



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Dmytro Yantsur

Anemómetro-veleta de fio quente

Dissertação para obtenção do grau de mestre em ciências militares navais, na especialidade de engenharia naval, ramo de armas e eletrônica



Alfeite
2021

ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Dmytro Yantsur

Anemómetro-veleta de fio quente

Dissertação para obtenção do grau de mestre em ciências militares navais, na especialidade de engenharia naval, ramo de armas e eletrónica

Orientação de: Professor Doutor Vítor Viegas

Co-orientação de: Professor Doutor Bruno Damas

O Aluno Mestrando



Dmytro Yantsur

O Orientador



Vítor Viegas

Alfeite

2021

EPÍGRAFE

"I have not failed. I've just found 10,000 ways that won't work."

Thomas Edison

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, por sempre me apoiarem. Sem eles nada seria possível!

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, um agradecimento muito especial para os meus pais que me apoiaram incondicionalmente e acreditaram sempre em mim.

Agradeço ao meu orientador Professor Vítor Viegas pelo seu apoio e dedicação, pelas diretrizes fornecidas ao longo de toda a jornada e pelo facto de estar sempre disposto a auxiliar-me.

Ao meu coorientador, Professor Bruno Damas, pela sua disponibilidade, ajuda e acompanhamento prestado.

À minha namorada, por toda a compreensão e amor que foi demonstrando ao longo do tempo. Um especial agradecimento por toda a força e confiança transmitidas.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos e camaradas mais chegados, pela constante proximidade, companheirismo e partilha de ideias ao longo do trabalho desenvolvido.

RESUMO

O vento, sendo um fenómeno da natureza que não pode ser controlado, sempre despertou curiosidade nos humanos. Visto que o vento tem impacto em grande parte das atividades praticadas, sejam de lazer ou de trabalho, surgiu a necessidade de conseguir medi-lo por forma a se tirar maior partido deste fenómeno. Devido a esta necessidade surgiram os anemómetros e veletas, aparelhos capazes de medir a velocidade e direção do vento respetivamente.

Desde o surgimento dos primeiros anemómetros foram introduzidas novas técnicas e métodos de medição da velocidade do vento, nomeadamente os anemómetros de fio quente, que são nos dias de hoje técnicas muito fiáveis. Os anemómetros de fio quente sendo aparelhos de reduzidas dimensões podem ser aplicados em inúmeros cenários, em particular para o presente trabalho pretende-se utilizar este tipo de anemómetro em veleiros rádio controlados.

O principal objetivo do trabalho consiste na criação de um anemómetro de fio quente, para aplicação num veleiro de vela radio controlada, a partir de materiais de fácil aquisição, nomeadamente lâmpadas de uso comum, por forma a que o custo total seja tão baixo quanto possível. Para tal em primeiro lugar procedeu-se à escolha da lâmpada que apresentou melhor desempenho, dentro das três apresentadas inicialmente, sendo para esse efeito feita uma caracterização estática dos filamentos resistivos. De seguida foi efetuado um estudo relativo ao circuito que seria posteriormente utilizado para implementar o anemómetro. Por último foram feitos testes e medições, com recurso a uma montagem laboratorial especialmente construída para o efeito, de forma a comprovar a viabilidade dos materiais escolhidos.

Palavras-chave: Vento, Instrumento de medida, Anemómetro de fio quente, Veleta, Vela rádio controlada.

ABSTRACT

The wind being a phenomenon of nature that cannot be controlled, has always aroused curiosity in humans. Since the wind has an impact on most activities, whether for leisure or work, the need arose to measure it in order to take greater advantage of this phenomenon. Due to this need, anemometers and sails emerged, devices capable of measuring the speed and direction of the wind respectively.

Since the appearance of the first anemometers, new techniques and methods for measuring wind speed have been introduced, namely hot-wire anemometers, which are today very reliable techniques. The hot wire anemometers being devices of reduced dimensions can be applied in numerous scenarios, in the present work it is intended to use this type of anemometer in radio-controlled sailboats.

The main objective of the work is to create a hot-wire anemometer, for application in a radio-controlled sailing sailboat, from easy-to-purchase materials, including common-use lamps, so that the total cost is as low as possible. To do so, firstly, the lamp that presented the best performance was chosen, among the three initially presented, and for this purpose a static characterization of the resistive filaments was made. Then a study was carried out on the circuit that would later be used to implement the anemometer. Finally, tests and measurements were carried out, using a laboratory assembly specially built for the purpose, in order to prove the viability of the chosen materials.

Keywords: Wind, Measuring Device, Hot Wire Anemometer, Wind Vane, Radio Controlled Sailboat.

ÍNDICE GERAL

<i>EPÍGRAFE</i>	v
<i>DEDICATÓRIA</i>	vii
<i>AGRADECIMENTOS</i>	ix
<i>RESUMO</i>	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
<i>ÍNDICE GERAL</i>	xv
<i>INDICE DE FIGURAS</i>	xvii
<i>ÍNDICE DE TABELAS</i>	xix
<i>ÍNDICE DE EQUAÇÕES</i>	xxi
<i>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS</i>	xxiii
1. Introdução	1
2. Estado de Arte	5
2.1. <i>Medida de velocidade e direção do vento</i>	5
2.2. <i>Anemómetros de fio quente</i>	13
2.2.1. <i>Constituição</i>	13
2.2.2. <i>Condicionamento de sinal</i>	15
2.2.2.1 <i>Anemómetro de Corrente Constante</i>	18
2.2.2.2 <i>Anemómetro de Temperatura Constante</i>	20
2.2.2.3 <i>Anemómetro de Tensão Constante</i>	21
3. Desenvolvimento do Hardware	25
3.1. <i>Caracterização de filamentos</i>	25
3.2. <i>Circuitos de condicionamento de sinal</i>	31
4. Caracterização experimental do anemómetro de fio quente	35
4.1 <i>Medições para diferentes direções</i>	40
5. Instalação e validação do protótipo final	43
Conclusão	47
Bibliografia	51
Apêndices	53

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Anemómetro de conchas (esquerda), anemómetro de fio quente, anemómetro ultrassónico (direita).....	3
Figura 2 - Lâmpada de automóvel (esquerda), lâmpada de frigorífico, lâmpada de candeeiro (direita)	3
Figura 3 - Anemómetro de conchas de John Robinson	5
Figura 4 - Exemplo de anemómetro portátil	6
Figura 5 - Primeiro aparelho capaz de fornecer a direção do vento	7
Figura 6 - Exemplo de anemómetro ultrassónico	7
Figura 7 - Pormenor de filamento de um anemómetro de fio quente	9
Figura 8 - Sistema de anemómetro de fio quente utilizando um computador (Fonte: [15]).....	11
Figura 9 - Exemplos de filamentos de AFQ: (a) filamento unidirecional, (b) filamento em "X" para duas dimensões e (c) filamento ortogonal para três dimensões	15
Figura 10 - Ponte de Wheatstone	16
Figura 11 - Ponte de Wheatstone com elemento ajustável	17
Figura 12 - Configuração típica da ponte de Wheatstone nos AFQ	17
Figura 13 – Exemplo 1 de circuito típico de AFQ em modo CC	19
Figura 14 - Exemplo 2 de circuito típico de AFQ em modo CC	19
Figura 15 - AFQ em modo CT com ponte de Wheatstone, amplificador diferencial.....	20
Figura 16 - Circuito básico de AFQ em modo CV	22
Figura 17 - Lâmpada L1, L2 e L3, da esquerda para a direita, respetivamente.....	26
Figura 18 - Circuito para medição da característica estática dos filamentos	27
Figura 19 – Fotografia da fonte de alimentação Keithley 2200.....	27
Figura 20 - Valores medidos para característica estática lâmpada L1	28
Figura 21 - Valores medidos para característica estática lâmpada L2	29
Figura 22 - Valores medidos para característica estática lâmpada L3	30
Figura 23 - Circuito de condicionamento de sinal para lâmpada L1	32
Figura 24 - Circuito de condicionamento de sinal para lâmpada L2	33
Figura 25 - Circuito de condicionamento de sinal para lâmpada L3	34
Figura 26 - Montagem experimental com lâmpada L1	35
Figura 27- Placa com lâmpada L3	36
Figura 28 - Relação entre velocidade e tensão para a lâmpada L1	38
Figura 29 - Relação entre velocidade e tensão para a lâmpada L2	39
Figura 30 - Relação entre velocidade e tensão para a lâmpada L3	39
Figura 31 - Medições para diferentes ângulos com lâmpada L1	40
Figura 32 - Medições para diferentes ângulos com lâmpada L2	41

Figura 33 - - Medições para diferentes ângulos com lâmpada L3	41
Figura 34 - Esquema das pistas do PCB para o circuito com a lâmpada L3	43
Figura 35 - PCB para circuito com a lâmpada L3.....	44
Figura 36 - Fluxograma para implementação do AFQ com recurso a Arduino	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Escala de Beaufort	2
Tabela 2 - Exemplos de AFQ disponíveis (Fonte: [16]).....	12
Tabela 3 - Exemplos de fabricantes de AFQ (Fonte: [16]).....	12
Tabela 4 - Propriedades físicas de materiais comuns nos AFQ (Fonte: [17])	14
Tabela 5 - Valores medidos para característica estática lâmpada L1	53
Tabela 6 - Valores medidos para característica estática lâmpada L2	54
Tabela 7 - Valores medidos para característica estática lâmpada L3	55
Tabela 8 - Relação entre a velocidade e tensão para a lâmpada L1	56
Tabela 9 - Relação entre a velocidade e tensão para a lâmpada L2.....	57
Tabela 10 - - Relação entre velocidade e tensão para a lâmpada L3	57

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Eq. (1)	16
Eq. (2)	16
Eq. (3)	17
Eq. (4)	18
Eq. (5)	18
Eq. (6)	18
Eq. (7)	18
Eq. (8)	18
Eq. (9)	19
Eq. (10)	21
Eq. (11)	22
Eq. (12)	22
Eq. (13)	22
Eq. (14)	26
Eq. (15)	37
Eq. (16)	37

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AFQ: Anemómetro de Fio Quente

AMPOP: Amplificador Operacional

CC: Corrente Constante

CCA: Anemómetro de Corrente Constante

CT: Temperatura Constante

CTA: Anemómetro de Temperatura Constante

CV: Tensão Constante

CVA: Anemómetro de Tensão Constante

RC: Rádio controlado

1. Introdução














O vento é definido como o fluxo de gases atmosféricos causado por diferenças de pressão atmosférica. Com o aquecimento de uma região na Terra o ar quente nessa região sobe o que cria uma baixa pressão junto ao solo que por sua vez incita a que o ar envolvente, mais frio, se desloque da área de maior pressão, para a área de menor pressão. À escala global os dois principais fatores responsáveis pela existência de vento são as diferenças de temperatura entre o equador e os polos e a rotação do planeta. Devido à diferença entre o aquecimento dos oceanos e dos continentes, formam-se diferentes tipos de vento, denominados de “periódicos”, uma vez que sopram alternadamente num sentido e no sentido inverso, estes ventos são designados monções e brisas [1].

No início do século XIX foi concebida pelo meteorologista anglo-irlandês Francis Beaufort a escala que classifica a intensidade dos ventos, tendo em conta a sua velocidade e efeitos resultantes no mar e em terra. Esta escala, conhecida como “Escala de Beaufort”, oferece uma descrição empírica da velocidade do vento. Inicialmente dividida em 13 níveis, ela foi depois aumentada para dezassete níveis na década de 1940 [2], e é hoje utilizada globalmente com 12 níveis de intensidade, como se pode verificar na Tabela 1

Em Portugal um dos tipos de vento mais conhecidos é a Nortada, que se encontra presente na costa oeste da Península Ibérica durante todo o ano, principalmente nos meses de Verão. A Nortada é causada por um regime de alta pressão presente na região das ilhas dos Açores e por uma baixa pressão continental de origem térmica, que gera circulação de ventos de norte, paralelos à costa. Este fenómeno ocorre durante todo o ano, todavia apresenta uma maior presença no mês de julho, onde as velocidades médias podem atingir valores entre 25 km/h e 32 km/h [3].

Para a medição da velocidade do vento são utilizados anemómetros. Estes aparelhos foram primeiramente usados no século XV, sendo que o tipo de anemómetro que é hoje em dia mais comum e amplamente usado, o anemómetro de conchas, apenas surgiu no século XIX. Com o avanço da tecnologia, o primordial anemómetro de conchas foi aperfeiçoado e surgiram novos aparelhos e formas de medir a velocidade e direção do vento, desde aqueles que utilizam o efeito de Doppler até aos que utilizam ondas sonoras ultrassónicas.

Tabela 1 - Escala de Beaufort

Termos da escala	Velocidade do vento em nós	Descrição	Símbolo meteorológico	Aspecto do mar	Altura da Vaga (metros)
0	0 - 1	Calma		Mar de azeite	0
1	1 - 3	Aragem		Rugas na água em forma de escamas, sem cristas de espuma	0 - 0.10
2	4 - 6	Fraco		Pequenas vagas curtas mas marcadas; cristas translúcidas, mas não rebentam	0.10 - 0.25
3	7 - 10	Bonançoso		Pequenas vagas mais alongadas, as cristas começam a rebentar, espuma vítrea; alguns carneiros	0.25 - 1.0
4	11 - 16	Moderado		Pequenas vagas alongadas, mais carneirada	1.0 - 1.50
5	17 - 21	V. Fresco		Vagas médias de forma alongada, aumenta a carneirada	1.50 - 2.50
6	22 - 27	Muito Fresco (Frescalhão)		Vagas grandes em formação; cristas espumantes com ronciana	2.50 - 4.0
7	28 - 33	Forte		As vagas acumulam-se a espuma alonga-se em fieros esbranquiçados na direcção do vento	4.0 - 5.50
8	34 - 40	Muito Forte (Muito Rijo)		Vagas medianamente altas mas compridas; as cristas rebentam em turbilhão, a espuma estende-se em fieros nítidos na direcção do vento	5.50 - 7.50
9	41 - 47	Tempestuoso		Vagas altas, fieros densos, o mar enrola, a ronciana diminui, por vezes, a visibilidade	7.5 - 10.0
10	48 - 55	Temporal		Vagas muito altas, de cristas compridas e pendentes, ronciana em lençóis estirados em faixas brancas, superfície da água esbranquiçada, o rolo é violento e caótico, má visibilidade	10.0 - 12.0
11	56 - 63	Temporal Desfeito		Vagas excepcionalmente altas, mar coberto de faixas de espuma, os picos das cristas são poeira de água, má visibilidade	12.0 - 16.0
12	> 64	Furacão		O ar está saturado de espuma e ronciana, mar completamente branco, péssima visibilidade	> 16.0

Para poderem navegar autonomamente os veleiros Rádio Controlados (RC) necessitam de receber a informação da velocidade e direcção do vento, o que normalmente é conseguido através da instalação de anemómetros e veletas nos mastros dos veleiros para que as medidas sejam feitas a partir de um local mais elevado e com o mínimo de interferência do casco da embarcação. Para tal são utilizados anemómetros de conchas (Figura 1, esquerda) e veletas cata-vento pois apresentam uma exatidão razoável, são bastante robustos e relativamente baratos. Apesar de aparentemente apresentarem grandes vantagens, estes equipamentos têm a desvantagem de serem pesados e volumosos, o que, quando montados nos mastros dos veleiros, irá prejudicar bastante o comportamento dinâmico da embarcação. A alternativa pode passar por utilizar anemómetros-veleta ultrassónicos (Figura 1, direita), uma vez que são exatos e robustos bem como pequenos e leves, no entanto estes apresentam o senão de serem bastante dispendiosos. Tendo em conta a necessidade de encontrar um equipamento que seja igualmente exato, barato e de

reduzidas dimensões, neste trabalho propõem-se como alternativa a utilização de um anemómetro-veleta de fio quente (Figura 1, centro).

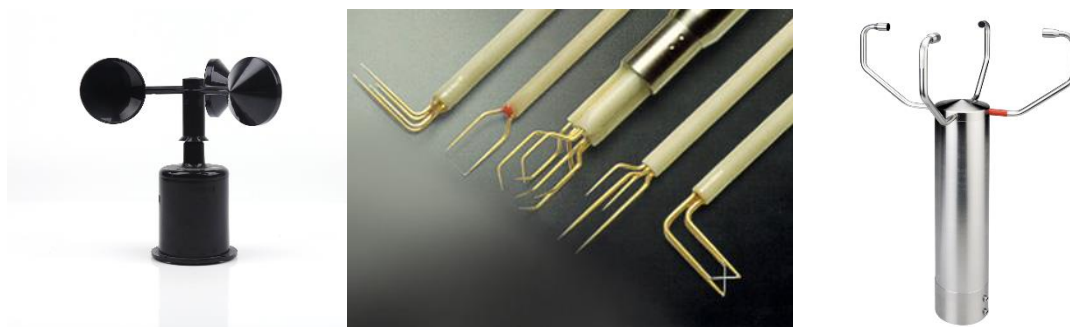


Figura 1 - Anemómetro de conchas (esquerda), anemómetro de fio quente, anemómetro ultrassónico (direita)

A Marinha sempre esteve ligada à prática de vela, seja por motivos de trabalho ou de lazer. Este projeto tem por isso interesse para a Marinha, uma vez que está de acordo com os ideais de incentivar, promover e melhorar a prática de vela, nomeadamente a vela RC, uma vertente mais recente desta modalidade na qual veleiros autónomos e semiautónomos navegam com o auxílio aos equipamentos presentes a bordo. Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho será perceber a viabilidade da construção de um anemómetro-veleta de fio quente utilizando o filamento de tungsténio presente em lâmpadas incandescentes de uso comum.



Figura 2 - Lâmpada de automóvel (esquerda), lâmpada de frigorífico, lâmpada de candeeiro (direita)

A presente dissertação de mestrado é composta por:

- Capítulo 1 (Introdução): Neste capítulo pretende-se apresentar o trabalho, e demonstrar o que será desenvolvido ao longo do mesmo, expondo ao leitor os objetivos, motivação, delimitações do trabalho e metodologia adotada;
- Capítulo 2 (Estado de arte): Sendo este o capítulo dois, inicialmente são

apresentados três tipos de anemômetros, seguindo-se uma resenha histórica relativa a estes mesmos anemômetros, desde o surgimento do primeiro aparelho para medição do vento até aos anemômetros utilizados nos dias de hoje. De seguida o anemómetro de fio quente é explicado mais pormenorizadamente, nomeadamente a sua constituição e os circuitos de condicionamento e sinal existentes;

- Capítulo 3 (Desenvolvimento do hardware): Neste capítulo em primeiro lugar será feita uma caracterização dos filamentos a utilizar durante o trabalho e posteriormente um estudo sobre os circuitos de condicionamento de sinal.
- Capítulo 4 (Caracterização experimental do anemómetro de fio quente): No capítulo quatro serão testados experimentalmente os protótipos construídos;
- Capítulo 5 (Instalação e validação do protótipo final): Neste capítulo pretende-se demonstrar um protótipo final montado e testado em condições mais próximas das reais;
- Capítulo 6 (Conclusão): Serão tiradas conclusões e verificar se é possível responder ao objetivo inicialmente proposto.

2. Estado de Arte

O anemómetro, termo que deriva da palavra grega *anemos* que significa vento, é o aparelho usado para medição da velocidade do vento. Enquanto os primeiros foram inventados há centenas de anos e mediam a velocidade do vento de uma forma muito rudimentar, os atuais anemómetros são equipamentos bastante precisos que conseguem fornecer dados bastante exatos. Existem numerosos tipos de anemómetros, alguns são bastante comuns enquanto outros são bastante raros, sendo assim, neste capítulo serão abordados os anemómetros de conchas, passando pela origem da veleta, seguidos dos anemómetros ultrassônicos e por fim os anemómetros de fio quente por forma a ir de encontro com os objetivos deste trabalho, de abordar o anemómetro de fio quente de forma mais detalhada.

2.1. Medida de velocidade e direção do vento

Aquele que é considerado o primeiro anemómetro mecânico foi construído em 1450 pelo arquiteto italiano Leon Battista Alberti. Este aparelho consistia num disco que era colocado perpendicularmente à direção do vento e que rodava e inclinava-se mostrando momentaneamente a força do vento. Em 1846, John Robinson aperfeiçoou este equipamento construindo quatro conchas hemisféricas dispostas num eixo horizontal, com um mecanismo de rodas dentadas que permitia a rotação do mesmo (Figura 3). John Patterson desenhou este mesmo aparelho utilizando apenas três conchas em 1926, e em 1935 Brevoort e Joiner melhoraram este dispositivo reduzindo significativamente o erro na medição.



Figura 3 - Anemómetro de conchas de John Robinson

Os anemômetros de conchas apesar de serem dos mais antigos e dos mais simples, são, nos dias de hoje, bastante exatos. São normalmente constituídos por três ou quatro conchas montadas sobre uma vara que roda consoante o vento, quanto mais forte é o vento mais rapidamente rodam as conchas. Para calcular a velocidade do vento o número de rotações é contado, sendo posteriormente enviado para o medidor que pode ser tanto analógico como digital. São normalmente desenhados para serem montados em estruturas como edifícios ou navios, mas existem também modelos portáteis (Figura 4) e são utilizados por meteorologistas, instituições educacionais, investigadores e para outros fins comerciais.



Figura 4 - Exemplo de anemómetro portátil

A primeira forma de medir a direção do vento data de 48 Antes de Cristo (AC) pelo astrónomo grego Andronicus. Este construiu uma peça em bronze, que foi posicionada no topo da torre dos ventos em Atenas, como tributo a Triton. O cata-vento apresentava um tronco de homem e uma cauda de peixe, segurando um tridente na mão que fornecia a direção do vento, como se pode verificar na Figura 5.



Figura 5 - Primeiro aparelho capaz de fornecer a direção do vento

No início do século IX, os escandinavos começaram a usar cata-ventos na proa dos seus navios Vikings e nos telhados das igrejas. Estes instrumentos tinham a forma de um quarto de círculo e rodavam sobre um eixo vertical. Durante a idade média os edifícios públicos na Europa eram normalmente adornados com cata-ventos que tinham a forma de setas ou galhardetes, tornando-se cada vez mais em elementos decorativos.

Os anemómetros ultrassónicos são um dos tipos de anemómetro mais avançado disponível nos dias de hoje (Figura 6). Neste modelo de anemómetros a velocidade do vento é obtida enviando ondas sonoras entre pares de transdutores e registando como a velocidade das mesmas é afetada. Apesar de terem como vantagem serem bastante resistentes às condições meteorológicas e não apresentarem partes móveis, evidenciam a grande desvantagem de serem os mais dispendiosos. São normalmente constituídos por dois pares de tubos dispostos num quadrado e podem ser utilizados na aviação bem como em estações meteorológicas. No entanto são bastante raros devido ao seu elevado custo de aquisição.



Figura 6 - Exemplo de anemómetro ultrassónico

Este método de utilizar ondas sonoras do anemómetro sónico para calcular a velocidade do vento mostrou ser bastante promissor durante o século XX e as suas características atrativas, nomeadamente não apresentar partes móveis, o curto tempo de resposta e a linearidade da sua resposta, fizeram com que a atenção fosse dirigida para o seu desenvolvimento. Carrier e Carlson [4] são considerados os primeiros a pensar num anemómetro sónico para utilização num dirigível. A velocidade do vento era obtida através da medição da diferença de fase do sinal recebido entre dois microfones, um localizado a favor do vento e outro contra o vento, respetivamente, de uma fonte de som comum. Porém este instrumento nunca foi terminado. Barret e Suomi [5] descreveram um termómetro sónico em que a temperatura é calculada a partir do tempo de trânsito dos pulsos de som no ar. Corby [6] descreveu um anemómetro usando uma fonte de som única e quatro microfones posicionados de forma equidistante sobre os quatro pontos cardeais de uma bússola. Em 1959 Gurvich [7] desenvolveu um instrumento muito pequeno, o “microanemómetro acústico”, que foi usado para medir a componente vertical do vento. A tentativa mais bem-sucedida de construir um anemómetro sónico foi conseguida por Suomi [8], no seu instrumento a medição das flutuações da velocidade do vento era obtida através da medição do tempo de deslocação de duas séries de pulsos a viajar em direções opostas sobre um caminho definido. Este tipo de anemómetros tem sido cada vez mais utilizado, dadas as suas vantagens sobre os modelos anteriores, no entanto a sua adoção está a ocorrer de forma lenta, pois estes apresentam um elevado custo de aquisição.

Os anemómetros de fio quente utilizam um filamento bastante fino que é aquecido acima da temperatura ambiente, tal que o vento ao passar sobre o filamento arrefece-o. Sabendo que a resistência elétrica da maioria dos metais está dependente da sua temperatura, é possível obter uma relação entre a resistência do filamento e a velocidade do vento. As formas de implementar este tipo de anemómetros são várias e serão explicadas mais adiante neste capítulo. Os anemómetros de fio quente, apesar de serem extremamente delicados, apresentam a grande vantagem de serem menos intrusivos do que os anemómetros de conchas e mais baratos que os anemómetros ultrassónicos (Figura 7).



Figura 7 - Pormenor de filamento de um anemómetro de fio quente

Apesar de ser difícil de definir com precisão, estima-se que os anemómetros de fio quente (AFQ) tenham começado a ser estudados e utilizados no final do século XIX e início do século XX, uma vez que o primeiro artigo relacionado com a anemometria de fio quente foi publicado em 1817 [9]. Apesar de não ser nova, esta tecnologia foi abandonada uma vez que os equipamentos disponíveis eram demasiado rudimentares e só mais tarde, com o aprimoramento da eletrónica de condicionamento de sinal, é que estes aparelhos começaram a ganhar popularidade.

Um dos primeiros estudos feitos sobre a transferência de calor em fios aquecidos foi feito por Boussinesq [10] em 1905. Esses resultados teóricos obtidos por Boussinesq foram confirmados experimentalmente por King [11]. Não obstante estes estudos iniciais, os AFQ apenas tinham em consideração o valor médio da transferência de calor do fio aquecido. Só mais tarde, em 1929, foram realizadas as primeiras medições quantitativas das flutuações em fluxos subsónicos por Dryden e Kuethe [12], usando a técnica de anemómetro de corrente constante (CCA) e amplificando a resposta em frequência do fio com auxílio de um amplificador compensador. Foi em 1934 que Ziegler [13] desenvolveu o anemómetro de temperatura constante (CTA) usando um amplificador com realimentação para manter a temperatura do fio constante a uma dada frequência, todavia o seu uso foi bastante limitado até à introdução dos circuitos com transístores. Mais tarde uma grande porção do trabalho foi dedicada à compreensão mais detalhada da resposta do filamento e ao melhoramento do circuito de condicionamento de sinal, ademais foi também sugerido começarem a ser medidas outras variáveis além da velocidade, nomeadamente a temperatura ou mesmo a densidade e concentração do fluido, uma vez que o arrefecimento do fio é função da massa do fluxo ao invés de apenas da velocidade.

Os AFQ podem ser subdivididos em três categorias, sendo elas: anemómetros resistentes para aplicações industriais, anemómetros de resistência média, alimentados a baterias para uso comercial, e anemómetros para utilização em projetos de investigação e pesquisa, sendo estes mais frágeis/delicados e de dimensões mais pequenas. Os anemómetros comerciais são vastamente utilizados para medições em tubagens ou canalizações industriais pois se o fluxo de ar é bem conhecido, apenas é necessário um ponto de medição para obter bons resultados, no entanto se não for bem definido, podem ser utilizados anemómetros com possibilidade de colocar sensores em vários pontos. Estes anemómetros apresentam-se como sendo bastante exatos para baixas velocidades, podem atingir um grande alcance de valores, têm uma boa resposta em frequência e mantêm a sua exatidão durante bastantes anos sem a necessidade de serem calibrados. Ainda assim é aconselhado que sejam utilizados apenas em ar filtrado, devido ao perigo de contaminação do filamento.

Uma aplicação interessante dos AFQ é na medição da pressão diferencial entre dois espaços adjacentes, como um quarto de hospital e o corredor. Estes espaços estão conectados através de um tubo e a diferença de pressão entre eles cria um fluxo de ar. Um AFQ é capaz de medir a velocidade deste fluxo e esta velocidade é indicativa da diferença de pressão entre as duas áreas contíguas. Dado que a velocidade do fluxo neste contexto costuma ser muito reduzida, outros equipamentos não seriam capazes de a detetar. Sendo assim, devido à sua boa resposta em frequência, os AFQ podem também ser utilizados para fins médicos, nomeadamente para medir o caudal de ar, oxigénio, óxido nítrico ou outros gases que possam ser administrados a pacientes. Em particular, estes anemómetros são empregues na monitorização do fluxo de oxigénio dentro dos ventiladores usados em pacientes que necessitem de ajuda a respirar [14].

Por outro lado, os anemómetros empregues em estudos científicos não são adequados ao uso comercial, devido à sua natureza mais frágil. Estes, por norma, são acoplados a um computador como se pode ver na Figura 8. É através do computador que é possível fazer a configuração e o controlo, bem como a visualização dos dados e análise dos mesmos. Os sistemas modernos possuem circuitos de baixo ruído e são capazes de atingir respostas em frequência na ordem dos 300 kHz. Outros sistemas, mais baratos, conseguem respostas até aos 10 kHz. No software do computador é possível acompanhar,

praticamente em tempo-real, a velocidade, distribuição de probabilidade e a intensidade da turbulência. Além disso com pós-processamento, é ainda possível receber outras estatísticas como: velocidade média, desvio padrão, distorção, outros coeficientes de correlação e o ângulo da direção do fluxo para filamentos 2-D e 3-D.

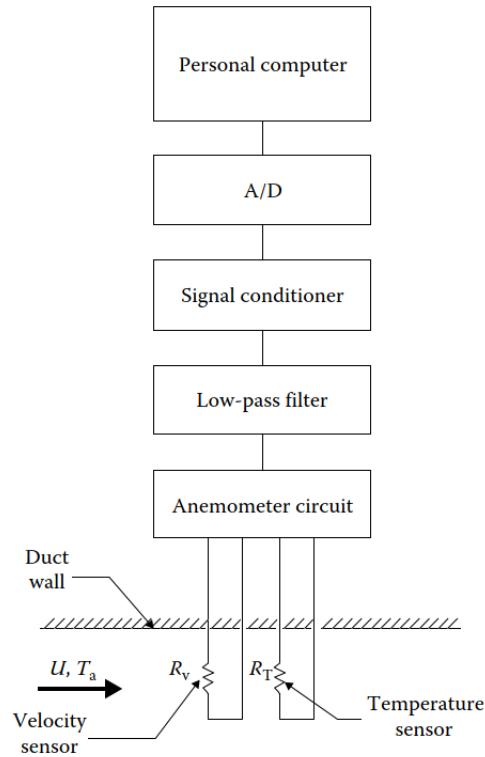


Figura 8 - Sistema de anemômetro de fio quente utilizando um computador (Fonte: [15])

Os AFQ destinados às pesquisas científicas foram primeiramente introduzidos no início da década de 1960, enquanto os AFQ comerciais apenas surgiram no final da década de 1970. Nos dias de hoje, existem AFQ portáteis, que são bastante populares entre os profissionais responsáveis por realizar medições do ar, sendo que existem inúmeros equipamentos destes disponíveis no mercado, alguns deles são apresentados nas Tabela 2 e Tabela 3. Na Tabela 2 verifica-se que os anemômetros portáteis são os menos dispendiosos, enquanto por outro lado os anemômetros destinados às pesquisas científicas podem chegar a custar algumas dezenas de milhares de dólares. Todos os aparelhos apresentados incluem o sensor, bateria e um display. Os que se apresentam como “multi-parâmetro” possuem as funções de medição da velocidade, temperatura, humidade e diferença de pressão, incluindo ainda a capacidade de armazenar os dados recolhidos [16].

Tabela 2 - Exemplos de AFQ disponíveis (Fonte: [16])

Product Description	Approximate 2010 U.S. Price
Portable battery-operated instruments	
Basic portable air velocity meter	\$300–\$900
Data-logging multiparameter portable air velocity meter	\$700–1,500
Installed duct monitoring systems	
Single-point air velocity probe	\$300–\$800
Multipoint air-duct flow monitoring system	\$2,000–\$10,000
Research systems	
Single-channel hot-wire or hot-film anemometer system	\$25,000
Three-component hot-wire anemometer system	\$35,000

Na Tabela 3 é possível obter informações acerca de alguns dos principais fabricantes de anemómetros comerciais, portáteis ou fixos, bem como anemómetros de pesquisa, estas informações incluem o nome do fabricante, a morada e contacto telefónico ou eletrónico.

Tabela 3 - Exemplos de fabricantes de AFQ (Fonte: [16])

Portable battery-operated instruments	
TSI Incorporated, 500 Cardigan Road, Shoreview, MN 55164, Tel.: 1 800 874 2811, info@tsi.com	
Dwyer Instruments, Inc., P. O. BOX 373, Michigan City, IN 46361, Tel.: 219 879 8000, info@dwyer-inst.com	
Extech Instruments Corp., 285 Bear Hill Road, Waltham, MA 02451, Tel.: 781 890 7440, sales@extech.com	
Testo, Inc., 40 White Lake Road, Sparta, NJ 07871, Tel.: 1 800 227 0729, info@testo.com	
Kanomax USA, Inc., P. O. Box 372, 219 US Hwy. 206, Andover, NJ 07821, Tel.: 1 800 247 8887, info@kanomax-usa.com	
TES Electrical Electronic Corp., 7F, No 31, Lane 513, Rui Guang Road, Neihu Dist. Taiwan, Republic of China, Tel.: 866 2 27999 3660, www.tes.com.tw/indexe.htm	
Single-point duct monitoring systems	
TSI Incorporated, 500 Cardigan Road, Shoreview, MN 55164, Tel.: 800 874 2811, info@tsi.com	
Sierra Instruments, Inc., 5 Harris Court, Building L, Monterey, CA 93940, Tel.: 800 866 0200, info@sierrainstruments.com	
Dwyer Instruments, Inc., P. O. BOX 373, Michigan City, IN 46361, Tel.: 219 879 8000, info@dwyer-inst.com	
E+E Elektronik, Langwiesen 7, A-4209 Engerwitzdorf, Austria, Tel.: 43 7235 605-0, info@epluse.com	
Multipoint duct monitoring systems	
Ebtron, Inc., 1663 Highway 701 South, Loris, SC 29569, Tel.: 843.756.1828, www.ebtron.com	
Air Monitor Corporation, 1050 Hopper Avenue, Santa Rosa, CA 95406, Tel.: 919 491 2127, amcsales@airmonitor.com	
Research systems	
TSI Incorporated, 500 Cardigan Road, Shoreview, MN 55164, Tel.: 800 874 2811, info@tsi.com	
Dantec Dynamics A/S, Tonsbakken 16–18, DK-2740 Skovlunde, Denmark, Tel.: 45 44 57 80 00, www.dantecdynamics.com	

Tendo em conta que o principal objetivo deste trabalho é perceber a viabilidade de construção de um anemómetro de fio quente a partir de uma lâmpada de uso comum com vista à sua utilização em veleiros RC, nos próximos capítulos o principal foco serão os AFQ.

2.2. Anemômetros de fio quente

2.2.1. Constituição

No AFQ o sensor é tipicamente um filamento metálico fino, com diâmetros entre os 0,5 μm e 5 μm e um comprimento entre 0,1 mm e 10 mm. O material utilizado costuma ser platina ou tungstênio, podendo também ser usado o irídio ou ligas de platina-ródio. Este filamento é normalmente preso a duas pontas, cujo material pode ser aço inoxidável ou níquel. Para filamentos extremamente finos o material escolhido tende a ser platina ou ligas de platina, uma vez que se encontra disponível com diâmetros tão pequenos quanto 0,25 μm sob a forma de fio de Wollaston. Neste processo, uma haste bastante fina de platina é coberta por uma camada grossa de prata. Esta peça é depois passada através de um filtro para ficar com um diâmetro externo menor. Por fim, ao soldar o fio de Wollaston às pontas, o pequeno e frágil filamento de platina pode ficar exposto com apenas uma bainha de proteção de prata. No caso do tungstênio não existe um material adequado para conferir proteção, o que implica a que o processo de Wollaston não pode ser aplicado. Em alternativa o filamento de tungstênio é inicialmente reduzido ao seu diâmetro mínimo possível, entre 10 μm a 12 μm , e a redução final é conseguida através de um banho em ácido que produz filamentos com diâmetros desde os 2 μm . É depois necessário soldar o filamento às pontas de suporte.

Os AFQ são geralmente usados para medição do fluxo de gases devido ao seu tamanho diminuto e características de calibração bem definidas. Para obter uma boa resposta em frequência a maioria dos filamentos tem um diâmetro de 5 μm ou menos. Filamentos tão finos são muito frágeis, e a sua resistência à tração torna-se um parâmetro operacional bastante importante. Como é mostrado na Tabela 4, o tungstênio apresenta uma resistência à tração muito mais elevada quando comparado à platina e às ligas de platina.

Material	Resistência à Tração (N cm ⁻²)	Coefficiente de Temperatura, α (°C ⁻¹)	Resistividade, ρ ($\mu\Omega$ cm)	Condutividade de Térmica κ (W cm ⁻¹ °C ⁻¹)	Densidade, ρ (kg m ⁻³)	Capacidade Térmica Mássica c (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Ponto de Fusão (°C)	Comentários
Tungsténio	250000	0,0036	5,5	1,9	19300	0,14	3410	Oxida acima de 350°C,
Platina	35000	0,0038	9,8	0,7	21500	0,13	1770	Suave e fraco
Platina - Ródio	70000	0,0016	19	0,4	19900	0,15	1830	Mais forte que a platina
Platina - Iridio	140000	0,0008	32	0,17	21600	0,13	1840	Mais forte que a platina

Tabela 4 - Propriedades físicas de materiais comuns nos AFQ (Fonte: [17])

Apesar do tungsténio apresentar um alto ponto de fusão, cerca de 3400 °C, não pode ser utilizado a temperaturas tão elevadas uma vez que oxida a partir dos 350 °C. Este material é, portanto, utilizado a uma temperatura média de filamento abaixo dos 250 °C. Outra alternativa passa por aplicar um revestimento em platina ao filamento de tungsténio, para aumentar a resistência à oxidação e ainda a estabilidade a longo termo. Para operar em altas temperaturas, 150°C a 750°C, são utilizados filamentos de platina, ou ligas de platina [18].

A Figura 9 apresenta três diferentes tipos de filamentos disponíveis capazes de medir a direção de fluxos desde uma dimensão, passando por duas e até três dimensões. Os filamentos unidirecionais devem ser posicionados de forma que o elemento resistivo permaneça perpendicular ao fluxo e as suas pontas devem, preferencialmente, ficar paralelas ao fluxo, para uma medição mais eficiente. Nos filamentos dispostos em “X”, Figura 9(b) é possível decompor o vetor velocidade do fluxo em duas componentes ortogonais, quando este atravessa uma região cônica de $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo axial do filamento. Os sensores de três dimensões, conforme ilustrado na Figura 9(c) são também conhecidos como tri-axiais ou *split probe*. Estes podem atuar em três dimensões, com a limitação de apenas ser capaz de efetuar medições num cone de $\pm 70^\circ$ em relação ao eixo axial do sensor. Para este modelo conseguir decompor o vetor da velocidade em três componentes ortogonais, é normalmente definida uma resolução espacial com a forma de uma esfera, de diâmetro ligeiramente inferior ao comprimento de um dos filamentos.

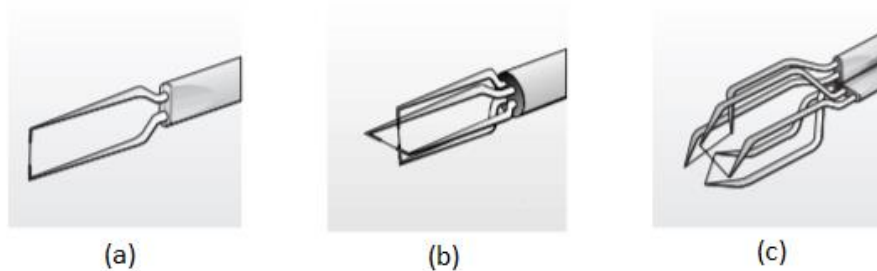


Figura 9 - Exemplos de filamentos de AFQ: (a) filamento unidirecional, (b) filamento em "X" para duas dimensões e (c) filamento ortogonal para três dimensões

2.2.2. Condicionamento de sinal

Os AFQ são normalmente utilizados para medir a velocidade de fluidos em três modos, nomeadamente, Corrente Constante (CC), Temperatura Constante (CT) e Tensão Constante (CV). O modo mais simples é o modo CC, a sua configuração é muito flexível, mas requer um ajuste manual para manter a qualidade da resposta em frequência. O modo CT adiciona uma realimentação (*feedback loop*), em que uma vez calibrados estes AFQ são capazes de se auto-ajustar, o que os torna bastante atrativos. Por último existem os AFQ em modo CV que mantêm a tensão em torno do filamento constante. Tanto no modo CC como no modo CV a temperatura do filamento varia, por outro lado, no modo CT a resistência do filamento, e deste modo a sua temperatura, é mantida constante, variando para isso a corrente que percorre o mesmo.

Estes modos podem ser implementados de diversas formas, sendo que a forma que é possivelmente a mais popular é a que surgiu durante o século XIX, conhecida por ponte de Wheatstone. Segundo Pallás-Areny & Webster [19], este circuito foi desenvolvido por Samuel Hunter Christie em 1833, que o denominou desta forma, como homenagem aos trabalhos de Charles Wheatstone. A Figura 10 ilustra a ponte de Wheatstone, que consiste em quatro resistências ligadas em forma de quadrilátero.

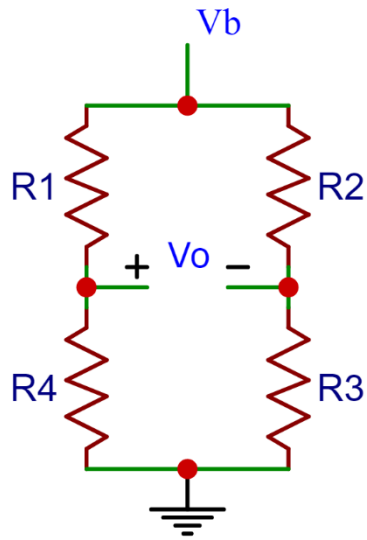


Figura 10 - Ponte de Wheatstone

Neste circuito, a tensão de alimentação é aplicada no nó V_b , enquanto a tensão de saída é obtida nos dois nós de V_o . No caso de as quatro resistências serem todas iguais, a leitura da tensão da ponte é nula para qualquer tensão aplicada, segundo a Eq. (1):

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \quad \text{Eq. (1)}$$

A ponte de Wheatstone torna assim possível medir a resistência elétrica, de forma indireta, através da comparação dos valores das restantes resistências, independentemente do valor da tensão de alimentação. Neste circuito a tensão de saída é diretamente proporcional ao valor da tensão V_b e quando é necessário medir a tensão de saída em função da variação de alguma das resistências dos braços é possível utilizar a Eq. (2):

$$V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_4} V_b - \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_b \quad \text{Eq. (2)}$$

Outra utilização mais simples deste circuito consiste em medir a variação da resistência de um único elemento da ponte como se pode observar na Figura 11. Tanto na Figura 11 como na Figura 12, R_1 , R_2 , R_3 e R_4 têm o valor nominal, central, R . Para uma variação de ΔR de uma resistência R pode ser considerada a Eq. (3)

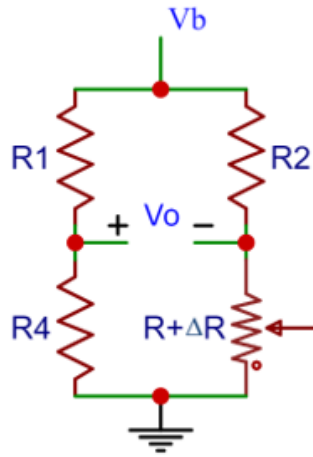


Figura 11 - Ponte de Wheatstone com elemento ajustável

$$V_o = \frac{V_b}{4} \left(\frac{-\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right) \quad \text{Eq. (3)}$$

Nos AFQ, um dos elementos da ponte de Wheatstone costuma ser o próprio filamento, tomando por isso o circuito a forma apresentada na Figura 12. Neste circuito R_{ADJ} , corresponde a um potenciômetro que é normalmente conhecido como resistência de *overheat*, uma vez que permite o ajuste da temperatura de funcionamento do filamento, variando a intensidade de corrente que atravessa o mesmo. Aumentando o valor de R_{ADJ} , maior será a intensidade da corrente no braço oposto da ponte. Inicialmente o valor de R_F é definido, ajustando R_{ADJ} , através da relação definida na Eq. (1), onde $R_{ADJ} = R_3$ e $R_4 = R_F$, que apenas se aplica se a ponte se encontrar em equilíbrio. Este ajuste inicial, necessário para a operação do AFQ em modo CC torna-se trabalhoso.

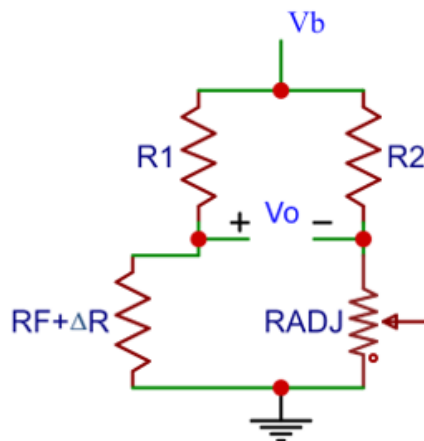


Figura 12 - Configuração típica da ponte de Wheatstone nos AFQ

A relação entre as resistências R_1 e R_2 é conhecida como razão da ponte (*bridge ratio*) e é definida segundo a Eq. (4). Segundo Goldstein [20] esta está relacionada com a resposta em frequência do circuito e apesar de uma razão de 1:1 assegurar uma melhor resposta em frequência, devido à estabilidade, muitos anemômetros costumam utilizar razões de 1:10 ou 1:20.

$$BR = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{Eq. (4)}$$

A resistência equivalente da ponte, R_{eq} , pode ser determinada, usando a Eq. (5), para obter o consumo total da ponte por meio da Eq. (6).

$$R_{eq} = \frac{(R_1 + R_F)(R_2 + R_{ADJ})}{R_1 + R_2 + R_F + R_{ADJ}} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$P_{ponte} = \frac{V_b}{R_{eq}} \quad \text{Eq. (6)}$$

2.2.2.1 Anemómetro de Corrente Constante

Num anemómetro em modo CC o filamento é alimentado por uma fonte de corrente constante e a tensão aos seus terminais varia em função da sua resistência, temperatura e velocidade do vento. Nas Figura 13 e Figura 14 são demonstradas duas das formas mais simples de implementar os AFQ em modo CC. No caso da Figura 13 a corrente é seleccionada de forma que o sensor opere à temperatura desejada, no meio requerido, através do ajuste da tensão V_{REF} ou da resistência R visto que essa corrente, I , é definida segundo a Eq. (7):

$$I = \frac{V_{REF}}{R} \quad \text{Eq. (7)}$$

Tem-se assim que a saída do anemómetro, V_o , é igual à Eq. (8)

$$V_o = R_F \times I + V_{REF} \quad \text{Eq. (8)}$$

Na Figura 14 a corrente I é igualmente definida pela Eq. (7), no entanto V_o passa a ser definido pela Eq. (9):

$$V_o = -R_F \times I \quad \text{Eq. (9)}$$

Em ambos os circuitos a corrente I não depende da resistência do filamento R_F . Se a transferência de calor entre o meio e o sensor aumentar, o filamento tem tendência a arrefecer, consequentemente descendo a sua resistência.

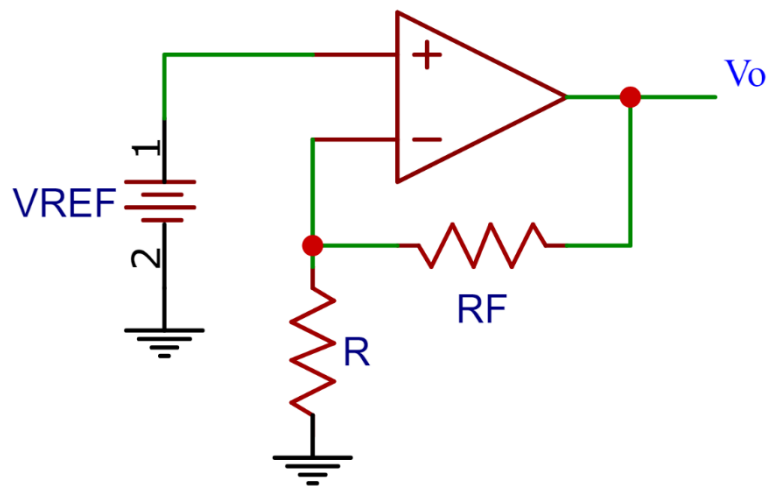


Figura 13 – Exemplo 1 de circuito típico de AFQ em modo CC

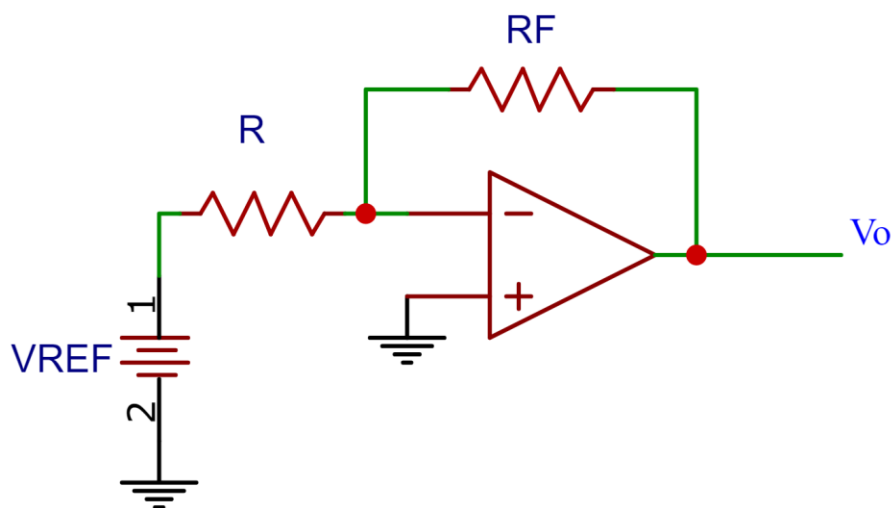


Figura 14 - Exemplo 2 de circuito típico de AFQ em modo CC

Sheppard em [21], apresentou a evolução dos circuitos de AFQ em modo CC, enquanto outros como Perry [22] e Bruun [17] explicam o princípio básico de funcionamento destes anemómetros.

2.2.2.2 Anemómetro de Temperatura Constante

Existem grandes vantagens em manter o filamento do AFQ a uma temperatura constante, uma vez que a inércia térmica do sensor é automaticamente ajustada quando as condições do fluxo variam. Este modo de operação, CT, é conseguido através da incorporação de um amplificador com realimentação negativa no circuito do AFQ, que compensa as rápidas variações na velocidade do fluxo.

Estas vantagens foram reconhecidas ainda num estado inicial por Weske [23] e Ossofsky [24], no entanto só durante a década de 1960 surgiram AFQ em modo CT de confiança, com o desenvolvimento de amplificadores em circuitos integrados altamente estáveis. O princípio de funcionamento do AFQ em modo CT é apresentado na Figura 15 e verifica-se que, tal como no modo CC, o filamento encontra-se dentro da ponte de Wheatstone.

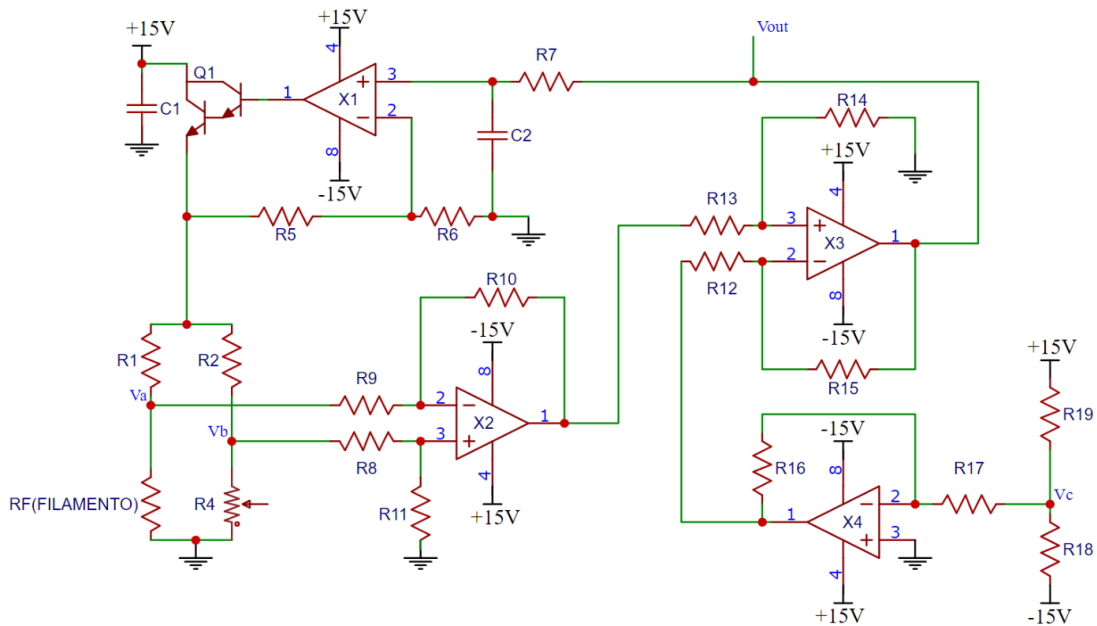


Figura 15 - AFQ em modo CT com ponte de Wheatstone, amplificador diferencial.

Com a variação do fluxo de ar a resistência do filamento, R_F , varia, causando uma alteração no valor da tensão nos nós V_a e V_b da ponte de Wheatstone com uma *bridge ratio* de 1:2, ajustada através das resistências R_1 e R_2 . Esta variação é recebida pelo primeiro amplificador operacional (AMPOP), X2, que amplifica 100 vezes este valor. A resistência variável R_4 permite o ajuste do fator de sobreaquecimento do anemômetro. Este parâmetro define a temperatura de funcionamento do filamento, considerando as propriedades do fluido a ser medido, como pode ser visto na Eq. (10). Para utilização do filamento para medições de gases tem-se o parâmetro $\alpha = 0,8$, porém para medições em meios líquidos tem-se $\alpha = 0,1$.

$$R_4 = BR[(1 + \alpha)R_{filamento} + R_{cabo} + R_{suportes}] \quad \text{Eq. (10)}$$

A tensão de saída do AMPOP X2 é enviada para o AMPOP X3 de forma a ser posteriormente somada ao ajuste de *offset*. De seguida está presente um sub-circuito que é responsável pela manutenção das variações de tensão e corrente constantes, por meio do AMPOP X1. O condensador C2 funciona como um filtro passa-baixo, enquanto o transistor Darlington é responsável por controlar a corrente no *loop* de realimentação. Toda a alimentação do circuito é garantida por uma fonte de tensão simétrica de ± 15 V.

2.2.2.3 Anemômetro de Tensão Constante

O Anemômetro de Tensão Constante (CVA) foi projetado e desenvolvido em 1991 por Sarma [25] como tentativa de proporcionar um instrumento que conseguisse contemplar as melhores características do CCA e do CTA, mitigando as suas maiores desvantagens. Os princípios de funcionamento são detalhadamente explicados por Sarma [26]. Mais recentemente, em 2015, Taifour [27] descreveu um circuito de AFQ em modo CV ligeiramente modificado indicando os procedimentos detalhados para obter os parâmetros do circuito. O esquema básico do circuito apresentado por Sarma é mostrado na Figura 16. Este consiste numa fonte de tensão constante V_{dc} , resistências R_1 , R_2 e R_3 , um AMPOP com ganho elevado e o sensor com resistência R_F .

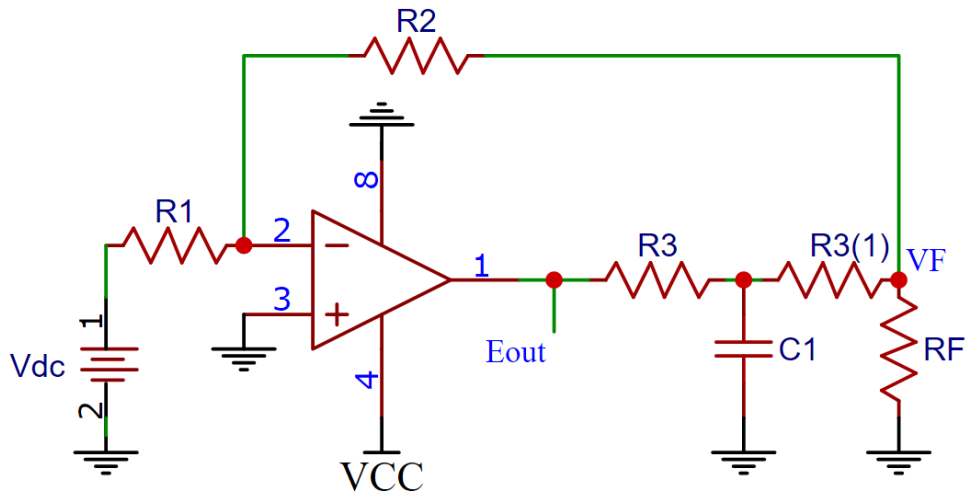


Figura 16 - Circuito básico de AFQ em modo CV

Ao aplicar a lei de Ohm ao *loop* que inclui V_{dc} , R_1 e a tensão $\varepsilon \approx 0$ à entrada do AMPOP temos a Eq. (11), onde a intensidade da corrente do *loop* corresponde a i_1 .

$$V_{dc} - R_1 i_1 = 0 \quad \text{Eq. (11)}$$

Tem-se, portanto, $i_1 = V_{dc} / R_1$. Sabendo que esta corrente i_1 é a mesma que percorre R_F e V_F a Eq. (11) fica como:

$$\left(\frac{V_{dc}}{R_1}\right) R_F + V_F = 0 \quad \text{Eq. (12)}$$

Que por sua vez equivale a:

$$V_F = -\left(\frac{R_F}{R_1}\right) V_{dc} \quad \text{Eq. (13)}$$

Uma vez que $V_F = IR_F$, a tensão V_F pode ser escolhida de forma que a corrente que atravessa o sensor forneça a razão de sobreaquecimento desejada. Qualquer mudança na resistência do sensor, devido à variação do fluxo de ar, conduz a uma alteração na intensidade da corrente que percorre o sensor. O único caminho que esta corrente pode

seguir é através da impedância Z , no *loop* de realimentação do AMPOP, que é a impedância entre a saída do AMPOP e a tensão V_F . Esta impedância é composta pela resistência R_3 , $R_{3(1)}$ e o condensador C_1 , que tem a função de filtro passa-baixo. Tal variação na corrente, ΔI , é medida como uma queda de tensão na resistência R_3 e $R_{3(1)}$, isto é, $\Delta I = (E_{out} - V_w) / Z$, onde E_{out} é a saída do anemómetro. Portanto mesmo uma pequena mudança na resistência do sensor, ou seja, na corrente que atravessa o sensor, pode ser medida como sendo uma grande queda de tensão em torno de R_3 e $R_{3(1)}$. A saída de grande amplitude é uma característica conhecida dos AFQ em modo CV. Sarma [26] utiliza os seguintes valores para o circuito da Figura 16: $V_{dc} = 10 \text{ V}$, $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 200 \text{ }\Omega$, $R_F = 10 \text{ }\Omega$ e $R_3 + R_{3(1)} = 100 \text{ }\Omega$. Sob estas condições, a intensidade da corrente que atravessa o filamento é de cerca de 40 mA e uma alteração de 5%, $\Delta I = 2 \text{ mA}$, equivale a uma saída, E_{out} , de 200 mV, que é facilmente mensurável.

3. Desenvolvimento do Hardware

Neste capítulo é apresentado o hardware necessário para atingir o objetivo proposto. Sendo assim, em primeiro lugar, foi necessário proceder à caracterização elétrica de filamentos incandescentes para serem utilizados como sensor do anemómetro. Posteriormente foi efetuada uma análise sobre quais os melhores circuitos de condicionamento de sinal para concretizar o AFQ.

3.1. Caracterização de filamentos

Para este processo foram escolhidas três lâmpadas com filamento de tungsténio, em que a escolha deste tipo de filamentos prende-se, sobretudo, com o seu baixo custo, a sua vulgaridade, e as suas reduzidas dimensões.com as seguintes características:

- Primeira lâmpada (identificada como “L1”):
 - Lâmpada utilizada como luz de médios em automóveis;
 - Potência de 21 W;
 - Filamento curto, robusto, pouco oscilante e disposto sobre uma única reta, preso a dois suportes.

- Segunda lâmpada (identificada como “L2”):
 - Lâmpada utilizada como luz de frigorífico;
 - Potencia de 40 W;
 - Filamento comprido, frágil, bastante oscilante e disposto sobre uma curva apoiando-se em vários suportes.

- Terceira lâmpada (identificada como “L3”):
 - Conjunto de quatro lâmpadas de candeeiro com casquilho G4 ligadas em série;
 - Potência de 20 W (potência total das quatro lâmpadas ligadas em série);
 - Filamento curto, robusto pouco oscilante e disposto sobre uma única reta, preso a dois suportes;

Daqui em diante as lâmpadas serão designadas para maior conveniência por L1, L2 e L3, respectivamente (Figura 17).



Figura 17 - Lâmpada L1, L2 e L3, da esquerda para a direita, respectivamente

Estas três lâmpadas apesar de apresentarem especificações e funções diferentes, têm em comum o material utilizado no filamento. Como foi referido no capítulo anterior o tungstênio é um material que apresenta uma grande resistência à tração, que é a capacidade de um material de resistir ao *stress* causado por este ser puxado pelos seus extremos sem quebrar. Outra característica que tem impacto na escolha deste material é o coeficiente de temperatura, sendo que este descreve a mudança na resistência (R) associada a uma alteração ΔT na temperatura. O coeficiente de temperatura, α , é definido segundo a seguinte Eq. (14):

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T \quad \text{Eq. (14)}$$

O coeficiente de temperatura pode ser apresentado como ppm/°C, ou ppm/K. Isto especifica a fração, em partes por milhão, em que as características elétricas se alteraram quando submetidas a uma temperatura superior ou inferior à temperatura de trabalho. Segundo a Tabela 4, o coeficiente de temperatura do tungstênio é de 0,0036/°C.

Para caracterizar os filamentos L1, L2 e L3 foi montado o circuito da Figura 18, em que E representa uma fonte de tensão contínua variável, VM1 representa um voltímetro DC, AM1 representa um amperímetro DC e R_F representa o filamento sob ensaio. Os componentes E, VM1 e AM1 fazem parte da fonte de alimentação digital programável Keithley 2200 que foi operada manualmente durante os ensaios (Figura 19)

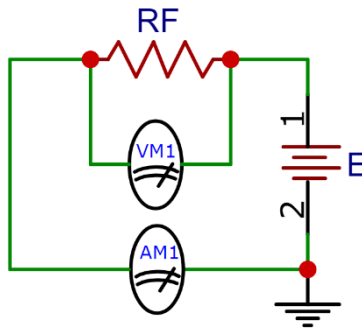


Figura 18 - Circuito para medição da característica estática dos filamentos



Figura 19 – Fotografia da fonte de alimentação Keithley 2200

A lâmpada L1 foi ensaiada fazendo a tensão variar entre 0,1 V até 1 V em incrementos de 0,1 V, sendo os valores dos dois aparelhos de medida constantemente monitorizados e os valores registados, para posterior aplicação da lei de Ohm. Os valores obtidos de tensão e corrente aos terminais do filamento, bem como a respetiva resistência do filamento encontram-se descritos na Figura 20. As tabelas com todos os pontos experimentais de cada uma das lâmpadas, podem ser consultadas nos anexos.

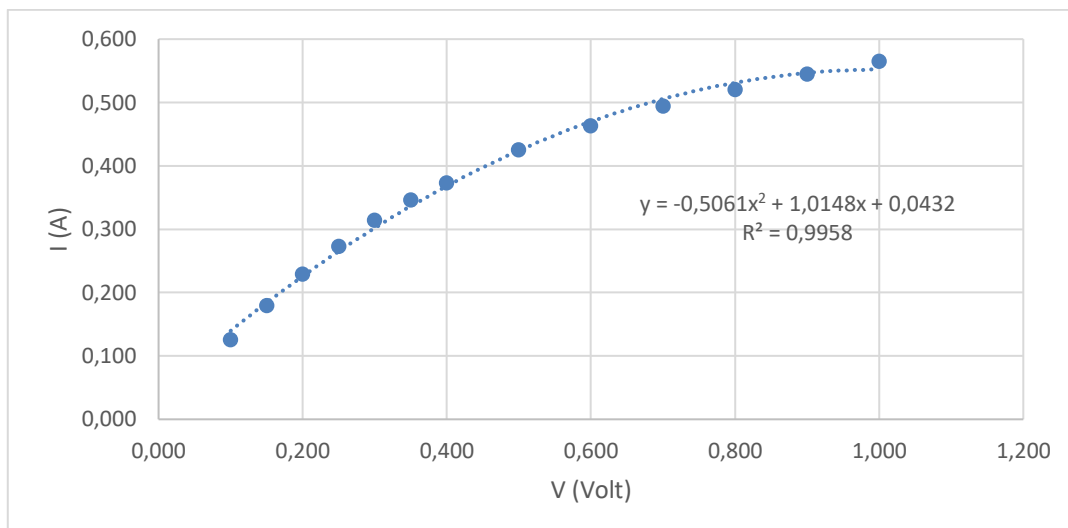


Figura 20 - Valores medidos para característica estática lâmpada L1

Este filamento apresentou uma boa sensibilidade para tensões entre os 0,2 V e 0,5 V sendo que para uma tensão de 1 V o filamento já se encontra sobre visível esforço. Esta lâmpada apresenta uma resistência relativamente baixa, uma vez que o seu filamento é bastante curto e aparentemente grosso. Como é possível observar tanto na Figura 20, tal como posteriormente nas Figura 21 e Figura 22, a linha que segue os pontos medidos experimentalmente não é linear, mas sim uma curva definida por uma equação polinomial de 2º grau. Isto deve-se ao facto da resistência presente em cada um dos filamentos não ser uma resistência fixa. O aumento da corrente não é proporcional ao aumento da tensão visto que esta resistência aumenta com a velocidade, potência e temperatura. O aumento da resistência traduz-se com a curva a descer em direção a uma assintota horizontal, sendo que o limite desta depende das características físicas do filamento

A lâmpada L2 foi submetida ao mesmo método para obter a sua característica estática, com a diferença que os valores de tensão utilizados variaram entre 1 V e 12,5 V com incrementos de 0,5 V. A lâmpada L2 apresenta uma resistência substancialmente maior quando comparada à lâmpada L1, cerca de 180 Ω na lâmpada L2 contra 1 Ω na L1, uma vez que a sua potência nominal é maior. Os valores da tensão, corrente e resistência encontram-se discriminados na Figura 21.

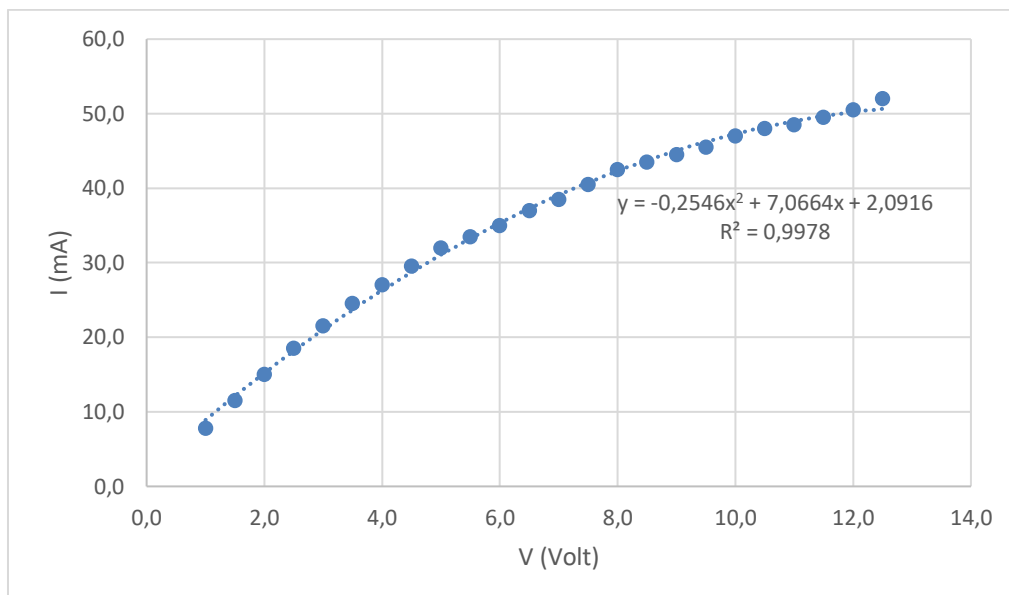


Figura 21 - Valores medidos para característica estática lâmpada L2

Tal como nas lâmpadas anteriores, a lâmpada L3, foi submetida ao mesmo ensaio, com a tensão a começar em 0,1 V e acabar em 4 V com incrementos de 0,1 V. Esta lâmpada apresentou uma resistência intermédia quando comparada a L1 e L2, com a zona de funcionamento considerada como ideal ser entre os 2 V e os 2,5 V. Nesta zona o filamento apresenta uma resistência entre os 8,3 Ω e os 9,5 Ω , que é considerada como a melhor zona de funcionamento pois além de se encontrar a uma temperatura mais alta, sem perigo de queima do mesmo, é a zona de maior sensibilidade. A Figura 22 exhibe os valores medidos de tensão e corrente da lâmpada L3.

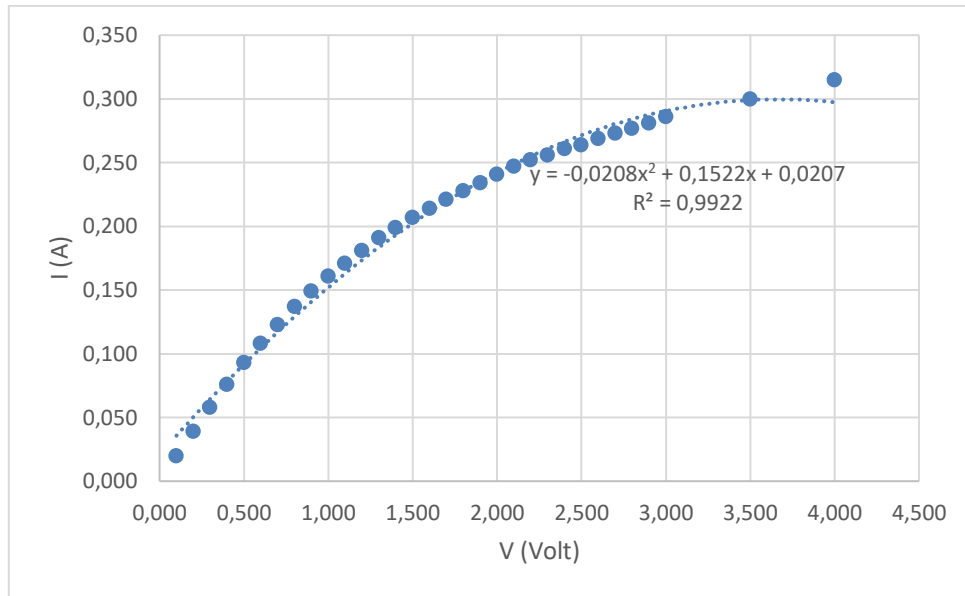


Figura 22 - Valores medidos para característica estática lâmpada L3

Através destes ensaios iniciais foi possível perceber quais as zonas onde os filamentos das lâmpadas apresentadas tinham um melhor desempenho, facilitando a construção dos circuitos de condicionamento de sinal apresentados no capítulo seguinte. Destes testes foi possível aferir que a lâmpada L2 é a que apresenta uma maior sensibilidade uma vez que a resistência do seu filamento é consideravelmente superior às restantes, no entanto é necessário ter em consideração os restantes fatores tais como comprimento, disposição e robustez do filamento, sendo que esta lâmpada, L2, é a que tem pior desempenho nestes três fatores. É assim necessário chegar a um compromisso entre todas as variáveis disponíveis.

3.2. Circuitos de condicionamento de sinal

Para realização do AFQ foram experimentados vários circuitos de condicionamento de sinal utilizando as lâmpadas anteriormente caracterizadas. Após serem testados diversos circuitos para cada uma das lâmpadas, L1, L2 e L3, são apresentados neste capítulo os circuitos de condicionamento de sinal finais. Todos os circuitos de condicionamento de sinal são o tipo CVA. Foi escolhido este método pois é possível implementá-lo com circuitos simples, além de apresentarem um bom comportamento dinâmico. Outra característica deste modo de funcionamento é o facto de o filamento funcionar entre uma temperatura máxima segura, na ausência de vento, até uma temperatura mais baixa, quando é arrefecido pelo vento. Além destes benefícios, manter a tensão do sensor constante é conseguido facilmente através de amplificadores (AMPOP) com realimentação negativa.

Como se pode observar na Figura 23 o circuito consiste no díodo 1N4148 alimentado por 5 V fixos, que limita a tensão a 0,7 V. Esta tensão pode ser medida nas entradas não inversora e inversora do AMPOP (MCP6272) e ainda aos terminais do filamento, devido ao curto-circuito virtual das entradas e à realimentação negativa do AMPOP, que tem a função de manter esta tensão estável. Este AMPOP apresenta a vantagem de poder ser alimentado a uma tensão simples de +5 V. De seguida está presente o transístor BD139, que é responsável por fornecer corrente ao filamento. Os três díodos ligados em série e o transístor PNP visam inverter e subir a tensão no coletor do transístor NPN, tal que a tensão de saída (V_o) tenha níveis adequados. Neste circuito foi utilizada a lâmpada L1, que possui uma resistência que varia entre os 0,7 e 1 Ω (Ohm).

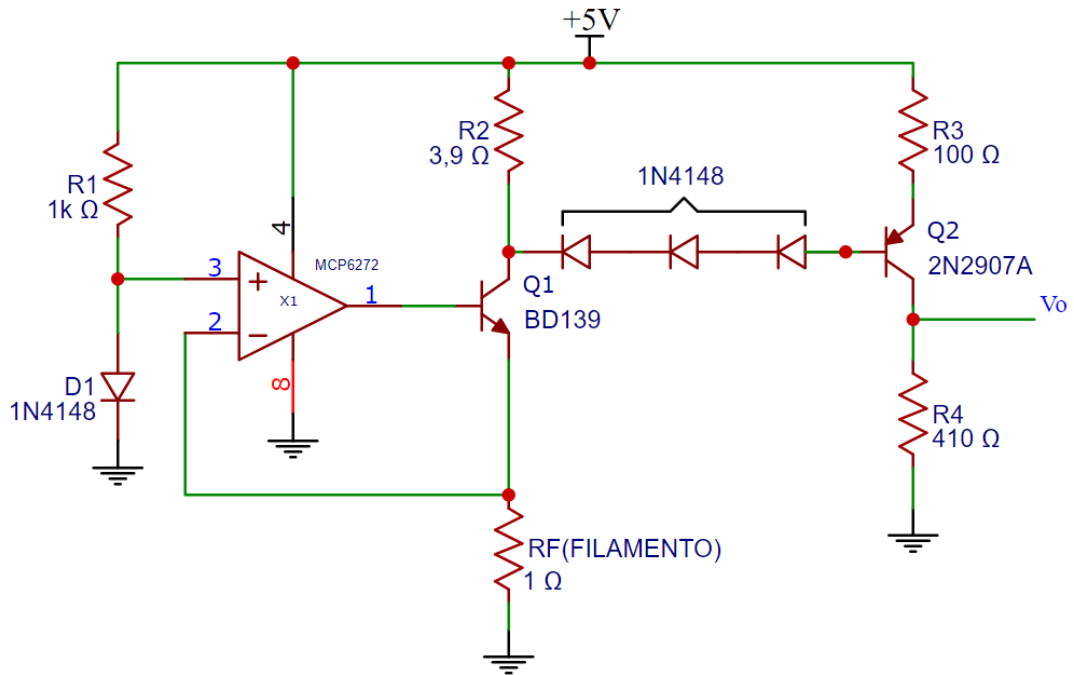


Figura 23 - Circuito de condicionamento de sinal para lâmpada L1

O circuito utilizado com a lâmpada L2 é apresentado Figura 24. Este circuito apresenta uma tensão de 5 V à entrada do AMPOP, que neste circuito é o LM741. Este AMPOP, contrariamente ao utilizado no circuito anterior, necessita de ser alimentado a uma tensão dupla de ± 15 V e o transístor encarregue em suportar a maior parte da corrente neste circuito é o 2N2222. O restante circuito é igualmente alimentado a uma tensão dupla de ± 15 V. O facto de necessitar de uma alimentação dupla de ± 15 V torna este circuito desadequado para ser alimentado com um bateria simples, o que é uma desvantagem face aos outros circuitos.

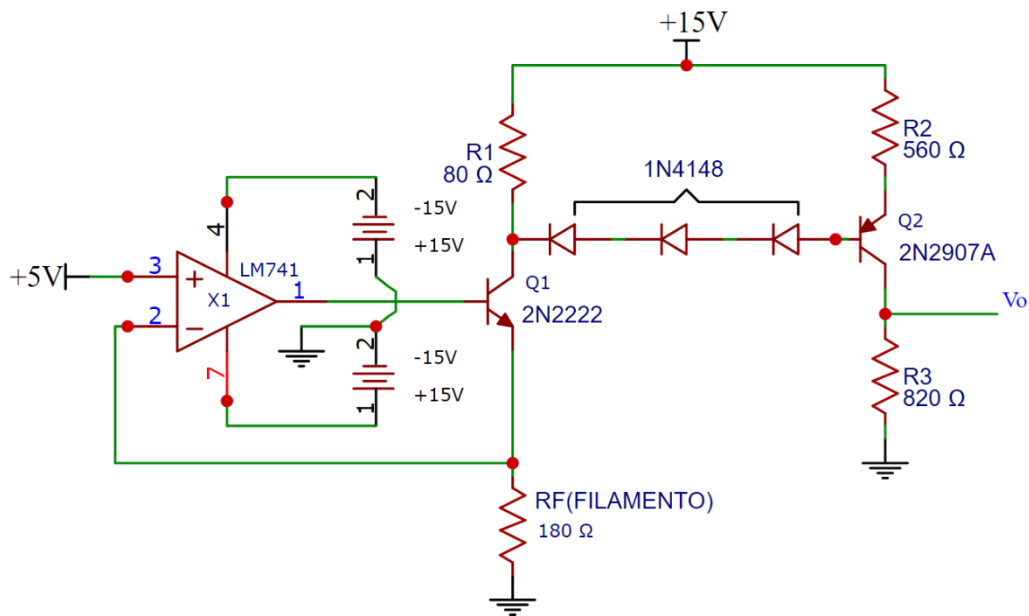


Figura 24 - Circuito de condicionamento de sinal para lâmpada L2

O último circuito testado (Figura 25) utilizou a lâmpada L3, que consiste nas 4 lâmpadas G4 alinhadas e ligadas em série. Este circuito utiliza o mesmo princípio de funcionamento que o circuito usado para a lâmpada L1, com o mesmo AMPOP (MCP6272) e transístores (BD139 e 2N2907A). Uma particularidade neste circuito é a utilização de uma tensão simples, de +9 V, em todo o circuito, o que é uma vantagem relativamente à utilização de baterias de 15 V para a posterior aplicação no veleiro RC, dado que apenas é necessário utilizar pilhas de 9 V para alimentar todo o circuito.

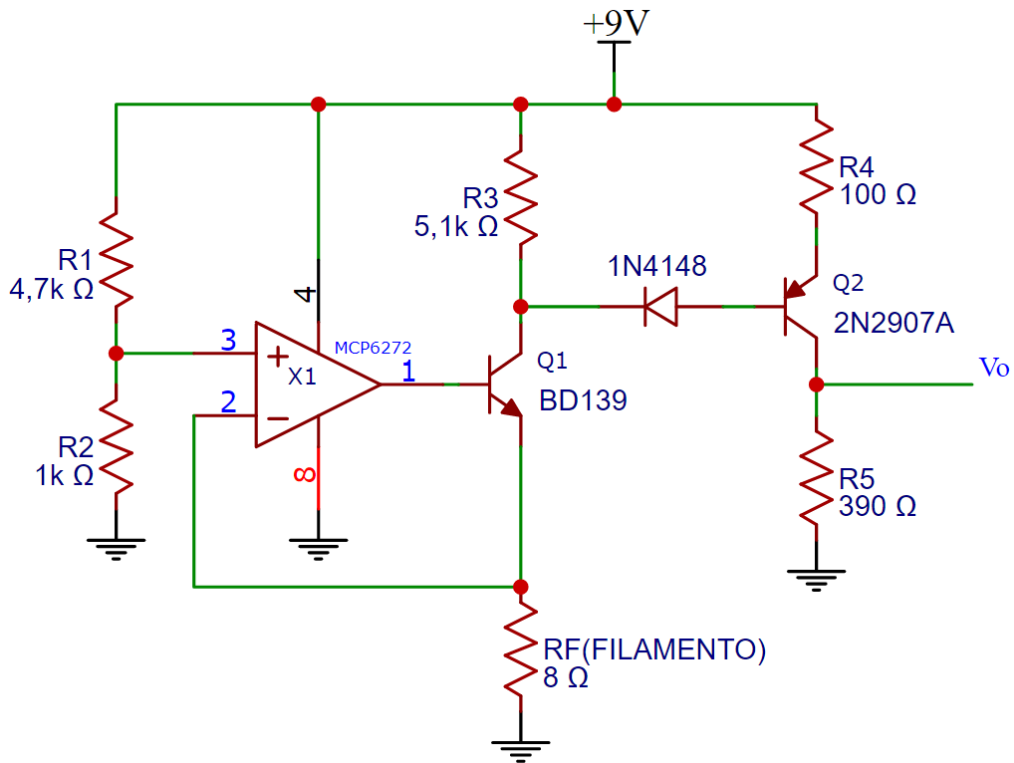


Figura 25 - Circuito de condicionamento de sinal para lâmpada L3

No presente capítulo foram apresentadas três propostas de lâmpadas a serem usadas para implementação do AFQ. Após a apresentação das mesmas foi feito o estudo das suas características estáticas para posteriormente ser elaborado o circuito de condicionamento de sinal que melhor se ajusta a cada uma das lâmpadas.

4. Caracterização experimental do anemômetro de fio quente

Para realização da caracterização experimental foi montado em laboratório um aparato experimental, como mostrado na Figura 26, composto por um soprador de ar, montado sobre uma base deslizante, que representa o vento numa situação real, um anemômetro de conchas, marca UNI-TREND, modelo UT3636, para servir como referência para medição da velocidade, montado tão perto quanto possível do filamento a ser testado, de forma obter uma medição válida. Tanto a lâmpada L1 como a lâmpada L2 foram colocadas dentro de um casquilho preso a uma base especialmente construída para as medições (Figura 26). O conjunto de lâmpadas que compõe a lâmpada L3 foi soldado a uma placa de circuito impresso (Figura 27) e disposta sobre a mesma base utilizada para as lâmpadas L1 e L2.



Figura 26 - Montagem experimental com lâmpada L1

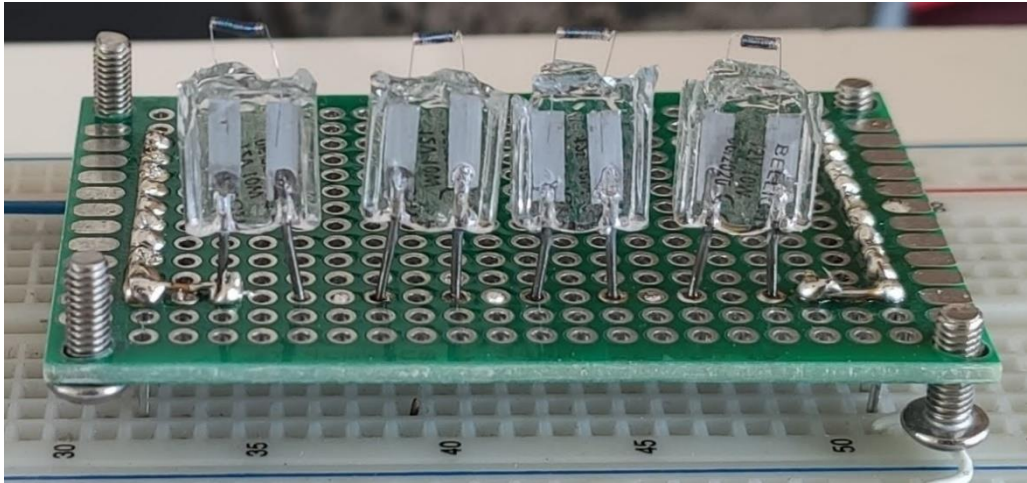


Figura 27- Placa com lâmpada L3

O soprador de ar foi posicionado a uma distância de três metros do filamento e do anemómetro de referência, medidos com recurso a uma fita métrica, desde o bocal do soprador até ao filamento/anemómetro de referência. A esta distância o soprador, na velocidade mais baixa, produz uma velocidade de cerca de 12 km/h, pelo que foi necessário variar a direção do soprador para conseguir velocidades mais baixas. Elevando o bocal do soprador foi possível atingir velocidades tão baixas como 3 km/h. O aumento de velocidade foi conseguindo aproximando o soprador, através da plataforma deslizante, do anemómetro e filamento fixos. Foi possível medir velocidades na ordem dos 50 km/h para a lâmpada L1 e na ordem dos 30 km/h para as lâmpadas L2 e L3, visto que para velocidades superiores os respetivos filamentos saturavam devido às suas características físicas.

As medições envolvendo a lâmpada L1 foram feitas começando por fazer descer o bocal do soprador para variação da velocidade desde os 3 km/h até aos 12 km/h, e registando a tensão de saída (V_o) do circuito de condicionamento de sinal. Após serem atingidos os 12 km/h, o soprador foi aproximado do filamento com intervalos de 30 cm até um mínimo de 60 cm de distância entre os equipamentos. Este filamento em repouso, ou seja, alimentado, mas sem vento fornece uma tensão de saída, V_o , de 0,44 V, denominada convenientemente de linha de base, e atinge um máximo de 2,89 V, equivalente a uma velocidade de cerca de 50 km/h. A curva experimental completa pode ser vista na Figura 28.

As lâmpadas e os circuitos de condicionamento de sinal foram caracterizados em conjunto como se fossem uma “caixa negra”, tendo como sinal de entrada a velocidade do vento, em km/h, e como sinal de saída a tensão, em Volt. Os resultados experimentais foram transpostos para gráficos, aos quais foram adaptadas leis matemáticas por regressão polinomial, como se pode ver nas Figura 28 a Figura 30. Todas as curvas obtidas verificaram, como se esperava, o seguinte raciocínio: um aumento da velocidade do vento (v) fará diminuir a temperatura do filamento (T_F), baixar a sua resistência elétrica (R_F), aumentar a corrente elétrica que o percorre (I_F), e aumentar a tensão de saída (V_o), e vice-versa:

$$v \uparrow \Rightarrow T_F \downarrow \Rightarrow R_F \downarrow \Rightarrow I_F \uparrow \Rightarrow V_o \uparrow \quad \text{Eq. (15)}$$

Optou-se, é certo, por uma abordagem puramente empírica, baseada na experimentação, em linha com a “identificação de sistemas”. O objetivo final foi o de obter leis matemáticas simples, bem-adaptadas à realidade, de fácil implementação prática, que permitam saber a velocidade do vento (v) a partir da tensão de saída (V_o). A alternativa teria sido fazer o caminho inverso: partir de leis matemáticas conhecidas nos domínios da Eletrotécnica e da Mecânica dos Fluidos, e utilizá-las para fundamentar os resultados experimentais. Esta abordagem, mais na linha da “modelação de sistemas”, não foi escolhida por ser demasiado complexa e não conduzir, necessariamente, aos melhores resultados no tempo limitado para a realização do trabalho.

A Figura 28 , mostra a linha de pontos obtidos experimentalmente (linha contínua), bem como a curva que melhor se adapta a estes pontos segundo a equação polinomial de segundo grau (linha tracejada):

$$y = 8,9077x^2 + 11,944x + 5,7409 \quad \text{Eq. (16)}$$

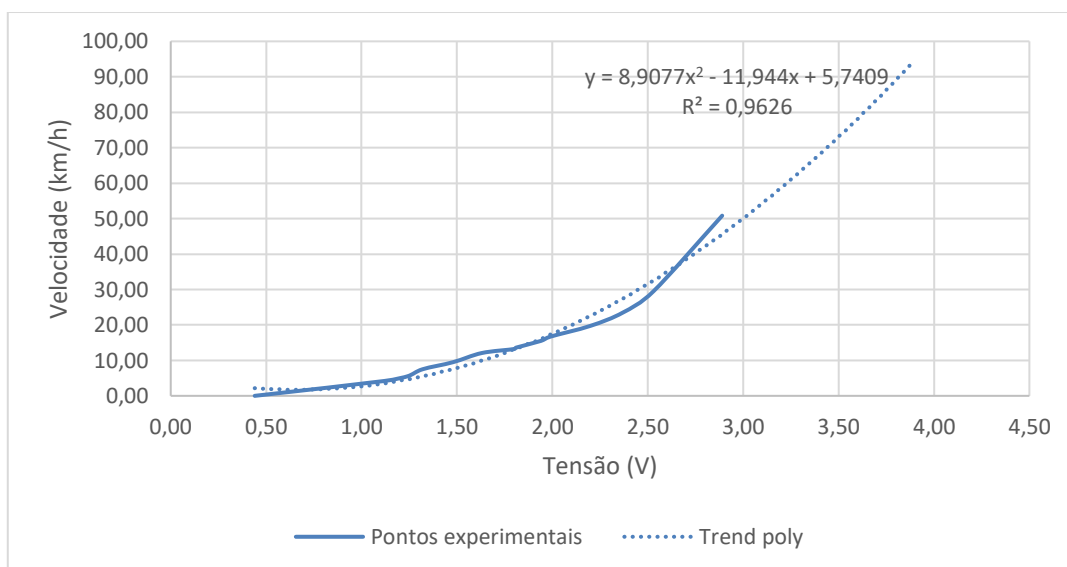


Figura 28 - Relação entre velocidade e tensão para a lâmpada L1

A lâmpada L2 foi submetida exatamente ao mesmo método de teste da lâmpada L1, sendo que esta lâmpada apresentou uma linha base de 1,5 V para velocidade do vento nula e atingiu um máximo de 4,6 V de tensão, equivalente a uma velocidade de 27,9 km/h. Este filamento apresenta assim um intervalo maior de valores para a tensão devido à sua maior resistência e tamanho. No entanto, como se antecipou durante a caracterização estática dos filamentos, esta lâmpada por apresentar o filamento bastante comprido e frágil dificulta a obtenção de valores durante a caracterização experimental. Este facto é evidenciado pela Figura 29, onde é evidente que existem valores discrepantes que dificultam a obtenção de uma equação que represente fielmente os pontos experimentais.

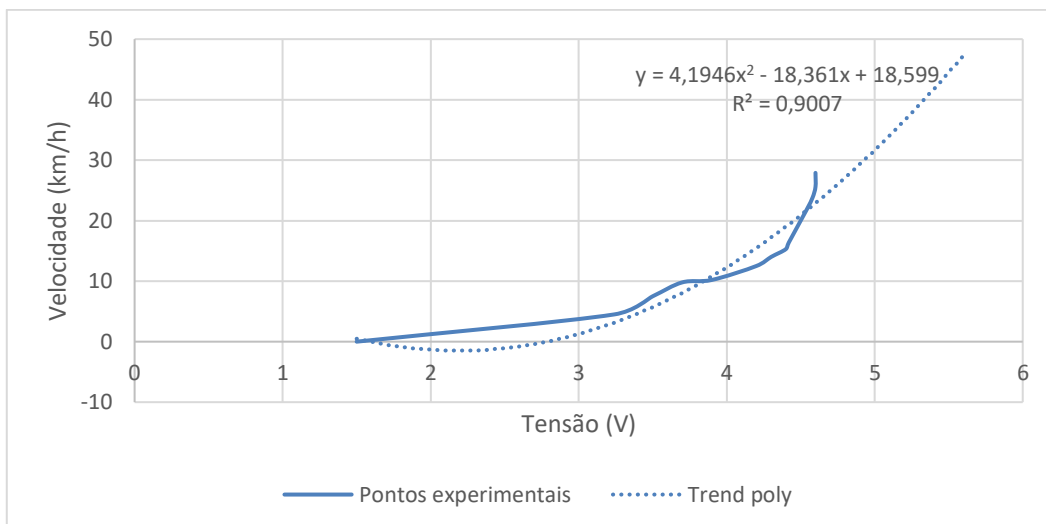


Figura 29 - Relação entre velocidade e tensão para a lâmpada L2

A lâmpada L3 foi submetida a um método de teste idêntico das lâmpadas anteriores, sendo que esta lâmpada apresentou uma linha base de 1,2 V para velocidade do vento nula e atingiu um máximo de 4,16 V de tensão, equivalente a uma velocidade de 30 km/h. Este filamento apresenta um alcance de valores muito semelhante à lâmpada L2, com a vantagem dos seus valores serem evidentemente mais regulares. A lâmpada L3 é a lâmpada que apresenta uma curva com o maior coeficiente de correlação, R, (Figura 30) o que a torna na opção mais viável para implementação num Arduino e consequente construção do protótipo final.

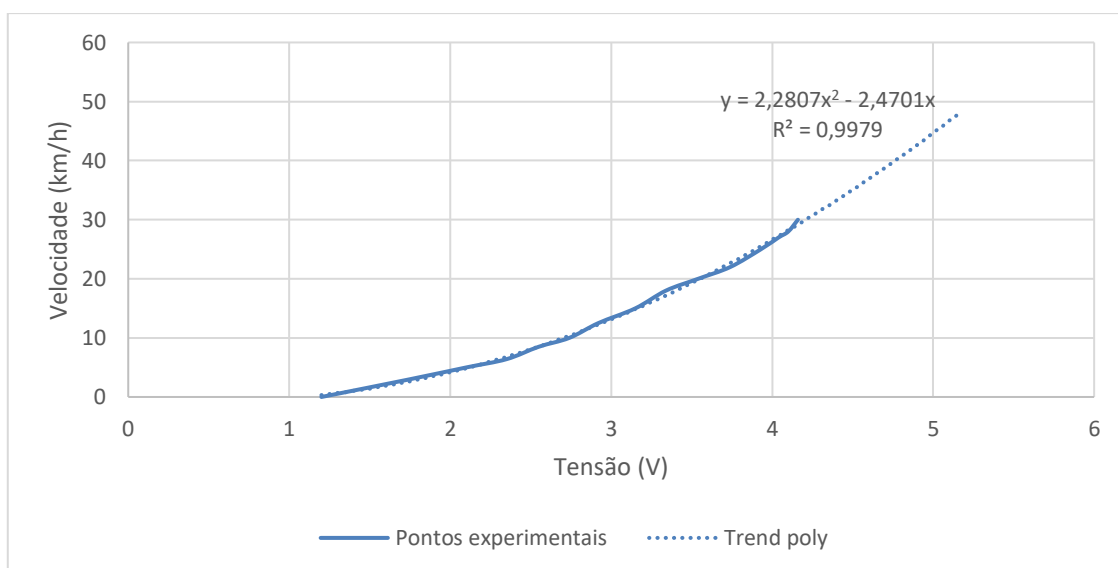


Figura 30 - Relação entre velocidade e tensão para a lâmpada L3

4.1 Medições para diferentes direções

Por forma a perceber a como a direção do vento afeta a medição da velocidade do fluxo de ar, os filamentos em estudo foram submetidos a medições adicionais. Para atingir este objetivo foram efetuadas medições com os filamentos orientados com diferentes ângulos relativamente ao fluxo de ar. As medições iniciais consistiram no filamento perpendicular ao fluxo de ar, a 90° , passando por 60° , 30° e por fim 0° , ou seja, com o filamento paralelo à direção do fluxo de ar. Tanto para a lâmpada L1 como para a lâmpada L2 este procedimento foi conseguido rodando o casquilho onde estas se encontravam assentes. Para a lâmpada L3 foi necessário rodar toda a *breadboard* onde a placa de circuito impresso com o conjunto (Figura 27) estava ligada.

Nas Figura 31, Figura 32 e Figura 33 é possível observar os valores, da relação entre a velocidade e tensão à saída do AFQ, obtidos para cada uma das orientações mencionadas, para a lâmpada L1, L2 e L3, respetivamente.

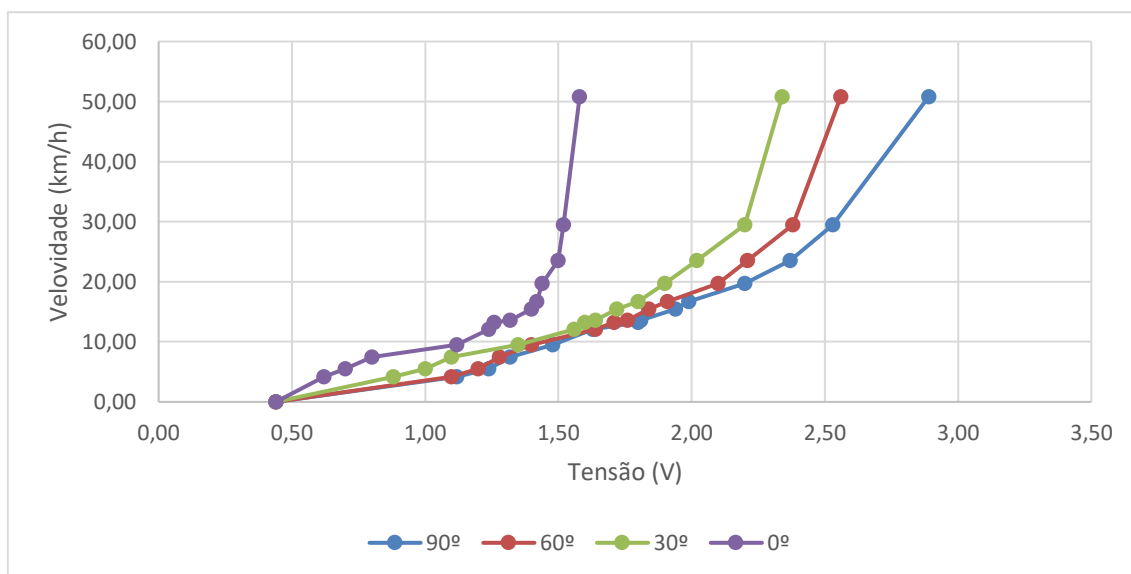


Figura 31 - Medições para diferentes ângulos com lâmpada L1

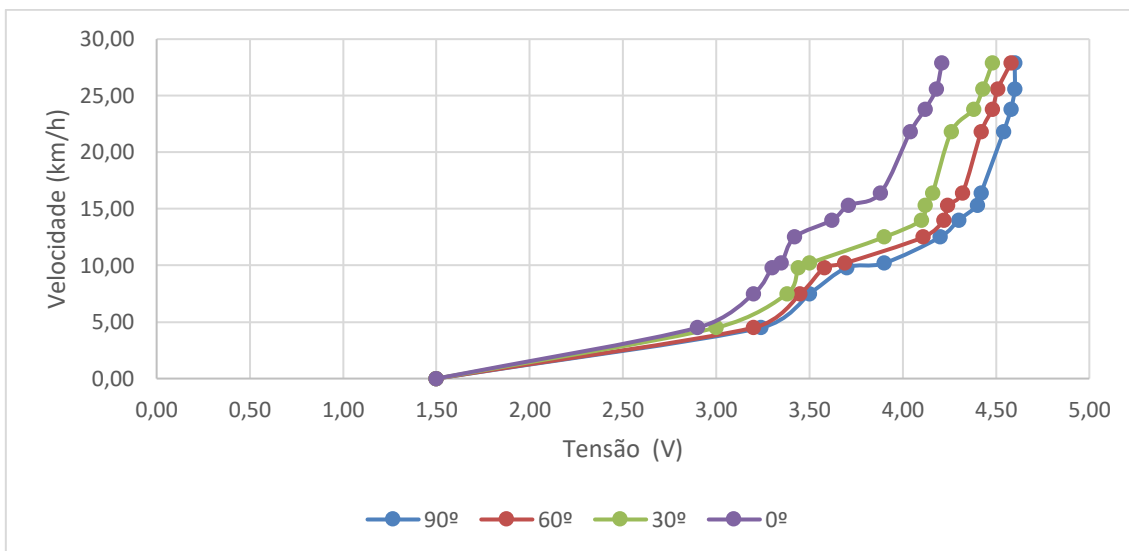


Figura 32 - Medições para diferentes ângulos com lâmpada L2

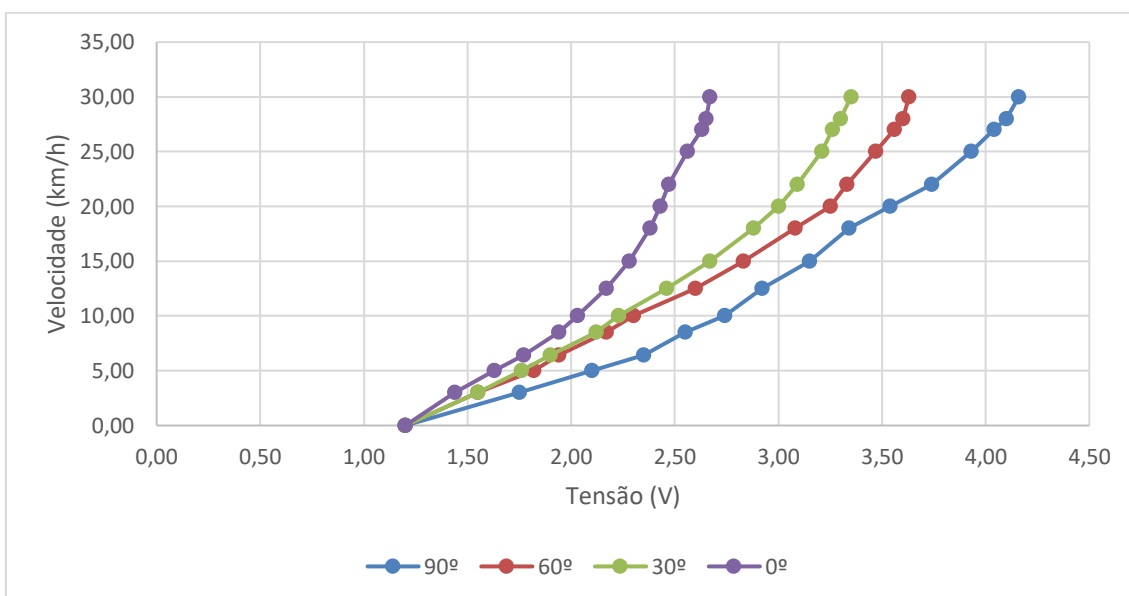


Figura 33 - - Medições para diferentes ângulos com lâmpada L3

O primeiro ponto que sobressai, que é comum a todas as lâmpadas, é a direccionalidade destes filamentos. Uma pequena alteração na orientação dos mesmo faz com que não atinjam o seu máximo potencial relativamente à tensão de saída.

Relativamente à lâmpada L1 observa-se que não existe uma diferença muito significativa para baixas velocidades, até 20 km/h, quando se compara os ângulos de 90°, 60° e 30°. No entanto quando o filamento se encontra paralelo ao fluxo de ar, 0°, é notória a descida drástica no alcance do anemómetro.

A lâmpada L2 é aquela que apresenta uma menor diferença entre valores obtidos para diferentes ângulos, mas por outro lado, como é possível aferir pela Figura 32, é aquela que apresenta uma maior oscilação nos valores, que se deve principalmente ao facto do filamento ser mais comprido do que os restantes.

A lâmpada L3 apresenta o melhor desempenho, para diferentes ângulos, pois é possível notar a diferença para cada um dos ângulos e todas as curvas são semelhantes entre si. Este fator deve-se a esta lâmpada apresentar o filamento mais curto, entre as três estudadas. Esta lâmpada foi por isso considerada a mais indicada para ser usada como sensor do AFQ para medir tanto a velocidade, como a direção do vento.,

5. Instalação e validação do protótipo final

No capítulo anterior ficou definido que a lâmpada L3 será a lâmpada a utilizar no protótipo final, uma vez que esta é a que apresenta melhores resultados, nos vários parâmetros testados.

Para instalação do protótipo final o circuito da Figura 25 foi projetado em PCB recorrendo ao software online EasyEDA (<https://easyeda.com>). Na Figura 34 é possível observar as pistas desenhadas entre os vários componentes, enquanto na Figura 35 é possível observar qual seria o aspeto final da placa construída. Esta placa tem de medidas 17,91 mm x 12,07 mm, pode ser alimentada através de uma pilha de 9 V, a lâmpada seria conectada onde diz RF (FILAMENTO) e tensão de saída pode ser lida em Vo.

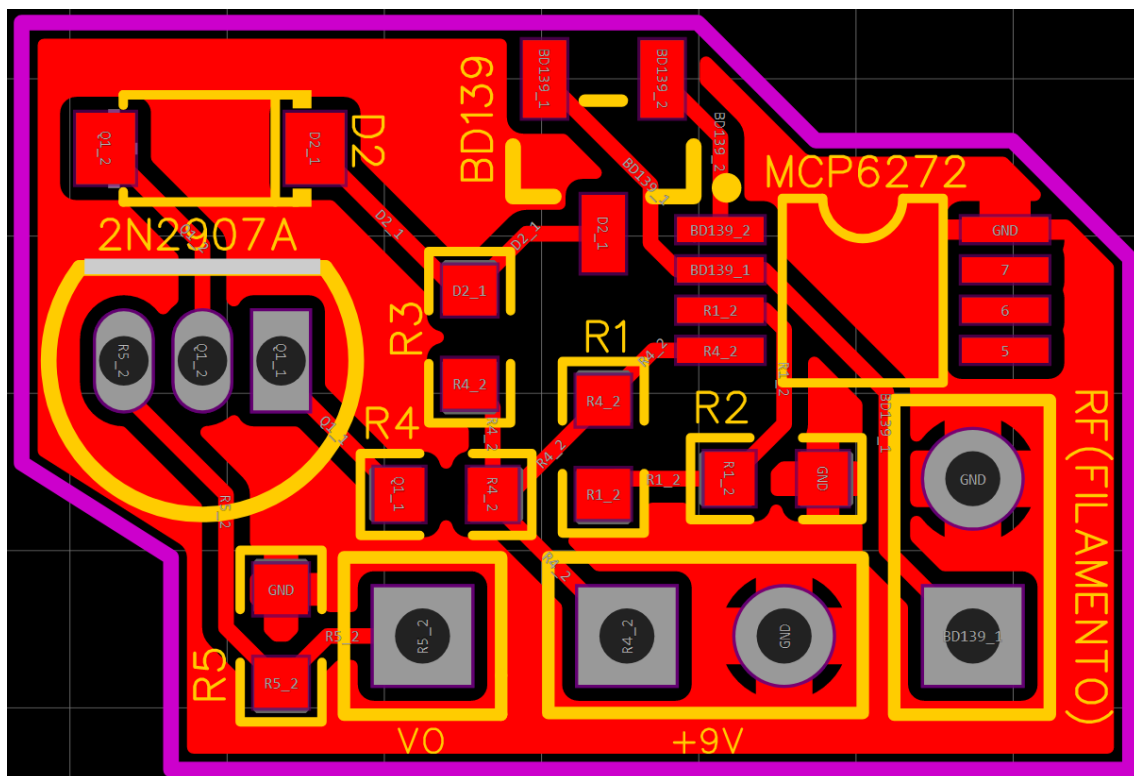


Figura 34 - Esquema das pistas do PCB para o circuito com a lâmpada L3

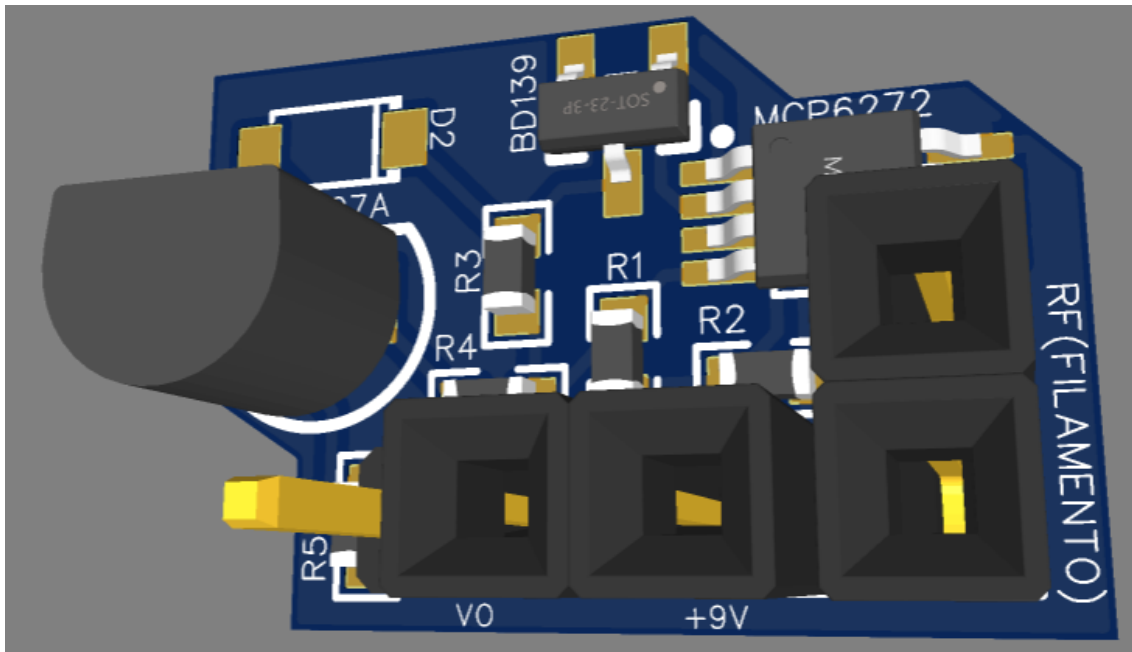


Figura 35 - PCB para circuito com a lâmpada L3

A comunicação entre o AFQ e o veleiro será realizada utilizando um Arduino que transmite a velocidade do vento usando o protocolo NMEA 0183. NMEA 0183 é um conjunto de especificações elétricas e de dados para comunicação de dispositivos de navegação, tais como, anemômetros, sondas, giro bússolas, recetores GPS e muitos outros tipos de instrumentos. NMEA é um acrónimo para *National Marine Electronics Association*, que foi criada em 1957 para conceber uma forma de melhorar as comunicações com outros fabricantes. Nos dias de hoje o protocolo NMEA 0183 é o padrão suportado por todos os fabricantes de GPS, tal como o ASCII é o padrão para os caracteres digitais no mundo informático. Apesar de estar atualmente a ser lentamente atualizado pelo padrão NMEA 2000, o NMEA 0183 continua a ser o padrão para os navios comerciais.

O padrão NMEA 0183 utiliza o protocolo de comunicação ASCII, que define como os dados são transmitidos numa “frase” de um emissor para vários recetores ao mesmo tempo. Com o uso de expansores intermediários, um emissor pode ter uma conversa unidirecional com um número quase ilimitado de recetores, e ainda usando

multiplexers, múltiplos sensores podem transmitir as suas informações através de uma única porta de computador.

Neste trabalho não serão explicitadas todas características e estrutura das mensagens utilizando este protocolo, no entanto foi escolhido este protocolo por ser a norma utilizada também na Marinha Portuguesa.

Para implementação deste protocolo em Arduino é apresentado fluxograma da Figura 36. Em primeiro lugar é inicializada a porta série de acordo com as especificações NMEA (taxa de transmissão de 4800 símbolos por segundo), de seguida o Arduino lê a entrada analógica onde se encontra ligada a saída V_o do anemómetro, neste caso A0, e guarda este valor numa variável, *sensorValue*, este valor é seguidamente convertido numa tensão entre 0 e 5 V e armazenado na variável *voltage*. Depois é aplicada a equação polinomial visível na Figura 30, que converte a tensão (variável *voltage*) em velocidade do vento, em km/h, para uma orientação de 90° com o sentido do fluxo de ar, para a lâmpada L3. Este valor é em seguida convertido tanto para nós, como para metros por segundo. No passo seguinte é iniciada a construção da “frase” seguindo as especificações NMEA. O cabeçalho é VWR, pois é este cabeçalho utilizado para fornecer a velocidade relativa e a direção do vento. Uma vez que a direção do vento não é fornecida, os dois primeiros valores, magnitude da direção do vento em graus e direção do vento a bombordo/estibordo da proa, são deixados em branco. De seguida são apresentadas as velocidades em nós, com a unidade, N, em metros por segundo, com a unidade M e em quilómetros por hora, com a unidade K. Por fim é feito o checksum dos valores entre o carácter de início, \$, e o de fim, *, não incluídos, segundo as especificações NMEA. Todo o processo descrito é repetido e transmitido com intervalos de 1 segundo. O código para leitura e transmissão da velocidade com recurso ao Arduino pode ser consultado nos apêndices deste trabalho.

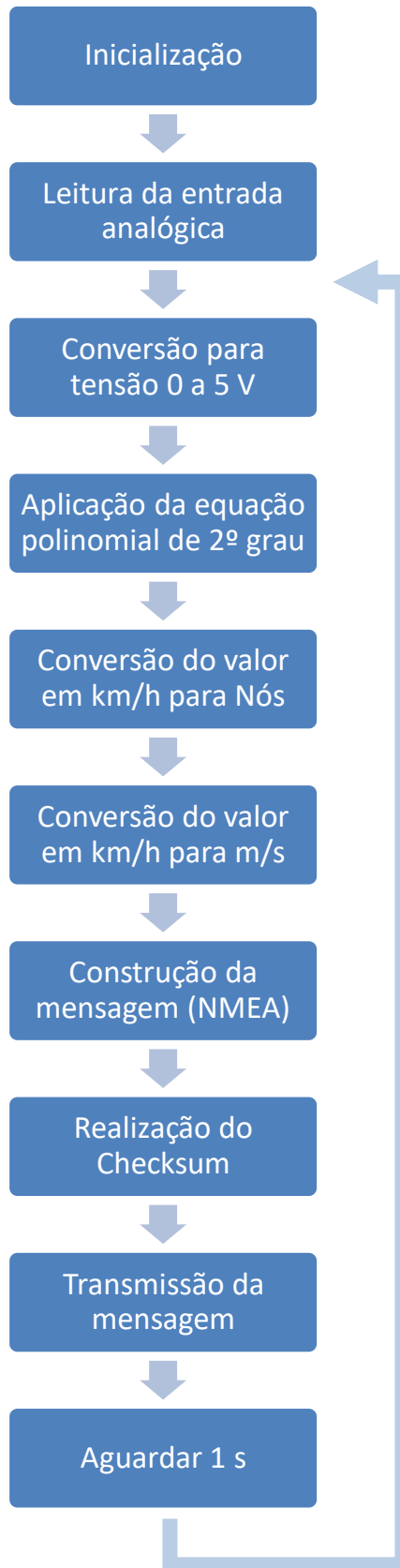


Figura 36 - Fluxograma para implementação do AFQ com recurso a Arduino

Conclusão

Desde muito cedo os humanos sentiram a necessidade de perceber e medir o vento, uma vez que este tem impacto sobre uma grande parte das atividades praticadas. Com esta motivação surgiram os anemómetros, aparelhos capazes de medir a velocidade do vento, e as veletas, capazes de fornecer a direção do mesmo.

Em primeiro lugar foi realizada uma revisão do estado da arte, onde inicialmente se procedeu à exploração do aparecimento dos primeiros aparelhos para medição da velocidade e direção do vento. Os anemómetros de conchas e veletas foram os primeiros equipamentos a serem utilizados comercialmente com o objetivo de obter a velocidade e direção do vento. Neste capítulo é de seguida abordado um dos tipos de anemómetros mais avançados disponíveis nos dias de hoje, os anemómetros ultrassónicos. Os AFQ foram abordados em último de forma a ir de encontro com o principal objetivo deste trabalho de encontrar uma forma de implementar estes equipamentos em veleiros RC. São ainda apresentados os AFQ presentes no mercado, desde aqueles que se destinam a aplicações industriais até aos comerciais, passando ainda pelos anemómetros dedicados a projetos de investigação. Ainda no capítulo relativo ao Estado da Arte foi explicada a constituição deste tipo de anemómetros, focando-se nos materiais utilizados para o filamento, bem como na construção e orientação dos mesmos. Uma vez que estes anemómetros podem ser implementados de diversos modos, o próximo passo foi explicar cada um dos três principais modos de operação, CC, CT e CV.

Tendo novamente em consideração o objetivo deste trabalho, encontrar um equipamento que seja igualmente exato, barato e de reduzidas dimensões para aplicação em veleiros RC, foram propostas no Capítulo 3, três lâmpadas de uso comum para funcionarem como sensor do AFQ. Estas três lâmpadas foram inicialmente submetidas a testes para perceber quais as suas características reais. Através destes ensaios foi possível entender quais as melhores zonas de funcionamento de cada um dos filamentos e ter um meio de comparação primário entre cada lâmpada. Estes testes possibilitaram a organização das lâmpadas pela resistência do seu filamento, sendo que a lâmpada L1 é a que apresenta a menor resistência, na ordem de 1Ω , seguida da lâmpada L3, com resistência de cerca de 8Ω , e por fim a lâmpada L2 com uma resistência de 180Ω .

Com os dados das características estáticas adquiridos, procedeu-se em seguida à construção dos circuitos de condicionamento de sinal. Para construção do AFQ deste trabalho foi adotado o modo CV, uma vez que se apresenta como um modo que apresenta bons resultados dinâmicos, os circuitos são simples de implementar e são seguros para o filamento. Todos os circuitos apresentados foram baseados nos circuitos em modo CV, explicados no Capítulo 2.

O circuito de condicionamento de sinal final para a lâmpada L1 teve um bom comportamento e beneficia da facilidade de implementação uma vez que apenas necessita de 5 V para alimentar o sistema todo.

Para a lâmpada L2 foi necessário projetar um circuito de condicionamento de sinal ligeiramente diferente, devido às diferenças nas características estáticas dos filamentos. Este circuito apesar de ser bastante semelhante com o anterior, apresenta a desvantagem de precisar de duas alimentações com diferentes tensões. Por um lado, necessita de 5 V para a entrada não inversora do AMPOP e por outro lado precisa de 15 V para alimentar o AMPOP, bem como o resto do circuito. Foi assim possível concluir que este circuito, com esta lâmpada, L2, não apresentava vantagens relativamente à implementação, quando comparado ao utilizado com a lâmpada L1.

Uma vez que a características estáticas, nomeadamente a resistência do filamento, é diferente entre a lâmpada L1 e L3, o circuito de condicionamento de sinal, foi novamente alterado. Neste circuito foi possível utilizar a mesma tensão para alimentar todo sistema, 9 V, mas, no entanto, este sistema é menos eficiente uma vez que não é utilizado o díodo para limitar a tensão, e conseqüente corrente, que chega ao filamento sensor. Por outro lado, é apenas utilizado um díodo para inverter a tensão de saída, por forma a ter uma linha de base mais baixa, ao invés dos três usados no circuito com a lâmpada L1.

No Capítulo 4 os circuitos montados no capítulo anterior foram submetidos a testes práticos, com ajuda de um soprador de ar e uma base construída para o efeito. Estes testes permitiram perceber mais detalhadamente como responderiam os AFQ em situações reais.

Foi possível concluir que a lâmpada L1 e respetivo circuito apresentavam um bom desempenho.

A lâmpada L2 não apresentou resultados tão favoráveis, que se deveram à natureza do seu filamento ser grande e bastante oscilatório, mas por outro lado esta foi com a lâmpada L2 que foi possível obter o maior alcance de valores, desde a ausência de vento, com uma linha de base de 1,5 V até ao valor máximo de 4,6 V. Este feito foi relacionado com o facto desta lâmpada apresentar o filamento com maior resistência.

Relativamente aos testes com a lâmpada L3 foi possível aferir que a utilização de apenas um díodo para baixar a linha de base teve o efeito desejado, sendo que esta lâmpada apresentou o segundo melhor alcance de valores, variando entre 1,2 V, em repouso, e 4,16 V no máximo. Outra vantagem da utilização desta lâmpada e respetivo circuito é visível através do coeficiente de correlação, R, sendo que este é bastante maior do que nas duas lâmpadas anteriores.

Por fim neste capítulo foram efetuadas medições da velocidade do vento para diferentes ângulos, entre o soprador e o filamento. Através deste estudo concluiu-se que a lâmpada L3 é aquela que apresenta o melhor desempenho.

Neste trabalho uma das primeiras dificuldades sentidas foi a transformação das lâmpadas de uso comum em sensor utilizáveis no AFQ, uma vez que é necessário partir o invólucro de vidro que protege as lâmpadas. Estas lâmpadas apresentam dimensões bastante reduzidas, nomeadamente a lâmpada L3, o que se traduz em filamentos ainda mais pequenos e frágeis. Foi por isso necessário tentar várias técnicas para partir o invólucro sem quebrar o filamento no seu interior.

Outra dificuldade sentida foi chegar a um circuito de condicionamento de sinal final que atingisse os objetivos pretendidos, em particular, que a tensão de saída do anemómetro variasse entre 0 V, linha de base, e 5V. Estes valores foram definidos tendo em mente a aplicação da saída para um Arduíno por forma a transformar a tensão em volts para velocidade em km/h. Sendo que esta velocidade seria posteriormente enviada para o veleiro, através do protocolo NMEA.

Para trabalhos futuros sugere-se que se mantenha a utilização da lâmpada L3 como sensor do AFQ e que seja construído o circuito de condicionamento de sinal em PCB por forma a poder testar experimentalmente todo o protótipo. Outra sugestão rege-se ao facto de dotar o anemómetro da capacidade de fornecer não só a velocidade, como também a direção do vento, utilizando como base os estudos e medições efetuadas e apresentadas no Capítulo 4, subcapítulo 4.1.

Por fim considera-se que o objetivo inicialmente proposto de apresentar uma proposta de anemómetro que fosse igualmente de reduzidas dimensões, exato e barato para substituir os atuais anemómetros utilizados nos veleiros RC foi atingido.

Bibliografia

- [1] E. d. L. P. Infopédia, “vento in Infopédia,” Porto Editora, 2021. [Online]. Available: [https://www.infopedia.pt/\\$vento](https://www.infopedia.pt/$vento).
- [2] W. J. Saucier, *Principles of Meteorological Analysis*, North Carolina: Courier Dover Publications, 2003.
- [3] F. M. G. Chaves, “Estudo Climatológico da Nortada na Costa oeste da Península Ibérica,” 2015. Tese de Mestrado. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10400.26/11003>. [Acedido em 2021].
- [4] Carlson e Carrier, “A true air speed indicator,” NDRC, Harvard, 1944.
- [5] E. Barret e V. E. Suomi, “Preliminary report on temperature measurments by sonic means,” *JMeteor*, vol. I, nº 6, pp. 273-276, 1949.
- [6] R. E. Corby, “Acoustic anemometer-anemoscope,” *Eletronics*, vol. I, nº 23, pp. 88-90, 1950.
- [7] A. S. Gurvich, “Acoustic microanemometer for investigation of the microstructure of turbulency,” *Acoustics*, vol. III, nº 5, pp. 368-369, 1959.
- [8] V. E. Suomi, “Energy budget studies and development of the sonic anemometer for spectrum analysis,” AFCRC Tech, Wisconsin, 1957.
- [9] P. L. Dulong e A. T. Petit, “La mesure des températures et sur les lois de la communication de la chaleur,” *Annales de Chimie et de Physique*, vol. VII, p. 337, 1817.
- [10] J. Boussinesq, “An Equation for the Phenomena of Heat Convection and an Estimate of the Cooling Power of Fluids,” *Journal d c Mathematiques*, pp. 285-332, 1905.
- [11] L. V. King, “On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constants of Small Platinum Wires with Applications to Hot-Wire Anemometry,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, pp. 373-432, 1914.
- [12] H. L. Dryden e A. M. Kuethe, “The Measurement of Fluctuations of Air Speed by the Hot-Wire Anemometer,” NACA, 1929.
- [13] M. Ziegler, “The Construction of a Hot-Wire Anemometer with Linear Scale and Negligible Lag,” *Proc. Koninkl. Ned. Akad.*, p. 3, 1934.

- [14] J. G. Webster e H. Eren, "Thermal Anemometry," em *Measurment, Instrumentation, and Sensors Handbook*, Florida, CRC Press, 2014, pp. 965-967.
- [15] J. G. Webster e H. Eren, "Thermal anemometry," em *Measurments, Instrumentation, and Sensors Handbook*, Florida, CRC Press, 2014, p. 972.
- [16] J. G. Webster e H. Eren, "Thermal Anemometry," em *Measurments, Instrumentation, and Sensors Handbook*, Florida, CRC Press, 2014, pp. 979-980.
- [17] . H. Bruun, "Basic Principles of Hot-Wire Anemometry," em *Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*, Inglaterra, Oxford University Press, 1995, p. 27.
- [18] H. H. Bruun, "Basic Principles of Hot-Wire Anemometry," em *Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*, Inglaterra, Oxford University Press, 1995, p. 33.
- [19] R. Pallás-Areny e J. G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, Nova Jersey: John Wiley & Sons Ltd., 1991.
- [20] R. J. Goldstein, *Fluid Mechanics Measurements*, London: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [21] P. A. Sheppard, "Anemometry: A Critical and Historical Survey", Physical Society," *Physical Society*, pp. 361-390, 1941.
- [22] A. E. Perry, "Hot-Wire Anemometry," *Oxford University Press*, p. 185, 1982.
- [23] J. R. Weske, "A hot-wire circuit with very small time lag," NACA Technical Note, E.U.A., 1943.
- [24] E. Ossofsky, "Constant temperature operation of the hot-wire anemometer at high frequency," *Review of Scientific Instruments*, nº 19, pp. 881-889, 1948.
- [25] G. Sarma, "Flow rate measuring apparatus," USPatent 5074147, 1991.
- [26] G. R. Sarma, "Analysis of constant voltage anemometer circuit," em *Instrumentation and Measurement Technology conference*, USA, 1993.
- [27] A. M. Taifour, J. Weiss, A. Sadeghi, J. Vetel, E. Jondeau e G. Comte-Bellot, "A detailed procedure for measuring turbulent velocity fluctuations using constant voltage anemometry," *Experiments in Fluids*, vol. 56, nº 174, pp. 1-13, 2015.
- [28] B. H. H., "Basic Principles of Hot-Wire Anemometry," em *Hot-Wire Anemometry: Principles and Signals Analysis*, Inglaterra, Oxford Univesity Press, 1995, p. 47.

Apêndices

Tabela 5 - Valores medidos para característica estática lâmpada L1

<i>V (Volt)</i>	<i>I (A)</i>	<i>R (Ohm)</i>
0,100	0,125	0,800
0,150	0,179	0,838
0,200	0,229	0,873
0,250	0,273	0,916
0,300	0,314	0,955
0,350	0,346	1,012
0,400	0,373	1,072
0,500	0,425	1,176
0,600	0,463	1,296
0,700	0,494	1,417
0,800	0,520	1,538
0,900	0,545	1,651
1,000	0,565	1,770

Tabela 6 - Valores medidos para característica estática lâmpada L2

<i>V (Volt)</i>	<i>I (mA)</i>	<i>R (Ohm)</i>
1,0	7,8	128,2
1,5	11,5	130,4
2,0	15,0	133,3
2,5	18,5	135,1
3,0	21,5	139,5
3,5	24,5	142,9
4,0	27,0	148,1
4,5	29,5	152,5
5,0	32,0	156,3
5,5	33,5	164,2
6,0	35,0	171,4
6,5	37,0	175,7
7,0	38,5	181,8
7,5	40,5	185,2
8,0	42,5	188,2
8,5	43,5	195,4
9,0	44,5	202,2
9,5	45,5	208,8
10,0	47,0	212,8
10,5	48,0	218,8
11,0	48,5	226,8
11,5	49,5	232,3
12,0	50,5	237,6
12,5	52,0	240,4

Tabela 7 - Valores medidos para característica estática lâmpada L3

<i>V (Volt)</i>	<i>I (mA)</i>	<i>R (Ohm)</i>
0,100	0,020	5,0
0,200	0,039	5,1
0,300	0,058	5,2
0,400	0,076	5,3
0,500	0,093	5,4
0,600	0,108	5,6
0,700	0,123	5,7
0,800	0,137	5,8
0,900	0,149	6,0
1,000	0,161	6,2
1,100	0,171	6,4
1,200	0,181	6,6
1,300	0,191	6,8
1,400	0,199	7,0
1,500	0,207	7,2
1,600	0,214	7,5
1,700	0,221	7,7
1,800	0,228	7,9
1,900	0,234	8,1
2,000	0,241	8,3
2,100	0,247	8,5
2,200	0,252	8,7
2,300	0,256	9,0
2,400	0,261	9,2
2,500	0,264	9,5
2,600	0,269	9,7
2,700	0,273	9,9
2,800	0,277	10,1
2,900	0,281	10,3
3,000	0,286	10,5
3,500	0,300	11,7
4,000	0,315	12,7

Tabela 8 - Relação entre a velocidade e tensão para a lâmpada L1

<i>Velocidade (Km/h)</i>	<i>Tensão (V)</i>
0,00	0,44
4,20	1,12
5,50	1,24
7,50	1,32
9,50	1,48
12,08	1,63
13,20	1,80
13,60	1,81
15,50	1,94
16,70	1,99
19,75	2,20
23,50	2,37
29,50	2,53
50,83	2,89

Tabela 9 - Relação entre a velocidade e tensão para a lâmpada L2

<i>Velocidade (Km/h)</i>	<i>Tensão (V)</i>
0	1,5
4,5	3,24
7,5	3,5
9,8	3,7
10,2	3,9
12,5	4,2
14	4,3
15,3	4,4
16,4	4,42
21,8	4,54
23,8	4,58
25,6	4,6
27,9	4,6

Tabela 10 - - Relação entre velocidade e tensão para a lâmpada L3

<i>Velocidade (Km/h)</i>	<i>Tensão (V)</i>
0	1,2
3	1,75
5	2,1
6,4	2,35
8,5	2,55
10	2,74
12,5	2,92
15	3,15
18	3,34
20	3,54
22	3,74
25	3,93
27	4,04
28	4,1
30	4,16

Código para leitura e transmissão da velocidade com recurso a Arduino, para lâmpada L3:

```
String msg=String(""); // String com a mensagem NMEA

void setup()

{

  Serial.begin(4800); // Inicializa porta série de acordo com as especificações NMEA

}

void loop()

{

  int sensorValue = analogRead(A0); // Lê a entrada analógica A0

  float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0); // Converte the a leitura analógica (que varia entre 0 - 1023) para uma tensão (0 - 5V)

  float SpeedKm = 2.2807*pow(voltage,2)-2.4701*voltage; // Aplica a equação polinomial de 2º grau da Lâmpada L3

  float Knots = SpeedKm / 1.852; // Converte a velocidade lida em Km/h para nós

  float SpeedM = SpeedKm / 3.6; // Converte a velocidade lida em Km/h para m/s

  msg.concat("$--VWR"); // Concatena cabeçalho

  msg.concat(','); // Concatena separador

  msg.concat(','); // Concatena separador

  msg.concat(','); // Concatena separador

  msg.concat(Knots); // Concatena o campo com velocidade em Nós

  msg.concat(','); // Concatena separador

  msg.concat('N'); // Concatena a unidade N (Nós)

  msg.concat(','); // Concatena separador

  msg.concat(SpeedM); // Concatena o campo com a velocidade em m/s

  msg.concat(','); // Concatena separador

  msg.concat('M'); // Concatena a unidade M (m/s)

  msg.concat(','); // Concatena separador

  msg.concat(SpeedKm); // Concatena o campo com a velocidade em Km/h

  msg.concat(','); // Concatena separador

  msg.concat('K'); // Concatena a unidade K (Km/h)

  msg.concat('*'); // Concatena terminador

  msg.concat(ComputeChecksum(msg)); // Concatena o checksum
```

```

Serial.println(msg); // Transmite a mensagem NMEA

delay(1000); // Espera 1 segundo entre transmissões

msg=""; //limpa a mensagem
}

String ComputeChecksum(String payload)
{
    //calcular checksum

    byte acc=0;

    for(int i=1; i<payload.length()-1; i++)
    {
        //faz o XOR de todos os bytes desde caractere a seguir ao '$' até ao caractere antes
do '*'

        //o operador ^ faz a operação XOR bit a bit

        acc=acc^(byte)payload.charAt(i);
    }

    String checksum = String(acc,HEX); // O checksum utiliza caracteres em hexadecimal

    checksum.toUpperCase();

    return checksum;
}

```