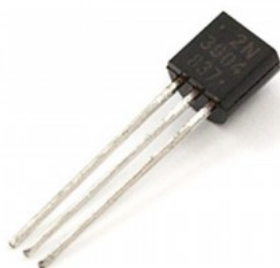


Figura 4.22 – Transistor NPN utilizado

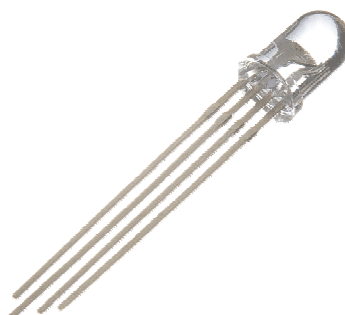


Figura 4.23 – Led RGB utilizado

As ligações entre estes componentes estão representadas na Figura 4.24. Ao atuar os transístores através dos geradores de PWM do microcontrolador, é possível variar a corrente média que passa em cada um dos LED's referentes às cores, vermelho, azul e verde e, assim, variar a sua intensidade luminosa, criando uma grande variedade de cores.

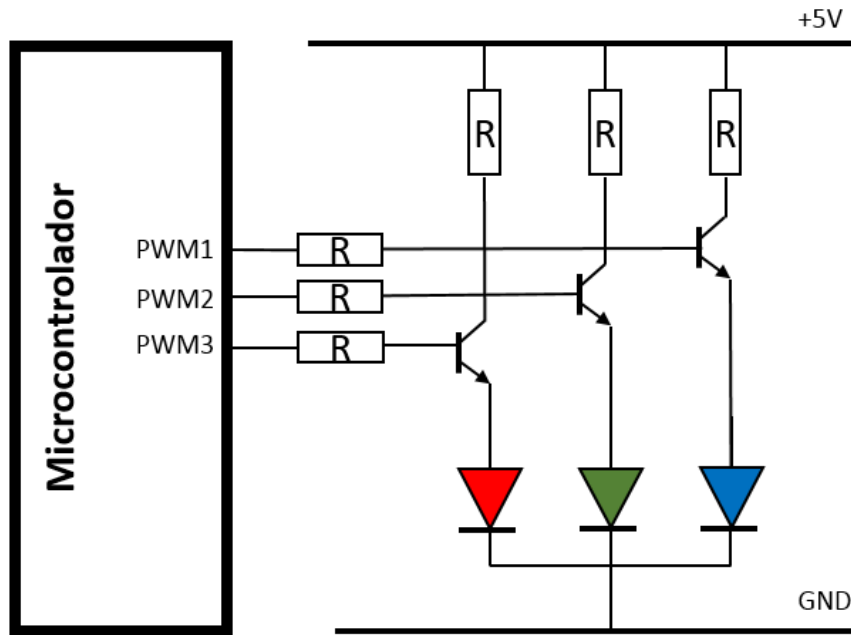


Figura 4.24 – Circuito elétrico relativo à atuação do led RGB

As resistências utilizadas para o RGB foram dimensionadas de forma a obter uma corrente máxima de 20mA. Em relação à atuação dos transístores foram utilizadas resistências de forma a obter uma corrente ligeiramente superior à corrente mínima necessária à atuação.

Display LCD

Este foi um dos primeiros componentes a serem implementados no circuito porque, para além de fazer parte da interface do protótipo final, a utilização do display foi bastante útil na fase de testes, disponibilizando os dados necessários para uma correta validação.

O display utilizado foi um LCD de 4 linhas, com 16 caracteres por linha (Figura 4.25). Este dispositivo necessita de uma alimentação de 5V e possibilita a utilização de retroiluminação. A ligação ao microcontrolador é feita por intermédio de 6 fios.

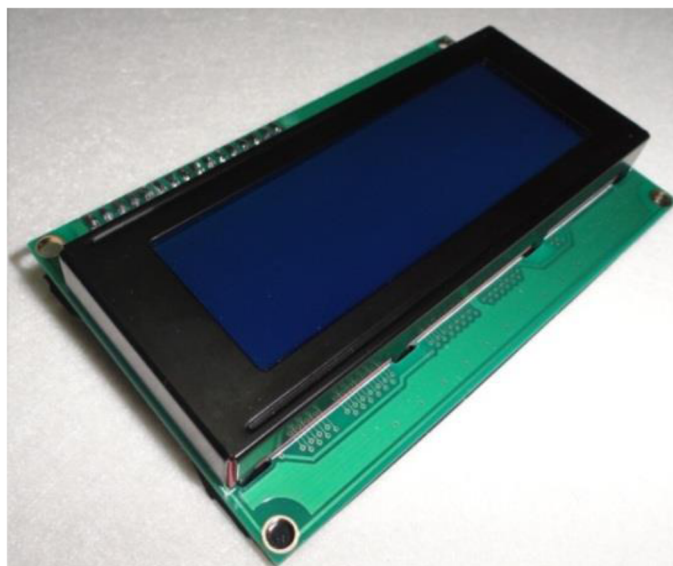


Figura 4.25 – Display LCD utilizado.

4.3.2 Funcionamento do motor

4.3.2.1 Atuação

O método utilizado para a atuação e controlo do motor foi a utilização de sinais de PWM gerados pelo microcontrolador, associados a uma ponte H, de forma a possibilitar a atuação do motor nos dois sentidos.

De forma a ser possível atuar a ponte em ambos os sentidos foi necessário utilizar um dos geradores de sinais PWM do microcontrolador em modo complementar. Neste módulo são utilizados dois pinos do microcontrolador que geram sinais complementares, por exemplo, para um *duty cycle* de 75%, um dos pinos apresenta uma saída que se encontra com valor lógico 1 durante 75% do período, e no outro pino a saída encontra-se com valor lógico 1 durante 25% do período. Conjugando estes dois sinais com a lógica associada a uma ponte H obtemos uma saída para o motor como a representada na Figura 4.26.

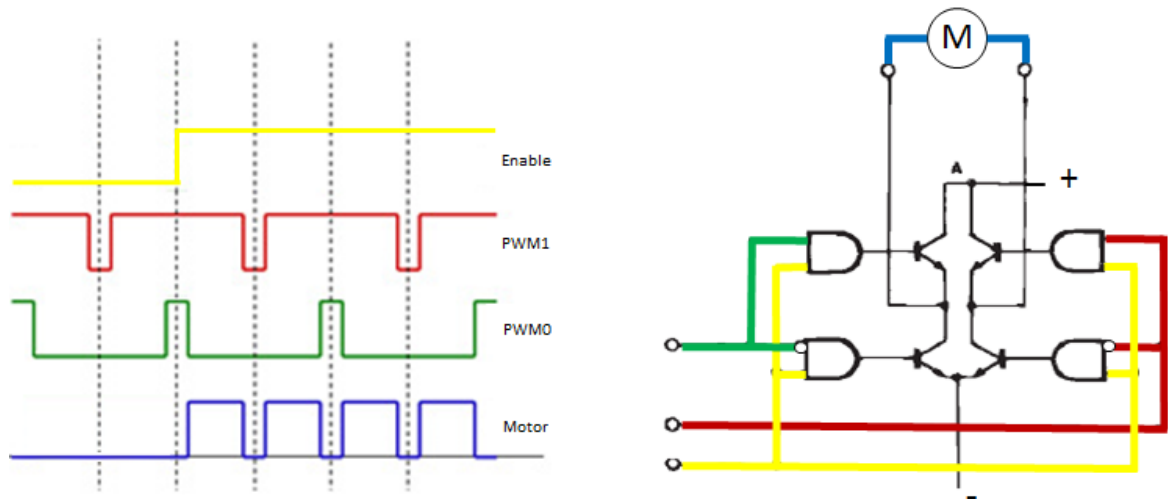


Figura 4.26 – Esquema representativo da alimentação do motor

Como se verifica pela análise da Figura 4.26, podemos concluir que, estando a ponte alimentada ($Enable=1$), o motor apenas é alimentado quando somente um dos sinais de PWM (0 ou 1) toma valor lógico 1, sendo o valor do *Duty Cycle* definido para o gerador de PWM diferente do valor do *Duty Cycle* fornecido ao motor.

Na Tabela 4.2 está representado o valor do *Duty Cycle* fornecido ao motor para diferentes valores de *Duty Cycle* do PWM, assim como a referente tensão aplicada, considerando uma alimentação de 10V.

Tabela 4.2 – Valores da tensão aplicada do motor em função do *duty cycle* do PWM definido

<i>Duty Cycle</i> PWM (%)	<i>Duty Cycle</i> Motor (%)	Tensão aplicada ao motor (V)
0	100	-10
25	50	-5
50	0	0
75	50	5
100	100	10

Como se pode verificar pela análise da tabela, para um valor do *duty cycle* do PWM de 50%, o motor encontra-se parado, e para os valores extremos, 0% e 100%, o motor roda à velocidade máxima em sentidos opostos.

No que diz respeito ao gerador de PWM, para além de ser definido em modo complementar, é necessário também definir qual a resolução pretendida, assim como, a sua frequência. Para a definição destes parâmetros foi utilizada uma metodologia proposta por [16], na qual existe uma relação entre estes dois parâmetros, pelo que a escolha de um influencia o outro.

Numa primeira fase foi definida uma resolução para o gerador de PWM de 10 bits, no entanto, com o microcontrolador a trabalhar a uma frequência de 8 MHz (frequência máxima), o PWM apresenta uma frequência de 7.8KHz, bem dentro da gama de frequências audíveis.

Houve então a necessidade de recorrer a um cristal externo, de forma a aumentar a frequência de trabalho do microcontrolador e, conseqüentemente, a frequência do PWM. Utilizando um cristal externo com uma frequência de 16MHz e definindo o PWM com uma resolução de 10 bits, obtém-se uma frequência de aproximadamente 16 KHz, que, embora ainda se encontre dentro da gama de frequências audíveis, já se encontra próximo do seu limite superior.

Em termos práticos, devido a atritos mecânicos por falta de acamamento existente na válvula, verificou-se que existe uma zona morta considerável, havendo uma necessidade de a compensar. Esta compensação foi feita em termos de programação, como será explicado no capítulo referente a este tema.

4.3.2.2 Leitura de Posição e Velocidade

Para efetuar a leitura da posição do motor foi utilizado o encoder, já apresentado, juntamente com o módulo QEI (*Quadrature Encoder Interface*) que permite, para além da leitura da posição, uma leitura da velocidade instantânea do motor. Embora a leitura da velocidade não seja um dado muito relevante, uma vez que se pretende fazer controlo de posição, torna-se bastante útil quando se pretende utilizar controladores com a componente derivativa, como será visto mais a frente.

Em relação à leitura de posição, esta é feita através de uma contagem das transições detetadas em cada uma das fases, ascendente e descendente. Na Figura 4.27 está representada a evolução do sinal transmitido por cada uma das fases, A e B, quando o motor roda nos dois sentidos, assim como, a posição relativa dos dois sensores.

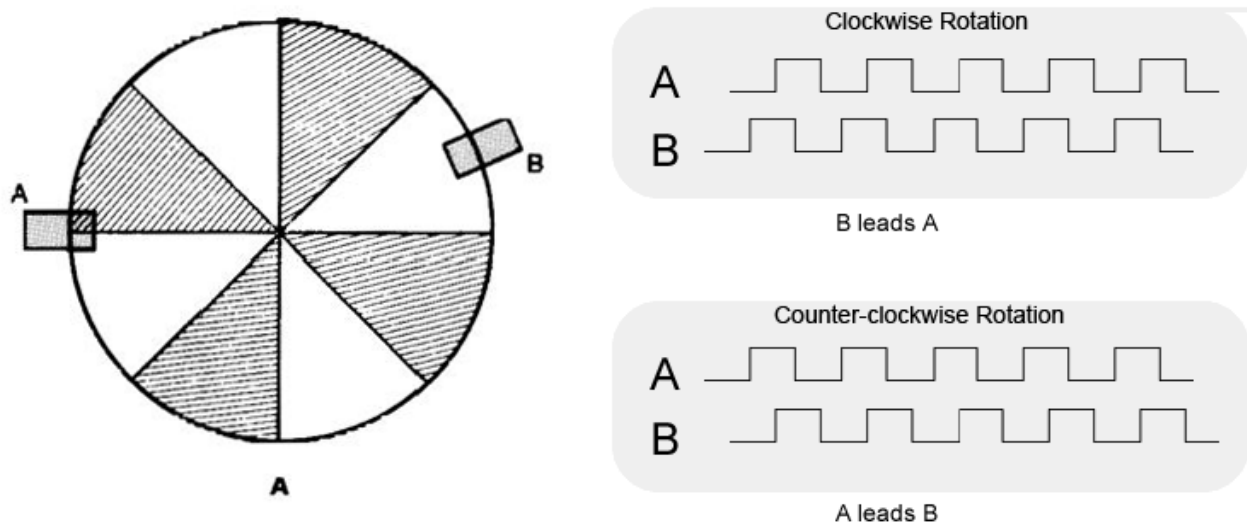


Figura 4.27 - Esquema representativo do funcionamento do *encoder*

É de notar que a uma ranhura do *encoder* corresponde um período do sinal representado (distância entre duas transições ascendentes de uma das fases por exemplo) pelo que, para cada ranhura, é possível detetar 4 transições, duas na fase A e duas na fase B. Por este motivo é possível obter uma resolução de 1792 impulsos por rotação, apesar de só existirem 448 divisões.

No que diz respeito à leitura da velocidade, foi necessário conjugar a utilização de um timer com o modo QEI. O valor da velocidade é então obtido através da contagem do número de ciclos de relógio do Timer5 detetadas entre duas transições consecutivas do *encoder*.

Como tal, pretende-se que o período do timer seja o menor possível, de forma a maximizar o número de ciclos de relógio entre impulsos. No entanto, verificou-se que, em termos práticos, um período muito reduzido pode causar alguma instabilidade do sistema. Foi então, utilizado o Timer5 do microcontrolador com uma frequência de 2MHz, ou seja, um período de 2 μ s entre cada impulso.

4.3.2.3 Controlo em malha fechada

Sendo o motor a controlar um motor DC de escovas, o seu modelo standard entre a tensão aplicada $U(s)$ e a velocidade $\Omega(s)$ pode ser representado por uma função de transferência de 1ª ordem e tipo 0, como representado na equação (2.10), sendo K o ganho em regime permanente entre a tensão aplicada e a velocidade do motor e T a sua constante de tempo[17].

$$FT = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (2.10)$$

Uma vez que se pretende controlar a posição do motor e não a sua velocidade, então, a função de transferência entre a tensão aplicada $U(s)$ e a posição $\Theta(s)$ passa a ser de 2ª ordem e do tipo 1, como representado na seguinte equação:

$$FT = \frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (2.11)$$

O sistema em malha aberta a controlar pode então ser descrito da seguinte forma:

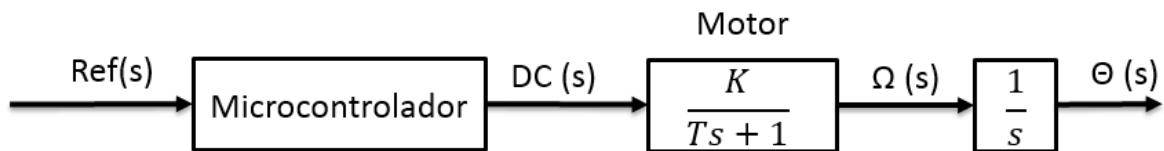


Figura 4.28 – Sistema a controlar

Teoricamente, para se obter um erro nulo a referências constantes, é necessário a presença de um integrador na função de transferência em malha aberta. No caso em análise, como o sistema é do tipo 1, já existe o integrador, pelo que não deveria ser necessário a aplicação de um termo integrativo no controlado.

Ou seja, de forma a obter um erro nulo a referências constantes, apenas deveria ser necessário a utilização de um controlador do tipo proporcional, como representado na Figura 4.29.

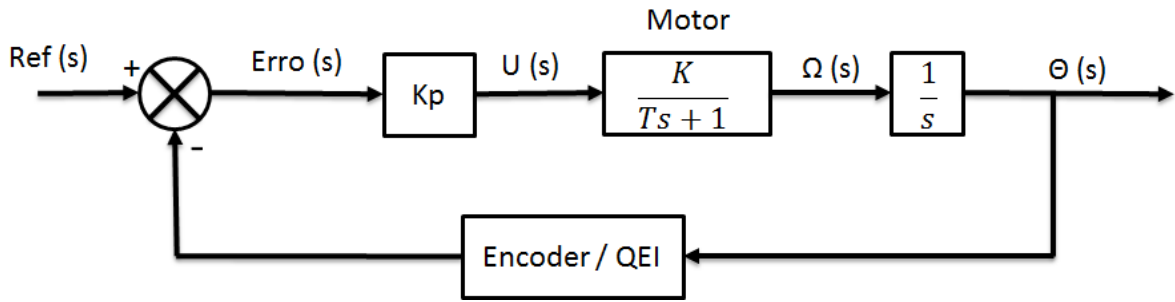


Figura 4.29 – Sistema controlado com controlador proporcional

No entanto, em termos práticos, a utilização de um controlador deste tipo não apresentou os resultados desejados. Para um valor de K_p que não levasse o sistema para uma situação de instabilidade, a velocidade de atuação da válvula era demasiado lenta. Foi então necessário recorrer a outro tipo de controlador com o objetivo de melhorar a velocidade de atuação da válvula.

Optou-se por acrescentar ao controlador um termo integrativo, que tem em conta o acumular dos erros e proporciona, assim, uma resposta mais rápida do sistema. No entanto, ao incluir um termo integral, este provoca no sistema um *overshoot* que não é pretendido, pelo que foi necessário a implementação de um termo derivativo no controlador que, tendo em conta a variação do erro, permite amortizar o *overshoot* criado pelo termo integral.

Havendo a possibilidade de determinar o valor da velocidade instantânea através do modo QEI, como já foi referido, o controlador escolhido para o sistema foi um controlador PI-D, como representado na equação(2.12), evitando assim a necessidade de derivar o sinal da posição.

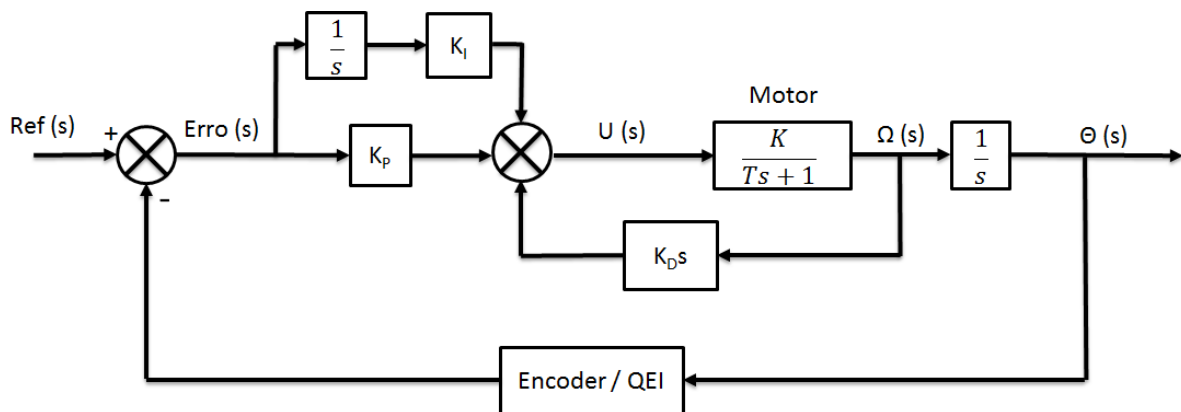


Figura 4.30 – Sistema controlado com controlador PI-D

A ação de controlo será então obtida pela seguinte equação:

$$U(s) = K_p \cdot E(s) + K_i \cdot \frac{1}{s} \cdot E(s) + K_d \cdot \Omega(s) \quad (2.12)$$

Para que seja possível implementar este controlador num microcontrolador é necessário proceder a uma discretização do domínio contínuo. Este procedimento requer a amostragem ("sampling") da leitura de posição e velocidade obtidas pelo *encoder*, bem como das variáveis associadas. O intervalo de amostragem traduz uma escolha de grande importância. Um intervalo de amostragem grande poderá ser vantajoso, uma vez que requer um menor esforço computacional, no entanto, poderá não representar adequadamente as variações de sinal que se pretende, podendo a ação de controlo levar à instabilidade do sistema[18].

Segundo o teorema da amostragem, a frequência de amostragem ($f_{sampling}$) tem de ser pelo menos 2 vezes mais elevada do que a maior frequência presente no sinal que se pretende amostrar, sendo no entanto aconselhável a utilização de uma frequência certa de 10 vezes superior [17, 19].

Foi necessário recorrer a um timer do microcontrolador de forma a poder fazer a amostragem pretendida. Uma vez que a velocidade das dinâmicas em causa não era conhecida com exatidão, utilizou-se uma frequência de amostragem de 1KHz, ou seja, a ação de controlo ocorre a cada 1 ms.

Para a implementação da síntese de controladores em tempo discreto é necessário a utilização de aproximações numéricas de integração e derivação e da aproximação discreta do operador de Laplace[18].

Em relação ao cálculo de integrais, o método utilizado foi a aproximação pelo método dos trapézios, equação (2.13), por ser um método relativamente simples de implementar.

$$v_k = v_{k-1} + K_I \cdot \frac{T}{2} \cdot (e_{k-1} + e_k) \quad (2.13)$$

O que diz respeito ao cálculo dos termos derivativos, embora este não tenha sido utilizado devido à possibilidade de leitura direta da velocidade de rotação, o método utilizado para uma possível implementação teria sido o método das diferenças finitas atrasada, como representado na equação (2.14).

$$\dot{e}(t) = \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \quad (2.14)$$

Tendo em conta as aproximações referidas, a ação de controlo no domínio discreto para o controlador PI-D pode ser escrita da seguinte forma:

$$u_k = K_P \cdot e_k + K_I \cdot \frac{e_k + e_{k-1}}{2} \cdot T_{\text{sampling}} + K_D \cdot \frac{[\theta_k - \theta_{k-1}]}{T_{\text{sampling}}} \quad (2.15)$$

4.4 Monitorização e comando

4.4.1 Componentes eletrónicos

Microcontrolador

Sendo este microcontrolador responsável pela monitorização e comando, de forma direta ou indireta, de todos os componentes do projeto, as características mais relevantes na sua escolha estavam relacionados com protocolos de comunicação, nomeadamente SPI e USB.

O microcontrolador utilizado foi o PIC18F26J50, com um encapsulamento do tipo PDIP, que apresenta dois módulos de comunicação MSSP (SPI ou I2C) e ainda um módulo USB. Também este é caracterizado por pertencer à família de 8 bits da *Microchip* (8 bits de dados e 16 bits por instrução). No que diz respeito a alimentação, este microcontrolador necessita de ser alimentado com uma tensão entre 2.15V e 3.6V. A frequência utilizada foi de 8MHz, que é a frequência máxima disponibilizada pelo cristal interno do microcontrolador.

Em relação aos pinos, para além de serem multiplexados, neste microcontrolador, existe ainda a possibilidade de reprogramar alguns dos pinos. Ou seja, para além das funções descritas no diagrama fornecido no *data sheet*, Figura 4.31, os pinos com a denominação RP podem ser reprogramadas para uma outra função de acordo com

certas limitações descritas no *data sheet*. Um outro aspeto importante, no que diz respeito aos pinos, é a existência de alguns tolerantes a tensões até 5.5V, que se tornou bastante útil para a comunicação com o 2º microcontrolador, que é alimentado a 5V, como se pode verificar pela Tabela 4.3.

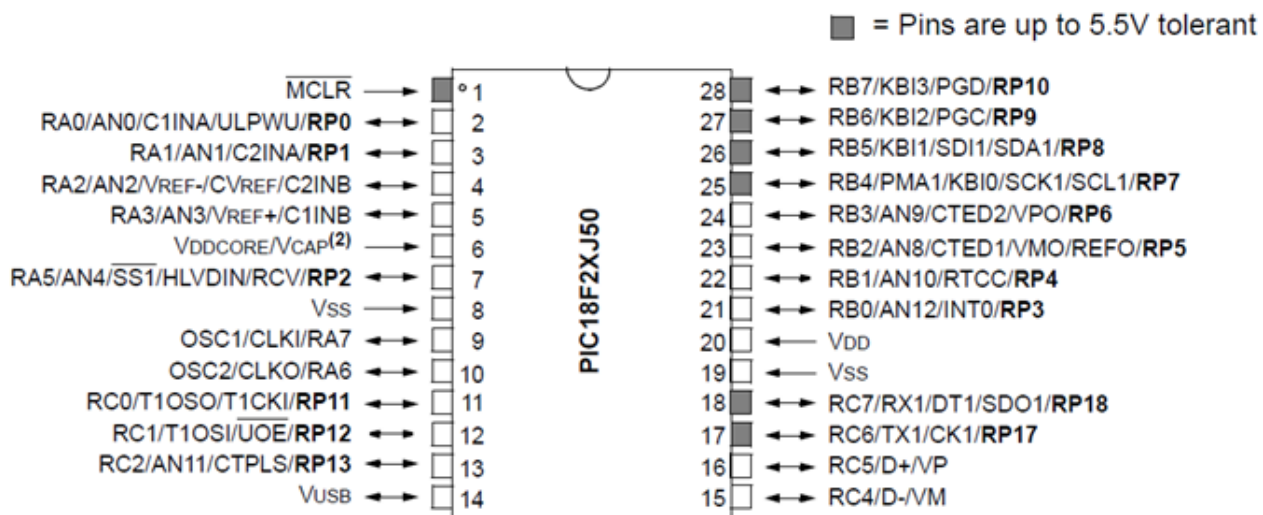


Figura 4.31 – Diagrama de pinos do PIC18F26J50 para o encapsulamento PDIP [20]

Tabela 4.3 – Utilização dos pinos do PIC18F26J50

Pino	Utilização	Pino	Utilização
1	-----	15	-----
2	Teclado	16	-----
3	Teclado	17	-----
4	Teclado	18	SPI (SDO)
5	Teclado	19	GND
6	+2.7V	20	3.3V
7	Teclado	21	-----
8	GND	22	SS (Caudal)
9	Teclado	23	SS (PIC18F4431)
10	Teclado	24	SS (Temperatura)
11	Teclado	25	-----
12	-----	26	-----
13	-----	27	SPI (SCK)
14	-----	28	SPI (SDI)

Regulador de tensão

Com exceção do transdutor de caudal, que necessita de uma alimentação de 5 V, todos os elementos utilizados neste módulo são alimentados a 3.3V, sendo para isso utilizado o regulador de tensão, também da *Maxim Integrated*, MAX 884 (Figura 4.32), que permite uma alimentação à entrada de 2.2V a 11.5V, e apresenta à saída uma tensão de 3.3V com uma corrente máxima de 200mA.

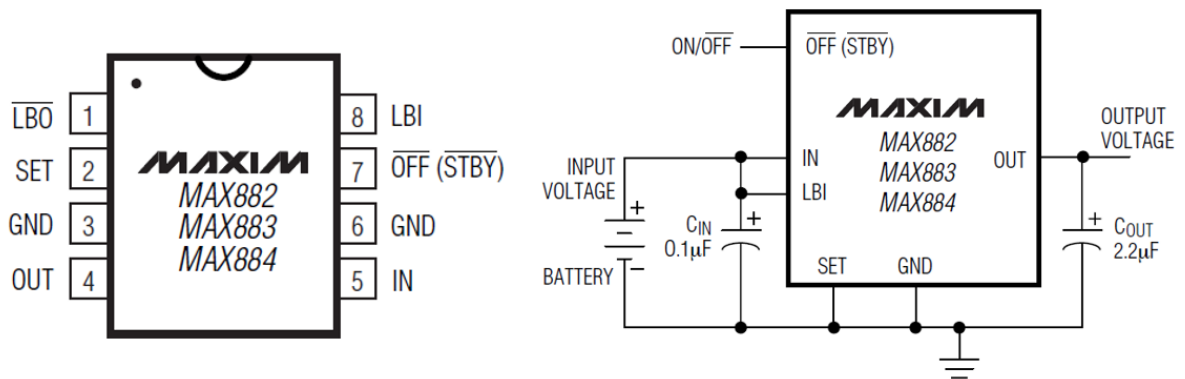


Figura 4.32 – Diagrama de pinos do regulador de tensão MAX 884 e montagem do mesmo

Teclado

A forma utilizada para a introdução de dados e seleção do modo de funcionamento foi o recurso a um teclado alfanumérico 4X4, como representado pela Figura 4.33



Figura 4.33 – Teclado utilizado no protótipo

O funcionamento deste componente consiste na utilização de uma “matriz” de botoneiras, estando as linhas conectadas a saídas digitais do microcontrolador, e as colunas conectadas a entradas digitais, como representado na Figura 4.34. Ao premir uma das botoneiras é feita uma ligação entre uma linha e uma coluna, ligando uma saída digital a uma entrada, possibilitando a determinação da tecla premida. A utilização de resistências é necessária para garantir que as entradas digitais se encontram sempre com valor lógico 0, exceto quando uma tecla é premida.

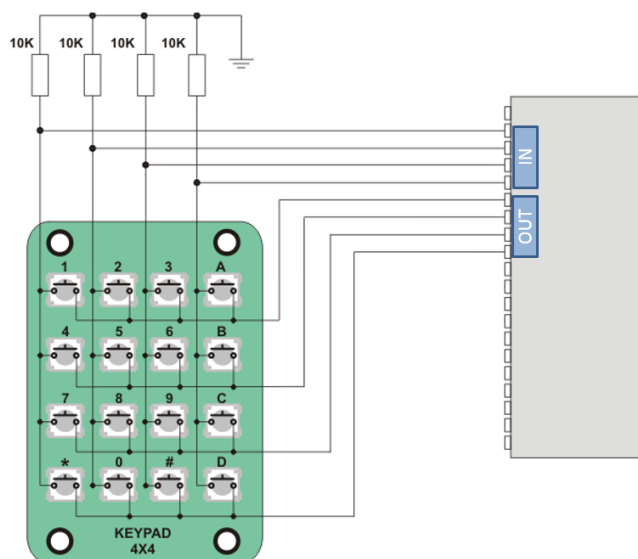


Figura 4.34 – Esquema das ligações do teclado ao microcontrolador

Termopar & MAX 31855

Para medição de temperatura optou-se pela utilização de um termopar do tipo K juntamente com um circuito integrado da *Maxim Integrated* (MAX31855), que possibilita uma fácil ligação entre o elemento sensor e o microcontrolador.

A escolha do termopar como elemento utilizado para medição de temperatura, nomeadamente do tipo K (Figura 4.35), em detrimento dos termo-resistivos deveu-se ao facto de este elemento apresentar uma boa linearidade para uma gama relativamente extensa de temperatura, entre 0°C e 1000°C e não apresentar erros de medição devido a autoaquecimento ou devido à resistência dos cabos, o que leva a utilização de uma instrumentação associada[5].



Figura 4.35 – Termopar do tipo K utilizado

Os principais inconvenientes da utilização do termopar estariam relacionados com a necessidade de compensação da junção fria e de leitura de valores de tensão bastante pequenos ($42 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$). Estes problemas foram facilmente resolvidos através da incorporação de um circuito integrado, MAX31855 (Figura 4.36).

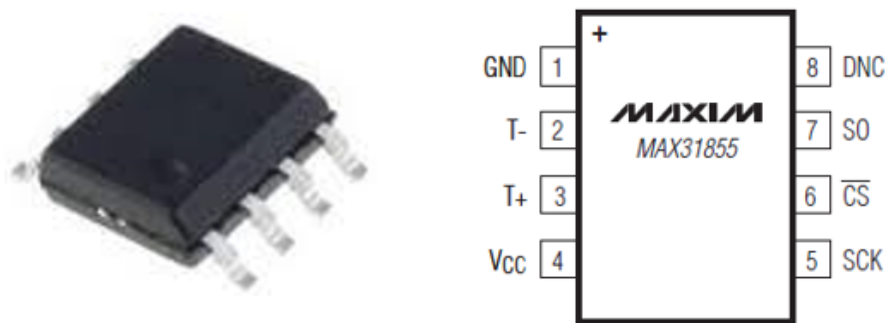


Figura 4.36 – MAX31855 e respetivos pinos.

Este circuito integrado efetua a compensação da junção fria e disponibiliza um sinal digital de 14 bits com uma resolução de $0.25 \text{ }^\circ\text{C}$ e uma precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$ para uma gama de temperatura entre -200°C e 700°C . Embora a precisão apresente um valor relativamente elevado, verificou-se experimentalmente que, para uma gama mais restrita em torno da temperatura ambiente, zona onde o termopar apresenta maior linearidade, a precisão aumenta consideravelmente.

A comunicação entre o MAX 31855 e o microcontrolador é feita através da comunicação SPI, sendo, no entanto, utilizados apenas 3 fios como representado na Figura 4.37. A não necessidade de utilização de um quarto cabo deve-se ao facto de o MAX31855 não necessitar de ler qualquer informação, precisando apenas de um sinal de *clock* para transmitir a informação.

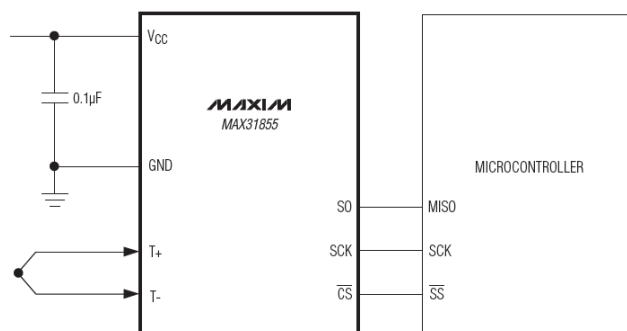


Figura 4.37 – Esquema representativo da implementação do MAX31855

A informação transmitida pelo MAX31855 é enviada em 4 bytes, dos quais dois são referentes à temperatura interna do circuito integrado, utilizado para compensar a junção fria, e outros dois relativos a temperatura da ponta de prova do termopar.

Transdutor de Caudal & MAX 4678

O transdutor de caudal utilizado, sendo baseado num princípio desenvolvido ao longo da dissertação, tem um capítulo dedicado ao seu funcionalmente e forma de ligação ao exterior. No entanto, no que diz respeito ao projeto eletrónico é importante referir a forma de comunicação utilizada para a leitura do transdutor, bem como, os componentes associados a esta comunicação, nomeadamente, botões analógicos (*Analog Switches*) MAX4678, da empresa *Maxim Integrated*.

A comunicação utilizada para trocar informação entre o microcontrolador e o transdutor de caudal baseia-se, tal como as outras, no protocolo SPI. No entanto, como explicado no capítulo 5, o transdutor de caudal apenas disponibiliza dois pinos para a comunicação, um referente ao sinal de *clock* e o outro relativo a troca de dados nos dois sentidos (*SDIO – Serial Data In and Out*).

Existe então a necessidade de garantir que o sinal do *clock* apenas seja enviado para o transdutor quando se pretende comunicar com este, ou seja, é necessário criar uma forma de implementar um *Slave Select* para esta comunicação. A solução encontrada foi a utilização de um *switch* analógico na ligação referente ao *clock* (Figura 4.38).

Um outro problema associado a esta ligação está na necessidade de ter os pinos do microcontrolador referentes à saída e entrada de dados ligados um ao outro,

uma vez que a comunicação de dados se efetua apenas por um cabo. Tal como no caso anterior foi utilizado um *switch* analógico para esta função, como representado na Figura 4.38

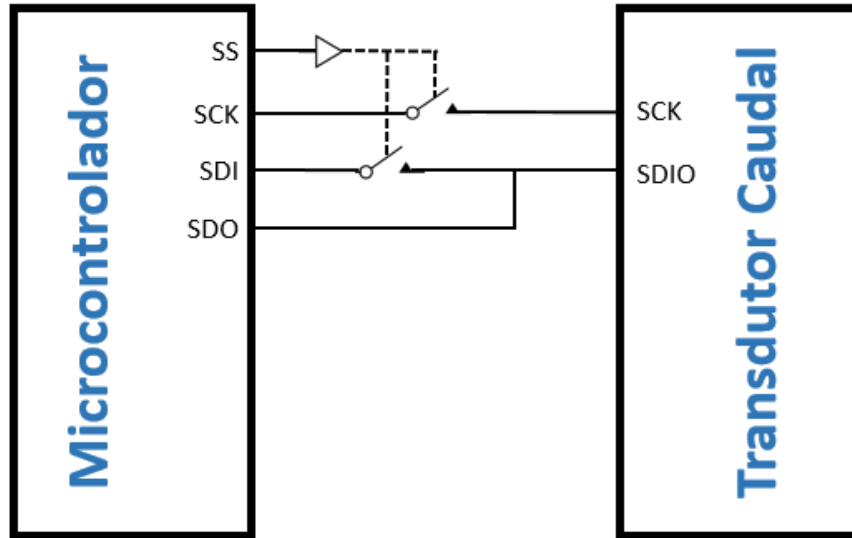


Figura 4.38 – Comunicação entre microcontrolador e transdutor de caudal.

Como já foi mencionado foi utilizado o componente MAX 4678 que apresenta na sua constituição quatro *switch* analógicos normalmente abertos, como esquematizado na Figura 4.39. Este circuito integrado é alimentado com uma tensão de 3.3V, tal como todo o módulo, sendo que os botões são atuados quando, na entrada referente à sua atuação, existe uma tensão igual ou superior a 2.4V.

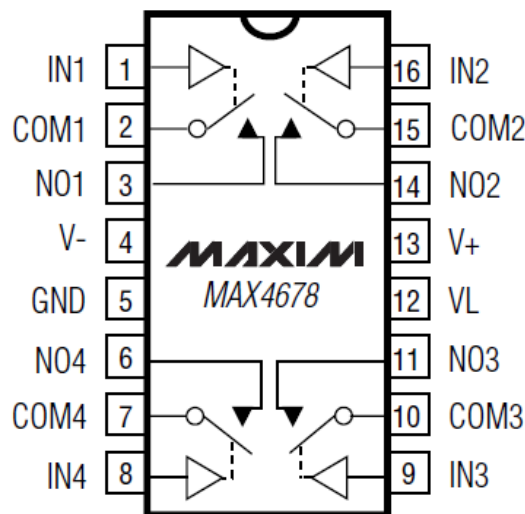


Figura 4.39 – Representação do MAX4678.

4.5 Conclusão

No presente capítulo foram apresentados os componentes principais utilizados no desenvolvimento do protótipo, bem como, os seus modos de funcionamento

Embora não tenha sido a opção inicial, a utilização de dois microcontroladores revelou-se bastante vantajosa para o projeto eletrónico, possibilitando a criação de dois módulos totalmente independentes e disponibilizando várias formas de comunicação com o exterior (SPI, I²C, USB).

No que diz respeito ao controlo, a utilização do *encoder*, juntamente com o módulo do QEI, tornou-se bastante útil, permitindo, para além da determinação da posição com uma resolução de 0.2°, a determinação da velocidade de rotação, utilizada no controlador PI-D.

5 Transdutor de Caudal

5.1 Introdução

Após a apresentação de todo o desenvolvimento mecânico e eletrónico desta dissertação, no presente capítulo será feita uma abordagem detalhada, relativamente ao transdutor de caudal desenvolvido no decorrer da dissertação.

O principal objetivo no desenvolvimento deste transdutor consiste na criação de um do tipo não invasivo e que apresentasse um custo de produção bastante inferior ao dos apresentados inicialmente no capítulo referente ao estudo do estado da arte.

A solução idealizada para o desenvolvimento do transdutor de caudal baseia-se na utilização de um rato ótico, tirando proveito das características relacionadas com a deteção e qualificação do movimento, disponibilizadas pelo sensor de imagem CMOS nele incorporado.

Tratando-se de uma solução inovadora, numa primeira fase foi necessário realizar uma pesquisa relativa ao funcionamento dos sensores de imagem e da sua implementação num rato ótico, assim como, de outras aplicações desenvolvidas tendo por base um rato ótico, como por exemplo, transdutores de posição.

Em relação ao desenvolvimento do transdutor em si, este foi efetuado em duas fases. Em primeiro lugar foi necessário decidir qual o sensor presente num rato ótico a utilizar, e estudar as suas especificações. Após compreender o seu funcionamento este foi ligado a um microcontrolador de forma a testar o princípio de funcionamento, com auxílio de um LCD para visualização de dados. Por fim, foi desenvolvido o protótipo exclusivo para o transdutor, sendo ainda produzida uma placa de circuito impresso para uma futura implementação no protótipo da válvula.

5.2 Sensores de imagem

De uma forma simples, o princípio de funcionamento de um sensor de imagem consiste na conversão de uma imagem num sinal elétrico. Esta conversão é feita por intermédio de pequenos elementos de imagem, denominados pixéis, responsáveis por registar a quantidade de luz que incide sobre eles. Consoante a intensidade de luz incidente em cada um dos pixéis, estes vão gerar uma carga elétrica (quanto maior a intensidade maior a carga gerada), sendo posteriormente convertidos num valor de tensão. Por fim, este valor de tensão é convertido através de um conversor A/D (analógico/digital), de forma a poder ser processado pelos circuitos eletrónicos onde o sensor se encontra inserido, numa câmara fotográfica por exemplo[21].

No entanto, cada um dos pixéis utilizados nestes sensores, apenas são capazes de detetar qual a intensidade luminosa incidente, sendo por isso impossível detetar qual a cor incidente no pixel. A forma utilizada para possibilitar a leitura de cores nestes sensores é através da utilização de filtros de cor colocados em frente a este, atribuindo assim uma cor a cada pixel.

Existem atualmente vários filtros utilizados nos sensores de imagem, sendo o mais comum o filtro Bayer, que consiste numa matriz de filtros RGB (*red, green and blue*), tal como representado na Figura 5.1 [22].

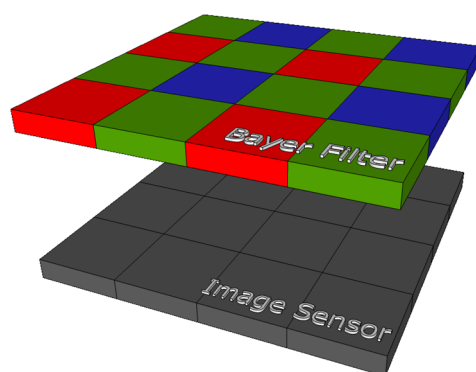


Figura 5.1 – Filtro de Bayer sobreposto ao sensor [21]

Como se pode verificar pela figura anterior, este filtro é composto por 25% de azul, 25% de vermelho e 50% de verde, pelo facto de, em condições de iluminação natural, o olho humano é mais sensível à cor verde.

Uma vez que ao sobrepor o filtro sobre o sensor, é atribuído a cada pixel apenas uma cor, isto é, cada pixel vai ser responsável pela leitura da intensidade luminosa de uma determinada cor, azul, vermelho ou verde. Se a imagem original for a representada na Figura 5.2, após passar no filtro ficara com um espectro idêntico ao da Figura 5.3.



Figura 5.2 – Imagem original[23]

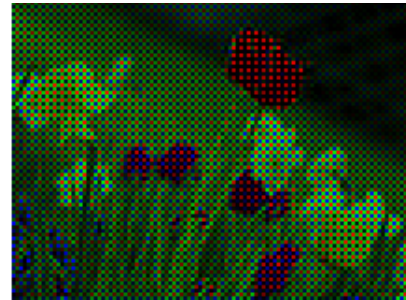


Figura 5.3 – Imagem após filtro de Bayer[23]

Para ser possível obter uma imagem o mais idêntico possível da imagem original, existem diversos algoritmos, com complexidades distintas, que através de interpolação entre os pixels vizinhos, conseguem obter a cor real de um determinado pixel, obtendo assim, uma imagem idêntica à original, como a representada na Figura 5.4.



Figura 5.4 – Imagem após aplicação de algoritmos de interpolação[23]

Tal como foi referido, existem outros tipos de filtros, quer utilizando as mesmas cores (vermelho, azul e verde) com disposições diferentes, quer utilizando outros conjuntos de cores, como por exemplo o filtro CMYG (*Cyan, Magenta, Yellow, and Green*). Para qualquer um destes filtros, é sempre necessário recorrer a um algoritmo de interpolação, para ser possível a obtenção da imagem próxima da realidade[21].

No que diz respeito às tecnologias utilizadas nos sensores de imagem, existem atualmente no mercado duas tecnologias líderes, os CCD (*Charge-coupled Device*) e os CMOS (*Complementary Metal-oxide Semiconductor*)[21].

CCD vs CMOS

Em ambas as tecnologias, o princípio de funcionamento é o mesmo, explicado anteriormente, estando a grande diferença na forma como é feita a leitura da carga elétrica gerada em cada pixel. Na tecnologia CCD, as cargas acumuladas por cada pixel são transportadas ao longo de todo o dispositivo até um ponto de saída, no qual são convertidas para valores de tensão e, posteriormente, para valores digitais, através de um conversor D/A. No que diz respeito à tecnologia CMOS, existe em cada um dos pixels toda a eletrónica necessária à conversão das cargas elétricas geradas em sinais digitais, possibilitando, assim, a leitura individual de cada um dos pixels do sensor.

As principais vantagens da utilização da tecnologia CCD estão relacionadas com a maior sensibilidade à luz e menor ruído no sinal elétrico gerado, sendo que, nos dias de hoje, a tecnologia CMOS se aproxima cada vez da CCD nestes aspetos.

Em relação à tecnologia CMOS, as suas vantagens estão relacionadas com o facto de a cada pixel corresponder um sinal digital, conferindo assim uma maior facilidade de implementação em diversos sistemas, e a não necessidade de utilização de componentes eletrónicos exteriores ao sensor para condicionamento de sinal, necessário na tecnologia CCD [21].

5.3 Rato ótico

Utilizado diariamente por milhares de pessoas como auxílio de navegação pelo ambiente gráfico de um computador, o rato ótico foi o ponto de partida para o desenvolvimento do transdutor de caudal.

Uma das principais funções deste componente é a transposição do seu movimento, sobre a superfície de uma secretária, para um ponteiro existente num monitor. A solução idealizada para o transdutor passa pelo aproveitamento da capacidade de o rato conseguir detetar e qualificar movimentos relativo entre este e a superfície (direção, sentido e velocidade).

De uma forma simples, o princípio de funcionamento idealizado para o transdutor, seria colocar um tubo transparente na parte inferior do rato, por onde o líquido iria escoar. Este escoamento seria detetado pelo rato permitindo determinar a sua velocidade e conseqüentemente o caudal.

Princípio de funcionamento

O primeiro passo para o desenvolvimento da ideia passa por entender o funcionamento de um rato ótico, no que diz respeito à sua capacidade de detetar movimento, de forma a poder implementar os seus componentes no transdutor de caudal.

Embora existam dois tipos de ratos óticos no mercado, um baseado em LED e outro baseado em laser, o seu princípio de funcionamento é idêntico e, em ambos os casos, baseia-se na utilização de um sensor de imagem CMOS, anteriormente apresentado.

Na Figura 5.5 e na Figura 5.6 está representada a montagem dos componentes principais que constituem um rato ótico: uma fonte de iluminação (LED), o circuito integrado que contém o sensor CMOS (neste exemplo é o ADNS – 2610), a placa de circuito impresso (PCB), que contém toda a eletrónica necessária, e as lentes de focagem.

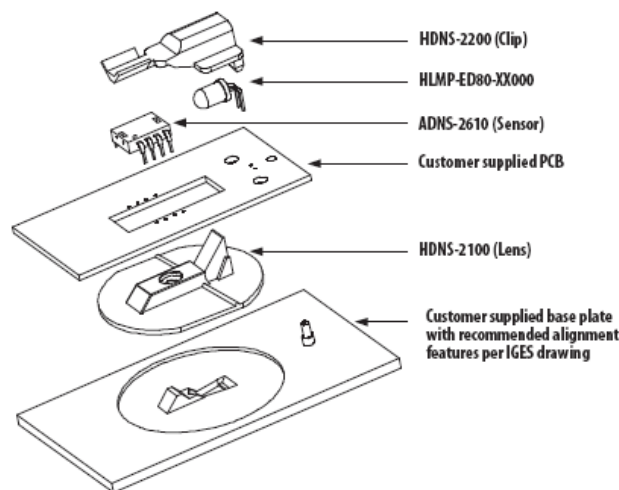


Figura 5.5 – Vista explodida dos componentes de um rato ótico[24]

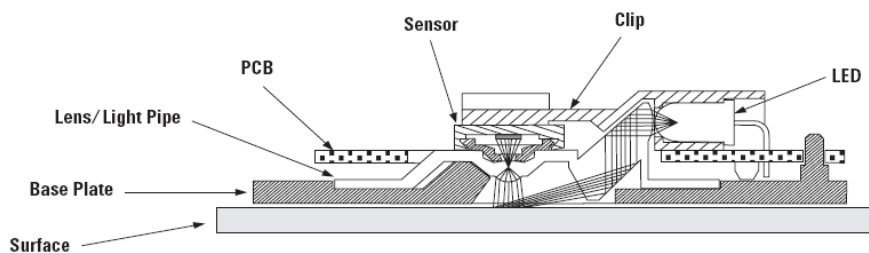


Figura 5.6 – Montagem dos componentes de um rato ótico [24]

Na Figura 5.7 está exemplificado o princípio de funcionamento de um rato ótico baseado em LED. Como se pode verificar, a utilização do LED serve para iluminar a zona da superfície que será analisada pelo sensor CMOS, necessitando para isso de uma lente de focagem de forma a obter uma melhor imagem[25].

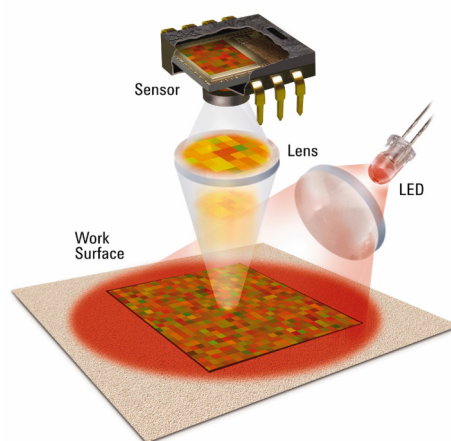


Figura 5.7 – Princípio de funcionamento de um rato ótico

Em relação aos ratos óticos baseados em laser, a montagem dos componentes, assim como o modo de funcionamento é exatamente o mesmo, sendo que nesta tecnologia é utilizado um laser como fonte de iluminação da superfície. No entanto, devido à natureza coerente da luz emitida por um laser, é possível revelar detalhes na superfície de trabalho que não são visíveis quando iluminados por um LED. Por este motivo, os ratos baseados em laser podem ser utilizados em quase todos os tipos de superfície.

No que diz respeito à deteção e qualificação do movimento do rato sobre a superfície, esta é feita através do sensor CMOS, incorporado num circuito integrado e responsável por tirar centenas de fotografias por segundo à superfície. O deslocamento

do rato é então calculado através da comparação de duas imagens consecutivas[25, 26].

Na Figura 5.8 estão representadas duas imagens capturadas consecutivamente por um rato ótico, onde a parte colorida (a vermelho) representa a mesma zona da superfície, sendo possível verificar um deslocamento de 1 pixel para baixo e 5 pixels para a esquerda entre as duas imagens [27].

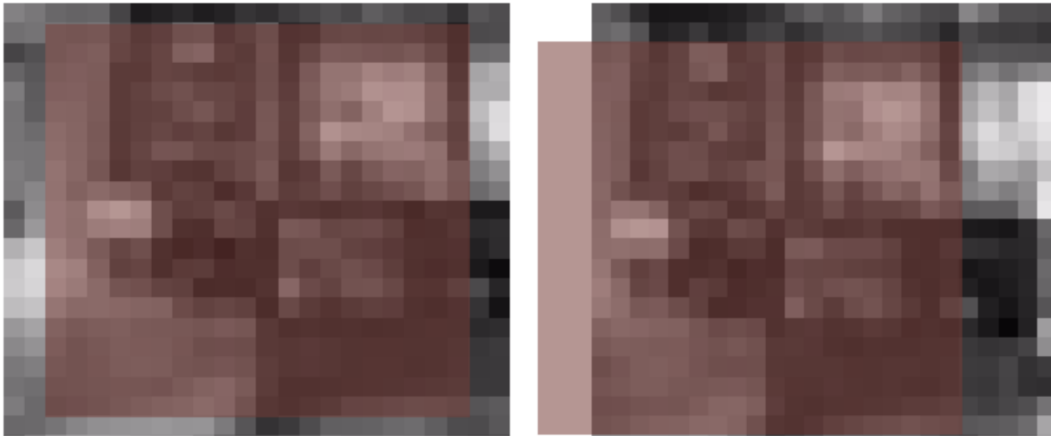


Figura 5.8 - Representação de duas imagens consecutivas adquiridas pelo sensor CMOS[27]

Caraterísticas relevantes

Depois de compreender de que forma é feita a deteção do movimento utilizando o sensor CMOS, é importante entender algumas das características, relacionadas com o movimento, fornecidas pelos fabricantes de ratos óticos, como a resolução e a velocidade de aquisição.

Quando se fala na resolução do rato ótico, na verdade está-se a falar na resolução do sensor de imagem CMOS, usualmente referida em CPI (*Counts Per Inch* - contagens por polegada) e que normalmente apresenta valores de 400/800/1600/2000 CPI. Ou seja, se um determinado rato apresentar uma resolução de 400 CPI, significa que ao deslocar o rato vão ser efetuadas 400 contagens por cada polegada percorrida.

No que diz respeito à velocidade de aquisição, esta é a característica que define a frequência com que são capturadas as imagens pelo sensor CMOS. Usualmente definida em fps (*frames per second* – frames por segundo) a velocidade de aquisição costuma variar entre 500fps até 7000fps para este tipo de sensores[25].

5.4 Aplicações desenvolvidas

De forma a poder retirar conclusões, no que diz respeito ao grau de inovação presente no princípio de funcionamento idealizado para o transdutor de caudal, foi feita uma pesquisa relativa á utilização do rato ótico em aplicações relacionadas com leitura de movimento, nomeadamente a leitura do escoamento de um fluido.

Da pesquisa efetuada, grande parte dos artigos encontrados referem-se à utilização dos componentes de um rato ótico para a medição de deslocamento, isto é, no desenvolvimento de transdutores de posição, quer seja linear, como em [27, 28] ou angular, como em [29, 30]. Foram também encontrados artigos que apresentam a utilização do sensor CMOS de um rato ótico em aplicações de odometria[31] e no desenvolvimento de um detetor de moedas falsas [32].

Embora a pesquisa efetuada tivesse como objetivo principal a verificação da existência de algum desenvolvimento idêntico ao pretendido para o transdutor de caudal, esta também se revelou bastante interessante no que diz respeito às capacidades dos sensores em questão, nomeadamente em termos de distância entre os objetos e o sensor, a precisão da medição, ou até mesmo as imagens obtidas pelo sensor[33, 34].

5.5 Implementação da ideia

5.5.1 Desenvolvimento do conceito

Tendo por base o princípio explicado anteriormente, idealizou-se a criação de um transdutor que utilizasse um sensor de imagem CMOS de um rato ótico e que fosse capaz de ler o deslocamento de um fluido no interior de um tubo transparente, tal como representado na Figura 5.9.

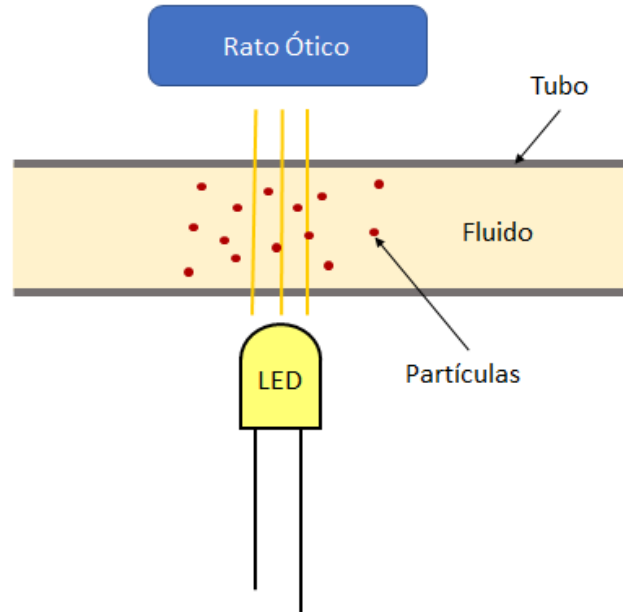


Figura 5.9 – Esquema representativo da solução idealizada

No que diz respeito à iluminação do interior do tubo, uma vez que se pretende utilizar o transdutor para a medição de diferentes tipos de fluidos, optou-se pela utilização de um LED RGB, possibilitando, assim, a otimização do transdutor através do ajuste da cor de iluminação, consoante o fluido a ser utilizado.

5.5.2 Sensor CMOS Utilizado

Sendo a implementação deste tipo de sensor, como elemento principal da medição de caudal, uma abordagem inovadora, e não havendo ainda dados que comprovem um correto funcionamento do princípio idealizado, a escolha do sensor foi feita através da desmontagem de alguns ratos óticos e pesquisa relativa aos sensores utilizados em cada um deles.

Embora uma pesquisa mais exaustiva relativa aos sensores de imagem CMOS utilizados em ratos óticos pudesse levar à escolha de um sensor com características que poderiam otimizar a sua implementação no protótipo, o reaproveitamento de um sensor já existente num rato ótico, numa fase inicial, facilita a sua implementação, uma vez que já apresenta toda a eletrónica implementada, assim como uma otimização das distâncias relativas a implementação da lente de focagem.

A escolha do sensor, de entre os sensores utilizados nos ratos óticos desmontados, recaiu sobre um sensor da empresa *Avago Technologies*, o ADNS 2610, Figura 5.10 e Figura 5.11, e teve, como principal justificação, o conteúdo da documentação encontrada referente ao sensor, nomeadamente, os dados disponibilizados no *data sheet*, assim como a utilização deste sensor noutro tipo de aplicações.



Figura 5.10 – ADNS 2610[24]

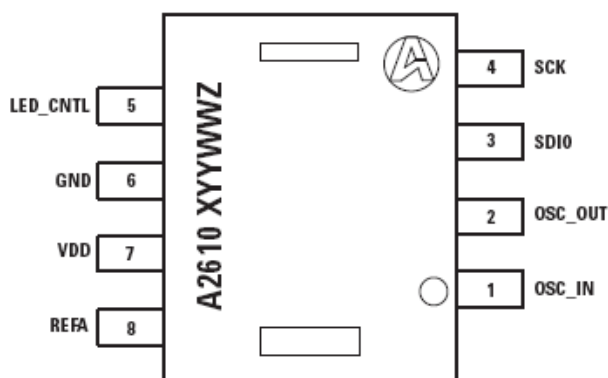


Figura 5.11 – Esquema de pinos do ADNS 2610[24]

No que diz respeito à sua implementação como transdutor de caudal, este sensor apresenta as seguintes características [24]:

- Resolução de 400 CPI (cerca de 15,75 contagens por milímetro);
- Velocidade máxima de 12ips (cerca de 304.8 mm/s);
- Velocidade de aquisição de 1500fps;
- Tensão de alimentação de 5V (compatível com a alimentação de outros componentes utilizado no projeto eletrónico)
- Baixo consumo elétrico, cerca de 15 mA.

Na Figura 5.12 estão representados, na forma de blocos, os componentes incorporados no ADNS 2610, assim como, os pinos referentes, onde, para além do processador de imagem constituído pelo sensor CMOS, existe ainda um bloco responsável pela alimentação e regulação da tensão, um bloco referente ao oscilador, ao qual é necessário ligar um ressonador externo, um pino responsável pelo controlo do led de iluminação (ligar e desligar), e ainda um bloco relativo á comunicação com o exterior, através de uma porta de série, composto por dois pinos[24].

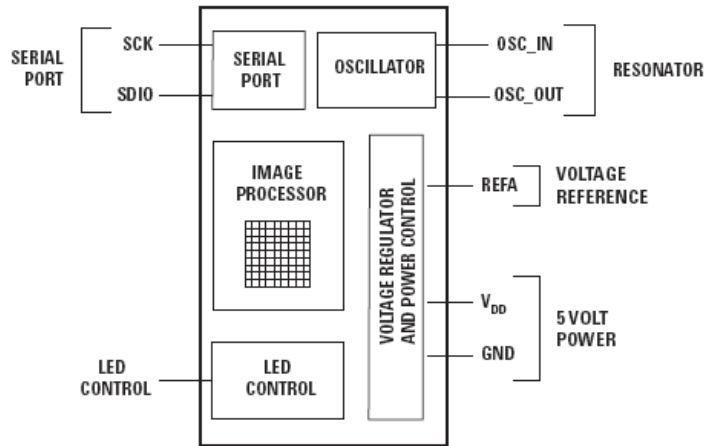


Figura 5.12 – Diagrama de blocos com os componentes incorporados no ADNS 2610[24]

5.5.3 Características eletrónicas

Embora o rato ótico utilizado já possua toda a eletrónica necessária ao funcionamento do sensor, nomeadamente com a utilização de um microcontrolador para o tratamento de dados e envio destes através de uma ligação do tipo PS/2, de forma a explorar ao máximo as funcionalidades do sensor, da placa de circuito impresso presente no rato ótico, apenas foi reaproveitada a eletrónica associada a este, sendo posteriormente feita uma ligação a um microcontrolador, apresentado anteriormente no capítulo 4, otimizado para trabalhar com a leitura de movimentos detetada pelo sensor.

Na Figura 5.13 está representado o diagrama de blocos do circuito implementado no rato ótico, do qual foi aproveitada a eletrónica referente ao sensor de imagem CMOS, indicado na imagem, com a exceção do pino responsável pelo controlo do led, uma vez que a fonte de iluminação utilizada consiste num led RGB, controlado por um microcontrolador.

Tabela 5.1 – Registos existentes no ADNS 2610[24]

Register	Address	Notes
Configuration	0x00	Reset, Power Down, Forced Awake, etc
Status	0x01	Product ID, Mouse state of Asleep or Awake
Delta_Y	0x02	Y Movement
Delta_X	0x03	X Movement
SQUAL	0x04	Measure of the number of features visible by the sensor
Maximum_Pixel	0x05	
Minimum_Pixel	0x06	
Pixel_Sum	0x07	
Pixel Data	0x08	Actual picture of surface
Shutter_Upper	0x09	
Shutter_Lower	0x0A	
Inverse Product	0x11	Inverse Product ID

No que diz respeito à deteção e qualificação de movimento por parte do sensor CMOS, esta é disponibilizada através dos registos Delta_X e Delta_Y. Estes dois registos disponibilizam o deslocamento ocorrido entre duas leituras em dois eixos ortogonais (X e Y). Isto é, ao fazer a leitura de um destes registos, Delta_X por exemplo, o sensor vai disponibilizar o valor do deslocamento ocorrido n eixo X desde a última leitura efetuada[24].

A informação é disponibilizada em 8 bits e encontra-se em complemento para 2, conforme representado na Figura 5.14.



Figura 5.14 – Conversão dos dados disponibilizados pelo registo Delta_X[24]

Em relação aos registos `Maximum_Pixel` e `Minimum_Pixel`, estes disponibilizam o valor dos píxeis que detetam a máxima e mínima intensidade luminosa respetivamente. Estes valores de intensidade podem variar entre 0 (intensidade mínima) e 63 (intensidade máxima). A utilização destes registos torna-se importante na aplicação em desenvolvimento, uma vez que permite verificar qual a cor de iluminação mais adequada para cada fluido.

Por fim, o registo `Pixel Data` disponibiliza a intensidade luminosa detetada em cada um dos píxeis, ou seja, de uma forma simples, disponibiliza uma fotografia a “preto e branco”. Tal como nos registos anteriores, a informação de cada um dos píxeis é disponibilizada em 64 tons de cinzento, sendo o valor 0 correspondente ao preto (intensidade mínima), e o valor 63 correspondente ao branco (intensidade máxima) [24].

5.5.5 Comunicação SPI

Como referido anteriormente, a forma de comunicação utilizada pelo ADNS 2610 é através do protocolo de comunicação SPI. No entanto, contrariamente ao que é implementado numa ligação típica de SPI (4 fios), este dispositivo apenas apresenta dois pinos relativos a esta comunicação, sendo um dedicado ao sinal de clock, proveniente do microcontrolador, e outro referente à troca de informações entre o ADNS 2610 e o microcontrolador, o SDIO (*Serial Data In and Out*).

Uma vez que apenas existe um fio de ligação relativo à troca de dados entre os dois componentes, ADNS 2610 e microcontrolador, uma comunicação típica entre estes consiste no envio de dois bytes. O primeiro byte, enviado pelo microcontrolador, está especificado qual dos registos se pretende aceder, sendo que o primeiro bit deste byte (o bit mais significativo) refere se vai existir uma operação de leitura ou de escrita no registo referente. O segundo byte, caso seja uma operação de escrita, é enviado novamente pelo microcontrolador, caso se trate de uma operação de leitura, é enviado pelo ADNS 2610.

No que diz respeito às operações de leitura de um registo, é necessário ter em conta que o ADNS 2610 necessita de tempo para processar a informação pretendida. Este procedimento requer um tempo mínimo de 100µs entre o envio do primeiro byte,

enviado pelo microcontrolador, e o retomar do sinal de clock referente ao começo da transmissão do segundo byte, por parte do ADNS 2610. A Figura 5.15 pretende elucidar este procedimento [24].

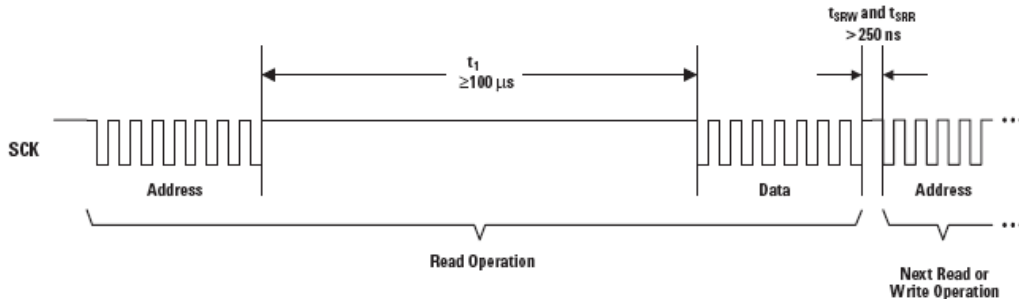


Figura 5.15 – Tempos de espera para comunicação entre o ADNS 2610 e o microcontrolador[24]

Na figura anterior também é possível observar a necessidade de um tempo de espera (>250ns) entre duas operações de leitura ou entre uma operação de leitura e uma operação de escrita. Também outros tempos de espera estão mencionados no data sheet do ADNS 2610, nomeadamente entre duas operações de escrita, e deverão ser tidos em conta de forma a obter trocas de informação sem falhas entre os dois componentes, ADNS 2610 e microcontrolador.

5.6 Testes

5.6.1 Testes iniciais

Os primeiros testes efetuados no desenvolvimento do transdutor tiveram por base a ligação do rato ótico ao projeto eletrónico de forma a verificar o seu correto funcionamento.

O primeiro passo consistiu então em soldar 4 fios aos pinos do ADNS 2610 referentes à alimentação (+5V e GND) e à comunicação SPI (SCK e SDIO) como representado pela Figura 5.16 e pela Figura 5.17.

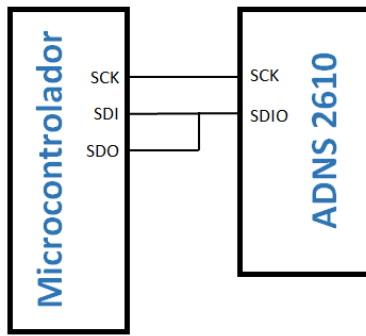


Figura 5.16 – Ligações entre microcontrolador e ADNS 2610

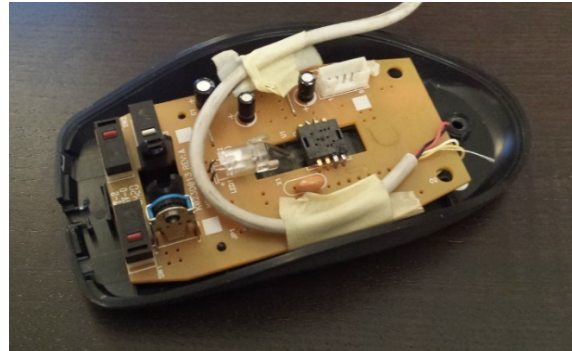


Figura 5.17 – Rato ótico utilizado com as ligações ao microcontrolador

Após efetuadas as ligações foram desenvolvidos programas simples para testar o correto funcionamento do rato e verificar se os dados lidos em cada um dos registos do ADNS 2610 se encontravam de acordo com o especificado no *data sheet*. De forma a facilitar estes testes, os dados recebidos pelo microcontrolador eram disponibilizados no LCD utilizado, como representado na Figura 5.18.



Figura 5.18 – LCD utilizado para testar o ADNS 2610

De forma a verificar os dados referidos no *data sheet* do ADNS 2610, nomeadamente em relação à resolução deste, 400 CPI (aproximadamente 15,75 contagens por milímetro), foi efetuada um teste à resolução do sensor tendo por base um codificador incremental. Este teste foi repetido várias vezes e os resultados médios encontram-se representados na Figura 5.19.

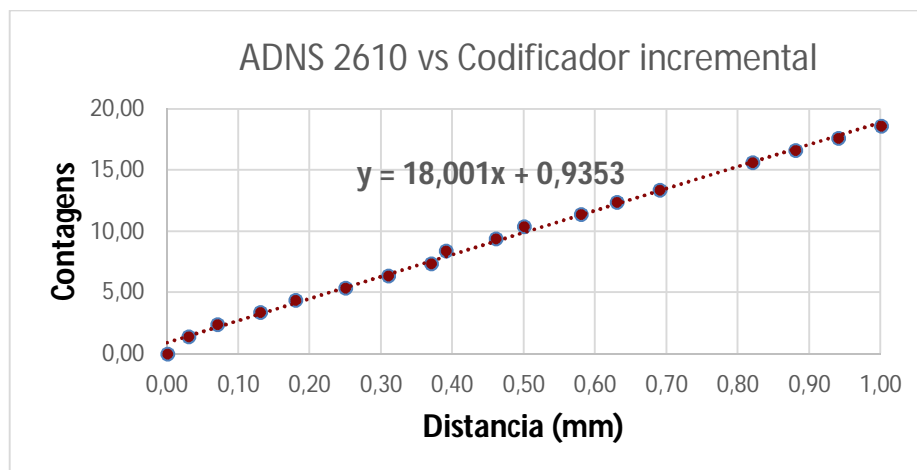


Figura 5.19 – Gráfico representativo da resolução do ADNS 2610

Como se pode verificar pela análise do gráfico anterior, o sensor apresenta uma resolução rondando as 18 contagens por mm que, convertendo para contagens por polegadas, apresenta um valor de 457 CPI, ou seja, uma resolução cerca de 14,25% superior à referida pelo fabricante.

No que diz respeito aos registos referente aos valores dos pixéis, verificou-se que, quando o sensor se encontrava tapado estes apresentavam um valor 0, e quando se direcionava uma luz branca diretamente para o sensor, os pixéis apresentavam um valor de 63, tal como referido no *data sheet*.

5.6.2 Testes de funcionamento

Depois de efetuadas todas as ligações e verificar todos os registos necessários á implementação do sensor tornou-se possível verificar o principio de funcionamento idealizado para o transdutor de caudal, ou seja, verificar se o sensor seria capaz de detetar o escoamento de um fluido no interior de um tubo.

De forma a proceder a um primeiro teste, ainda antes do desenvolvimento do projeto mecânico, foi recortado um pequeno pedaço de cartolina preta por forma a envolver o tubo onde circulava o fluido. Na parte inferior, entre a zona envolvente da cartolina e o tubo, foi colocado o led RGB de forma a iluminar o interior do tubo. Na parte superior, foi feito um pequeno rasgo na cartolina para que fosse possível fazer a leitura do escoamento por parte do rato ótico.

Para este teste, o fluido utilizado foi uma mistura de água com café, de forma a existir um fluido com partículas suficientemente grande para serem detetadas pelo sensor.

Com a realização deste teste foi possível fazer uma primeira validação do princípio idealizado, uma vez que, á medida que o fluido escoava pelo tubo, verificou-se que uma das componentes relativa ao deslocamento ia aumentando o seu valor, sendo que, ao inverter o sentido do escoamento, este valor ia diminuindo.

Embora neste ponto não tenha sido feito qualquer tipo de calibração do sensor em relação à leitura do escoamento, foi possível verificar que o princípio de funcionamento era válido, levando assim ao desenvolvimento de um protótipo mais robusto e fiável.

5.6.3 Implementação do protótipo

Tendo verificado o princípio de funcionamento pretendido para o transdutor de caudal, foi desenvolvido um protótipo (Figura 5.20), apresentado no capítulo 3, de forma a poder ser implementado no protótipo final da válvula.

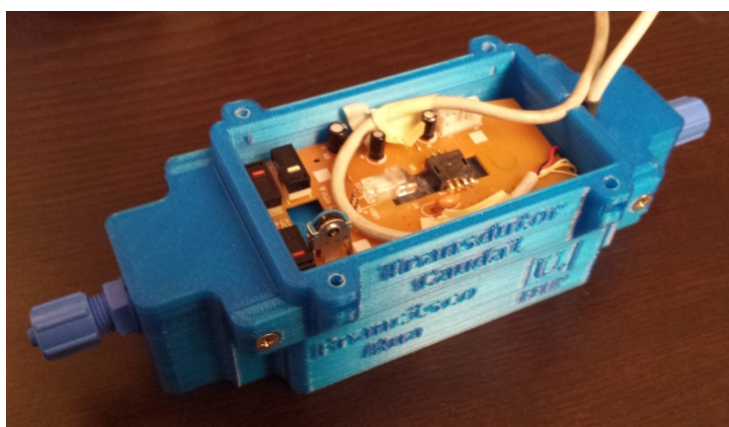


Figura 5.20 – Protótipo do transdutor de caudal

Também no protótipo final foi utilizada a mistura de água com café para a realização de testes, no entanto, ao longo dos testes efetuados, não foi possível efetuar uma calibração, devido a problemas relacionados com o ajuste dos componentes que não puderam ser efetuados por falta de tempo.

Em relação à utilização do led RGB, os testes efetuados foram todos com o mesmo fluido, alterando apenas a cor emitida. Uma vez que fluido era bastante translúcido, para todas as cores testadas a sensibilidade do sensor era a mesma, apresentando valores para o pixel máximo próximos do 63 (valor máximo).

5.6.4 Outros desenvolvimentos

Criação de uma PCB

Uma vez que um dos objetivos iniciais da dissertação consistia em desenvolver uma válvula onde fossem incorporados os transdutores de caudal e temperatura, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso, Figura 5.21 e Figura 5.22, onde foi implementado um sensor ADNS 2610, criando assim uma placa com dimensões bastante mais reduzidas relativamente à utilizada no protótipo do transdutor.

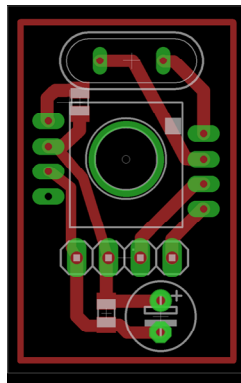


Figura 5.21 – Placa de circuito impresso desenvolvida para implementação do ADNS02610

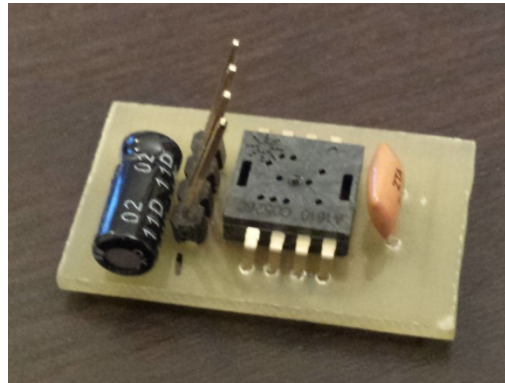


Figura 5.22 – Foto da placa desenvolvida

A criação desta placa tinha como objetivo a sua incorporação no protótipo referente à válvula, no entanto, devido a limitações de tempo, o desenvolvimento deste protótipo não foi possível.

Captura de imagens

De forma a tentar perceber um pouco mais o que se passa no interior do tubo do protótipo, foi desenvolvido um pequeno programa em MATLAB que, através dos dados retirados do registo Pixel Data, permite criar uma imagem do interior do tubo; resumidamente, tirar uma fotografia.

Os dados obtidos através do registo Pixel Data (o valor da intensidade de cada pixel) são armazenados num vetor com 324 componentes, referentes aos 324 pixéis existentes no sensor (18x18 pixéis), e exportados para uma folha de calculo (no formato .csv).

O programa desenvolvido em Matlab abre os valores presentes na folha de cálculo e ordena-os numa matriz, de acordo com o apresentado no data sheet do ADNS 2610, Figura 5.23. Através da função `mat2gray` é feita uma conversão para uma matriz de intensidade com valores entre 0.0 (preto) e 1.0 (branco). Por fim, utilizando a função `imshow`, é apresentada a imagem, a “preto e branco”, obtida pelo sensor CMOS, como as representadas na Figura 5.24 e na Figura 5.25.

																		Last Pixel					
18	36	54	72	90	108	126	144	162	180	198	216	234	252	270	288	306	324						
17	35	53	71	89	107	125	143	161	179	197	215	233	251	269	287	305	323						
16	34	52	70	88	106	124	142	160	178	196	214	232	250	268	286	304	322						
15	33	51	69	87	105	123	141	159	177	195	213	231	249	267	285	303	321						
14	32	50	68	86	104	122	140	158	176	194	212	230	248	266	284	302	320						
13	31	49	67	85	103	121	139	157	175	193	211	229	247	265	283	301	319						
12	30	48	66	84	102	120	138	156	174	192	210	228	246	264	282	300	318						
11	29	47	65	83	101	119	137	155	173	191	209	227	245	263	281	299	317						
10	28	46	64	82	100	118	136	154	172	190	208	226	244	262	280	298	316						
9	27	45	63	81	99	117	135	153	171	189	207	225	243	261	279	297	315						
8	26	44	62	80	98	116	134	152	170	188	206	224	242	260	278	296	314						
7	25	43	61	79	97	115	133	151	169	187	205	223	241	259	277	295	313						
6	24	42	60	78	96	114	132	150	168	186	204	222	240	258	276	294	312						
5	23	41	59	77	95	113	131	149	167	185	203	221	239	257	275	293	311						
4	22	40	58	76	94	112	130	148	166	184	202	220	238	256	274	292	310						
3	21	39	57	75	93	111	129	147	165	183	201	219	237	255	273	291	308						
2	20	38	56	74	92	110	128	146	164	182	200	218	236	254	272	290	308						
1	19	37	55	73	91	109	127	145	163	181	199	217	235	253	271	289	307						

First Pixel

Figura 5.23 – Matriz ordenada com os pixéis obtidos através do registo Pixel Data

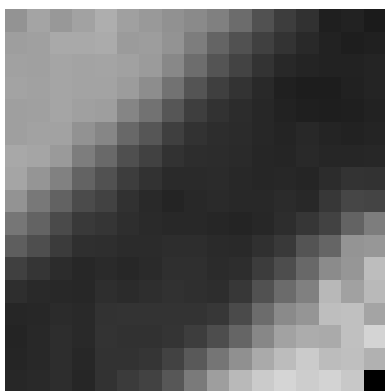


Figura 5.24 – Foto obtida com o sensor sobre uma letra impressa numa folha branca

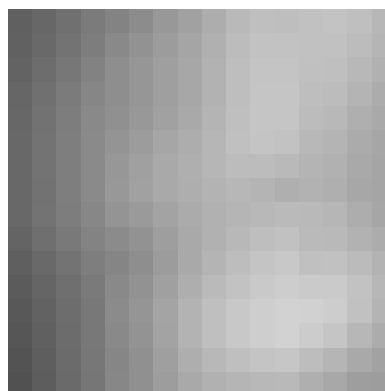


Figura 5.25 – Imagem obtida do interior do transdutor, sem fluido no interior

5.7 Conclusão

Ao longo do presente capítulo foi apresentada a solução idealizada para a criação de um novo transdutor de caudal, baseada na utilização de um rato ótico, sendo posteriormente testada e incorporada num protótipo produzido por intermédio de uma impressora 3D.

Embora não tenha sido feita uma calibração ao transdutor desenvolvido, devido a limitações de tempo, o princípio de funcionalmente idealizado foi testado e validado, sendo necessário a existência de partículas no interior do fluido de maneira a que estas possam ser detetadas pelo ADNS 2610.

Uma vez que através da utilização do ADNS 2610 é feita uma leitura de deslocamento, a implementação deste componente no transdutor desenvolvido, origina, na verdade, um transdutor de volume, bastante útil no que diz respeito à sua implementação na válvula como doseador de sumo, sendo feita a leitura de caudal através da implementação de um timer no microcontrolador.

6 Desenvolvimento de Software

6.1 Introdução

A introdução deste último capítulo tem como objetivo dar a conhecer, de uma forma simples e intuitiva, todo o desenvolvimento de *software* efetuado no decorrer da dissertação. Embora este seja um capítulo um pouco mais curto relativamente aos anteriores, o trabalho desenvolvido, no que diz respeito à programação dos microcontroladores, ocupou uma grande parte do tempo despendido para a elaboração deste trabalho, estando diretamente associado aos capítulos do projeto eletrónico e do desenvolvimento do transdutor de caudal, nos quais foi necessário recorrer a subprogramas dedicados para a verificação do correto funcionamento de alguns componentes utilizados.

Inicialmente, os programas implementados para efetuar alguns testes foram desenvolvidos recorrendo ao software *MikroC*, da empresa *MikroElektronica*, utilizando a linguagem *mikroC*, no entanto, devido a limitações do software na implementação de algumas funções, foi necessário recorrer a outro software de desenvolvimento. O software utilizado na programação até ao estado atual foi o MPLAB da empresa *Microship*, recorrendo à linguagem de programação C. No que diz respeito à programação dos microcontroladores propriamente dita, esta foi realizada recorrendo ao programador *Pickit 3*, também da *Microchip* (Figura 6.1).



Figura 6.1 – Pickit 3 utilizado para programação dos microcontroladores

Numa fase inicial do presente capítulo será feita uma pequena introdução relativamente à programação de microcontroladores da *Microchip*, dando relevo aos tópicos considerados mais importantes no programa desenvolvido. Em seguida será feita uma apresentação, recorrendo a diagramas de estados, do programa implementado no protótipo, sendo por fim, apresentados com maior detalhe alguns aspetos relevantes do programa desenvolvido.

6.2 Programação de um microcontrolador

Tal como referido anteriormente, o programa utilizado para o desenvolvimento da programação, o MPLAB, utiliza a linguagem de programação C. Sendo uma linguagem de alto nível, apresenta um nível de abstração elevado, isto é, aproxima-se da linguagem humana e afasta-se do código de máquina.

No entanto, no que diz respeito à programação de microcontroladores, uma vez que esta tem por base a programação de registos definidos pelo fabricante, a utilização de uma linguagem de alto nível é aliada ao código máquina, sendo necessário consultar o *data sheet* do microcontrolador, de forma a ser possível configura os registos “bit a bit”.

No que diz respeito ao desenvolvimento do código referente ao programa a implementar, é necessário ter em conta a forma de funcionamento do microcontrolador, nomeadamente fazendo apelo aos *interrupts*, assim como, ter em atenção todos os registos necessários à implementação dos módulos a utilizar, como por exemplo os timers[14].

Registos SFR

De uma forma simples, um registo, ou célula de memória, consiste num circuito eletrónico capaz de memorizar o estado de um byte, não tendo a ele uma função específica associada. No entanto existe em cada microcontrolador um determinado número de registos com funções específicas e pré-determinadas pelo fabricante, denominados de registos SFR (*Special Function Register*).

A programação destes registos torna-se bastante importante, no que diz respeito ao funcionamento de um microcontrolador, uma vez que são estes registos que definem a sua forma de funcionamento, nomeadamente através da definição de parâmetros relacionados com o oscilador, timers, conversores analógico/digital, comunicações, entre outros.

Interrupts

Os *interrupts*, ou interrupções, são utilizados como forma de o microcontrolador responder a mudanças no ambiente que o rodeia, isto é, o microcontrolador é programado para uma determinada função, por exemplo atuar um transístor, como consequência da ocorrência de um determinado evento (premir uma botoneira por exemplo).

A utilização de *interrupts* no funcionamento de um microcontrolador torna-se bastante útil, uma vez que permite que este se encontre em “modo de espera” até à ocorrência de um determinado evento, não existindo a necessidade de verificar constantemente se existem ou não alterações na sua vizinhança.

Como referido anteriormente, é através dos registos SFR que se definem quais os eventos que originam a entrada num *interrupt*, podendo ser eventos externos ao microcontrolador, como alterações numa entrada digital, ou eventos internos, por exemplo, através da implementação de timers ou contadores.

6.3 Programa desenvolvido

Tendo sido todo o projeto eletrónico desenvolvido juntamente com o desenvolvimento de alguns programas de forma a verificar o correto funcionamento deste, o programa implementado no protótipo final é composto por dois módulos principais.

Um módulo de testes, onde é possível verificar o funcionamento dos componentes da válvula, e um módulo de atuação, responsável pela atuação da válvula de acordo com os requisitos propostos.

Na Figura 6.2 é apresentada a montagem final do trabalho, na qual foram implementados e testados os módulos relativos ao programa final desenvolvido. É de notar que a solução implementada para a interface com o utilizador é através do teclado alfanumérico e do *display* LCD.

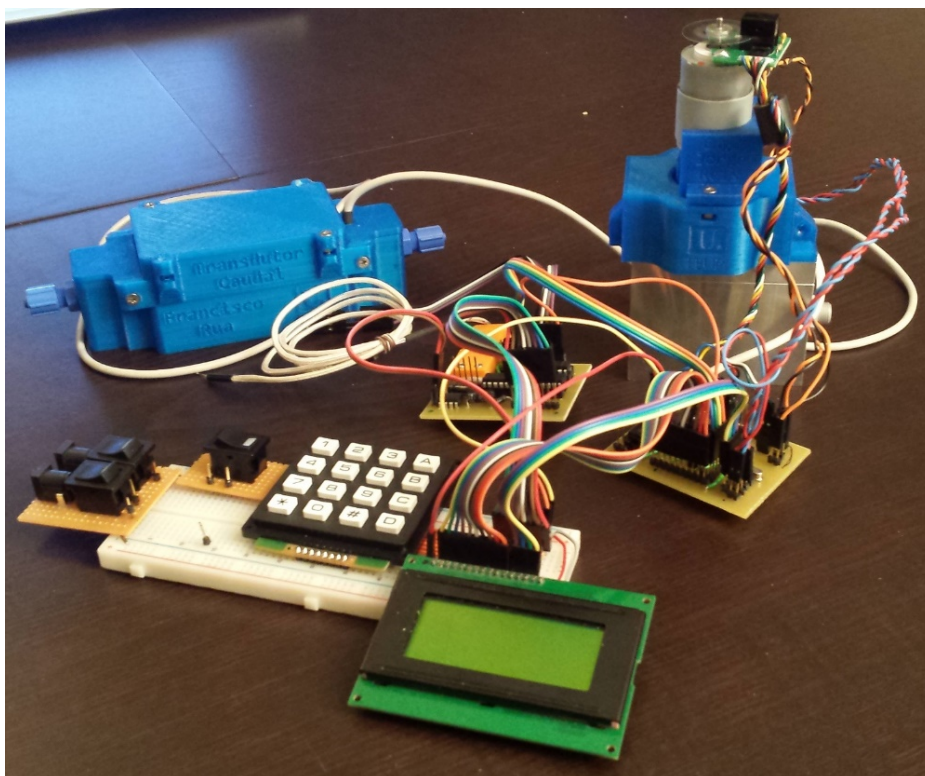


Figura 6.2 – Montagem final

6.3.1 Módulo de Testes

No que diz respeito ao módulo de testes, é um módulo bastante simples composto por um menu principal, a partir do qual é possível aceder a 4 submenus distintos: temperatura, fim de curso, transdutor de caudal e controlo de posição. A partir dos quais é possível verificar o funcionamento dos componentes descritos em baixo:

Temperatura – Verifica os valores da temperatura lida pelo termopar e da temperatura interna do componente MAX 318551;

Fim de Curso – Verifica se os dispositivos de fim de curso, funcionais e mecânicos estão ou não atuados, sendo possível testar o seu correto funcionamento;

Transdutor de Caudal – Apresentação dos valores relativos ao transdutor de caudal, tal como deslocamento (X e Y), intensidade máxima lida (entre 0 e 63) e valor de intensidade das cores principais do led RGB (entre 0 e 256);

Controlo de Posição – Apresentação dos parâmetros relativos ao controlo de posição, tais como a posição (referencia e atual), o erro, e o valor da ação de controlo.

6.3.2 Módulo de Atuação

Em relação ao módulo de atuação, este é o módulo principal da válvula uma vez que é através deste que se pretende obter um funcionamento que vá de encontro aos objetivos definidos inicialmente. Na Figura 6.3 está representado, sobre a forma de diagrama de estados, quais as principais etapas deste módulo.

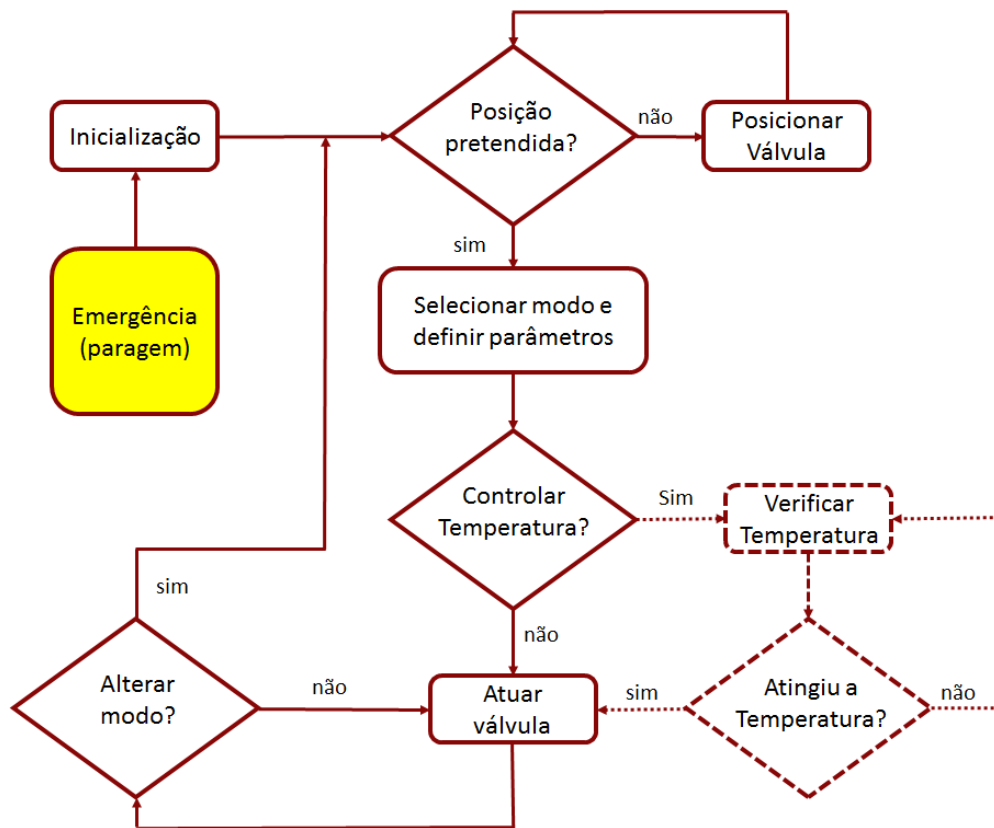


Figura 6.3 – Diagrama de estados relativo ao funcionamento do módulo de atuação

Ao escolher o módulo de atuação, a primeira etapa passa por realizar uma inicialização ao sistema, isto é, fazer uma verificação do correto funcionamento de alguns componentes, assim como fazer uma inicialização das variáveis pré-definidas.

O passo seguinte consiste em fazer uma verificação de qual a posição inicial (normalmente aberta ou fechada), definida pelo utilizador, através do *switch* físico destinado a esse efeito, atuando a válvula, caso necessário, de forma a verificar este primeiro requisito. Após colocar a válvula na posição inicial pretendida, esta encontra-se em condições de poder ser atuada de acordo com as indicações do utilizador.

Nesse momento é apresentado um menu, no qual existem três modos de funcionamento distinto, apresentados mais à frente, dos quais o utilizador deverá escolher um e introduzir os parâmetros referentes a este. Após definido o modo de atuação, o passo seguinte passaria por definir se se pretende ou não controlar a temperatura do fluido, no entanto, uma vez que não existe nenhum sistema de refrigeração/aquecimento do fluido, este parâmetro não pode ser controlado. Por este motivo, no diagrama de estados, os estados relativo ao controlo da temperatura se encontram a traçado, mas a vez que estes não poderão ser abordados, sendo apenas feita uma monitorização da temperatura. É de notar que a máquina de extração de sumo de laranja onde a válvula será implementada estará equipada com um sistema de refrigeração/aquecimento.

Por fim, de acordo com o modo definido pelo utilizador, é feita a ação de controlo da válvula até atingir os requisitos deste. Caso o utilizador pretenda alterar o modo de atuação, o processo regressa à posição inicial onde é verificado se o *switch* relativo à posição inicial da válvula se encontra na mesma posição. Caso se encontre noutra posição, a válvula é atuada de forma a satisfazer o requisito imposto por este componente.

No diagrama de estados é ainda possível ver um bloco de emergência. Este estado é atingido quando se verifica uma situação de emergência, como atingir um fim de curso de emergência. Neste caso só deverá sair deste estado através de uma reinicialização do sistema, onde serão verificados de novo todos os parâmetros necessários para um correto funcionamento.

6.3.3 Modos de atuação

De forma a ser possível satisfazer diversas necessidades do utilizador, foram desenvolvidos três modos de atuação para o protótipo final, tendo em vista a sua implementação numa máquina de sumos, denominados:

- **Manual;**
- **Volume;**
- **Programação.**

No que diz respeito ao primeiro modo, este é bastante simples e permite ao utilizador definir os momentos de abertura e fecho da válvula através da atuação e um dos botões do teclado alfanumérico.

Em relação ao modo “volume”, o utilizador, após definir o valor de caudal pretendido, é responsável apenas pela abertura da válvula da mesma forma que no modo manual, premindo uma tecla do teclado alfanumérico, sendo o fecho da válvula efetuado, de forma automática, após atingir o volume pretendido.

Por fim, o modo “programação” consiste numa junção dos dois modos anteriores. Ao escolher este modo, o utilizador tem a possibilidade de definir qual o volume de líquido pretendido, através de uma atuação manual. Numa fase inicial o utilizador atua a válvula de forma idêntica ao modo manual, abrindo e fechando esta, por intermédio do teclado alfanumérico. Durante esta primeira operação, é registado e memorizado o valor do volume de líquido que passou pela válvula. A partir deste momento, o utilizador atua a válvula da mesma forma que no modo “volume”.

6.4 Conclusão

No presente capítulo procurou-se apresentar de uma forma simples e intuitiva o desenvolvimento efetuado em termos de programação no decorrer da presente dissertação.

Embora este se apresente como o capítulo mais curto em termos de texto produzido, representa grande parte do trabalho desenvolvido ao longo do semestre, uma vez que todos os avanços feitos em termos eletrónicos, referidos nos capítulos 4 e 5,

tiveram por base o desenvolvimento de pequenos programas, introduzidos posteriormente no programa final implementado no protótipo.

No que diz respeito ao desenvolvimento da escrita do programa implementado foi utilizada uma metodologia baseada em sub-rotinas, de forma a facilitar a leitura do código, assim como, possibilitar a utilização de determinados elementos em projetos futuros.

7 Conclusão e trabalhos futuros

7.1 Conclusão

Tendo como referência os objetivos propostos inicialmente para a dissertação, é possível afirmar que estes foram atingidos na sua totalidade, tendo sido mesmo ultrapassados com o desenvolvimento de um novo transdutor de caudal/volume.

No que diz respeito ao controlo e monitorização da válvula, este foi desenvolvido de acordo com o proposto inicialmente, isto é, baseado na utilização de microcontroladores. Foram utilizados dois microcontroladores possibilitando assim a criação de dois módulos distintos, um referente à atuação e controlo, e outro relativo à monitorização e comando, podendo ser implementados, de forma independente, noutras aplicações.

Em termos do acionamento da válvula, este foi feito por intermédio de um motor DC, sendo a leitura de posição feita através de um *encoder* acoplado ao motor com uma resolução de 0.2 graus. Foi ainda implementado, em termos de programação, um controlador PI-D que possibilita a utilização da válvula como uma válvula proporcional.

Relativamente ao projeto mecânico, a utilização de uma impressora 3D como meio de utilizado para a prototipagem dos componentes projetados, revelou-se bastante útil, uma vez que permitiu a obtenção dos componentes relativamente rápido, criando assim condições para que todo o projeto mecânico desenvolvido pudesse ser testado, verificando-se o seu correto funcionamento.

A utilização de tecnologia ótica no protótipo desenvolvido, nomeadamente para os dispositivos de fim de curso, revelou-se uma solução precisa e com um custo

reduzido, não originando a introdução de atrito no sistema de atuação. A implementação desta tecnologia para a medição da posição não pôde ser aplicada, sendo no entanto, o seu princípio de funcionamento testado e verificado, necessitando apenas de alguns ajustes para uma possível implementação.

Por fim, em relação ao desenvolvimento do transdutor de caudal, foi possível confirmar que a solução idealizada para o princípio de funcionamento se verifica, sendo este transdutor, do tipo não invasivo, capaz de detetar e quantificar o deslocamento de partículas presentes no interior do fluido, existindo ainda a possibilidade de um ajuste, para diferentes fluidos, de forma a otimizar o seu funcionamento.

7.2 Trabalhos futuros

Face ao trabalho desenvolvido ao longo da presente dissertação, é possível identificar alguns aspetos possíveis de serem abordados em trabalhos futuros:

- Projetar e desenvolver um protótipo capaz de armazenar toda a eletrónica desenvolvida, assim como, a implementação dos transdutores.
- Alterar o motor DC utilizando um do tipo *coreless* com dimensões mais reduzidas, de forma a obter um protótipo de dimensões mais reduzidas.
- Realizar um estudo relativamente a lentes de focagem e ao escoamento de fluidos, de forma a otimizar a solução idealizada para o transdutor de caudal.
- Implementação da válvula na máquina de extração do sumo de laranja desenvolvida na dissertação anterior.

8 Referências e Bibliografia

8.1 Bibliografia

1. Santos, B.F.R.B.d., *Análise e desenvolvimento de um sistema de extração de sumo de laranja por corte e esmagamento*. 2013.
2. Cabral, P., *Breve História da Medição de Temperaturas*.
3. S Brannan & Sons Ltd. *Thermometers and Pressure Gauge Manufacturer - Brannan Thermometers*. Available from: <http://www.brannan.co.uk/>.
4. Anacleto, A.M.d.C., *Temperatura e sua medição*, in *Departamento de Física*. 2007, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
5. Reis, J.M.D.M., et al., *Laboratórios de Instrumentação para Medição - Aplicações na Área de Engenharia Mecânica (2ª Edição)*. 2003.
6. Tempsens Instrument. *Thermocouple tables*. Available from: <http://tempsens.com/thermocouples.html>.
7. Max Machinery Inc. *Mam Machinery - Precision FLOW Meter Manufacturer*. Available from: <http://www.maxmachinery.com>.
8. Wikipedia. *Flow measurement*. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Flow_measurement.
9. OMEGA Engineering Inc. *Sensors, Thermocouples, PLC, Operator Interface, Data Acquisition, Rtd*. Available from: <http://www.omega.com/prodinfo/rotameters.html>.
10. Munson, B.R., D.F. Young, and T.H. Okiishi, *Fundamentos da Mecânica dos Fluidos*. 2004.
11. Badger Meter Inc. *Badger Meter - Water Meters, Flow Instrumentation & Control Solution*. Available from: <http://www.badgermeter.com/>.
12. Dantec Dynamics. *Dantec Dynamics - Laser Optical Measurement Systems and Sensors*. Available from: <http://www.dantecdynamics.com/>.
13. Measurement Science Enterprise Inc. *Measurement Science Enterprise, Inc.* Available from: <http://measurementsci.com/>.
14. Verle, M., *PIC Microcontrollers – Programing in C*. MikroElektronika.

15. Microchip, *Overview and Use of the PICmicro Serial Peripheral Interface*.
16. Microchip Technology Inc., *PIC18F2331/2431/4331/4431 Data Sheet*. 2010.
17. Almeida, F.G.d. and J.F. Carneiro, *Apontamentos de Sistemas de Controlo*. 2011.
18. Vegte, J.V.d., *Feedback Control Systems*, ed. r. edition. 1993.
19. Ogata, K., *Engenharia de Controle Moderno*, ed. Edição. 2010: Prentice Hall.
20. Microchip Technology Inc., *PIC18F46J50 Data Sheet*. 2011.
21. Axis Communications AB. *Axis Communications - CCD and CMOS sensor technology*. Available from: <http://www.axis.com/>.
22. Software, A. *Phone Vision 06 – RGB Color Intensities*. Available from: <http://azzlsoft.com/>.
23. Wikipedia. *Bayer filter*. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter.
24. Avago Technologies, *ADNS-2610 Optical Mouse Sensor - Data Sheet*. 2008.
25. Mei, T.C., *Understanding Optical Mice*. 2010, Avago Technologies,.
26. Avago Technologies, *Optical Mouse Sensors*.
27. Bachratý, M. and M. Žalman, *2D Position Measurements with Optical Laser Mouse Sensor*.
28. T.W. Ng, *The optical mouse as a two-dimensional displacement sensor*. 2003.
29. Tresanchez, M., et al., *The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder*. 2009.
30. Tresanchez, M., et al., *Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder*. 2010.
31. Bell, S., *High-Precision Robot Odometry Using an Array of Optical Mice*. 2011, Oklahoma Christian University.
32. Tresanchez, M., et al., *Using the Optical Mouse Sensor as a Two-Euro Counterfeit Coin Detector*. 2009.
33. Chan, R.P.M., A.H. Mulla, and K.A. Stol, *Characterisation of Low-cost Optical Flow Sensors*.
34. Ng, T.W. and M. Carne, *Optical mouse digital speckle correlation*. 2007.