



Adriana Brito Cabral Elias

Licenciada em Ciências de Engenharia Física

Estudo de uma micro-bomba de água sem partes móveis

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Física

Orientadores: Grégoire Bonfait,
Professor Associado com Agregação,
Universidade Nova de Lisboa
Hugo Águas,
Professor Auxiliar,
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Filipe Oliveira

Arguentes: Prof. Doutor Hugo Gamboa

Vogal: Prof. Doutor Grégoire Bonfait



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Estudo de uma micro-bomba de água sem partes móveis

Copyright © Adriana Brito Cabral Elias, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

A ti,

Porque me ensinaste a levantar a cabeça e a sorrir para a vida, mesmo que esta, de vez em quando, nos pregue surpresas mais amargas.

Agradecimentos

Ao Professor Grégoire Bonfait pela orientação e disponibilidade, pela oportunidade dada de me integrar no laboratório de Criogenia através da realização deste projeto, mas acima de tudo, pelos conselhos e conversas de força e motivação durante este último ano. Ao Professor Hugo Águas pela co-orientação e disponibilidade, pela partilha de conhecimentos e esclarecimentos dados sobre a microfluídica.

Aos departamentos CENIMAT e CEMOP por fornecerem os meios disponíveis e necessários para a realização deste projeto. À Raquel Água, à Sara Silvestre, ao Ricardo Farinha e ao Francisco Matos pela disponibilidade e ajuda prestada na realização dos processos de impressão 3D e microfluídica.

Ao departamento de Física, nomeadamente, ao Faustino, ao Sr. Eduardo e ao Sr. Mesquita pela disponibilidade e ajuda prestada. Ao Jorge pela disponibilidade e partilha de conhecimentos, mas acima de tudo, pela ajuda prestada na realização da “minha parte preferida” deste projeto. Agradeço, igualmente, pelos momentos de descontração e gargalhadas partilhadas.

À Cata, ao Guincha, ao Duarte, à Nofre, ao Canhoto, à Tota e ao Badu pela companhia nas viagens de metro/comboio, pela partilha de dúvidas e desespero pré-teste, pela partilha de conselhos nas crises existenciais e pelas palhaçadas do dia-a-dia. Ao Didas, ao Ramos e ao Alves pelos almoços de “partir o coco a rir”, pelas cartadas e noitadas de bebedeira. Acima de tudo, a todos, um obrigado pelo ombro amigo carregado de paciência, força e motivação.

À Dr.^a Thaysa pela disponibilidade, pelos conselhos e conversas de força e motivação e, em especial, pelo carinho prestado durante este último ano. Às minhas “Sis” pelas maluquices do dia-a-dia, pelos puxões de orelhas, pelos choros e risos, mas acima de tudo, pela presença nos momentos altos e baixos da minha vida. Às “Bombásticas” pelas “baboseiras” que tornam qualquer dia muito mais divertido. Aos colegas da Bounce pela *vibe* que veio na altura certa.

Por último, e não menos importante, um OBRIGADO gigante à minha família, nomeadamente, aos meus tios (Nanda e Rui) por serem os meus “segundos pais”, à minha prima (Inês) por ser uma “mana mais velha” e, em especial, à minha mãe por toda a paciência, compreensão, motivação e apoio ao longo de todos estes anos.

Resumo

Atualmente, na criogenia espacial ocorre um problema frequente que está relacionado com a complexidade que existe em dissipar o calor gerado nos sistemas de detecção de radiação. Desta forma, surge a necessidade de desenvolver sistemas de arrefecimento que funcionem por convecção de modo a contribuir para o elevado desempenho destes aparelhos, uma vez que, em muitos casos, é um processo mais eficaz do que a condução térmica.

Como tal, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e otimizar o funcionamento de uma micro-bomba que funciona por meio de ciclos de evaporação-condensação, obtidos através do uso de um circulador térmico, proporcionando o transporte do fluido através de um conjunto de válvulas passivas. Tendo em conta a simplicidade e a ausência de partes móveis, este projeto é visto como uma alternativa aos sistemas já existentes.

Assim, desenvolveu-se uma montagem experimental, um sistema de aquisição e uma interface gráfica para permitir a medição e a apresentação simultânea e em tempo real de parâmetros importantes para o estudo, nomeadamente, a característica Pressão-Caudal de uma válvula e a quantidade de massa de água transferida pelo sistema válvula-câmara-válvula. Válvulas *Tesla* foram construídas tendo em conta vários desenhos e técnicas. As válvulas construídas através da impressão 3D apresentaram irregularidades nos canais e os resultados simulados não nos permitem afirmar concretamente que as mesmas funcionam bem e apresentam uma diodicidade igual ou superior a 2, sendo por isso necessário continuar a explorar esta técnica. Para o aquecimento foram produzidas resistências de filmes finos e apesar da aprovação do princípio básico da saída/entrada de água no sistema durante os ciclos de evaporação-condensação, é preciso um aquecimento mais eficaz para minimizar a ocorrência de perdas de calor acentuadas. Por último, foram produzidos sistemas válvula-câmara-válvula com novas configurações. Apenas foi possível testar e aprovar o princípio de funcionamento dos mesmos de uma forma qualitativa.

Palavras-chave: Micro-bomba, válvulas *Tesla*, impressão 3D, sistema válvula-câmara-válvula, microfluídica

Abstract

Currently, a frequent problem related to space cryogenics is the complexity around the heat dissipation created by the radiation detection systems. In view of this, there is a need to develop cooling systems that work through convection, instead of thermal conduction, as convection allows for a better performance of the radiation detection systems.

Consequently, the current project has the aim to develop and optimize the use of micro-pump that works through evaporation-condensation cycles, which are obtained through a thermal circulator and that allows for the fluid transportation through a set of passive valves. This project is considered an alternative to the already existing systems due to its components simplicity and its absence of moving parts.

An experimental setup and a data acquisition software was developed with a graphic interface allowing for the simultaneous measurement and real time presentation of the parameters relevant to this study, such as the Pressure-Flow characteristics of a valve and the quantification of water mass transferred by the valve-chamber-valve system. *Tesla* valves were built considering certain aspects and techniques. The 3D impressed valves had irregularities in the channels and, therefore, the simulated results do not allow to conclude whether these valves work effectively and, they have a diodicity of 2 or more, suggesting that more research is needed around this technique. Furthermore, thin film resistors were developed for the heating phase and, despite the use of the water in and out basic principle in the system during the evaporation-condensation cycles, there is a need for more effective heating, in order to reduce heat losses. Finally, valve-chamber-valve systems were developed with new configurations. Nevertheless, it was only possible to test and approve their working principle qualitatively.

Keywords: Micro-pump, *Tesla* valves, 3D printing, valve-chamber-valve system, microfluidic

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1. Transferência de Energia sob a forma de calor	5
Condução	5
Convecção.....	6
2.2. Sistemas de Convecção	7
Pulsating Heat Pipes (PHP).....	8
Cryogenic Loop Heat Pipe (CLHP).....	8
2.3. Micro-bombas	9
Bombeamento por Deslocamento	10
Bombeamento Dinâmico	12
2.4. Micro-válvulas	14
Ativas.....	14
Passivas	15
2.5. Projeto realizado anteriormente na FCT-UNL.....	17
3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO	21
3.1. Pressão.....	21
3.2. Nível de Água	23
Sensor de Nível de Água.....	24
Sensor de Humidade de Solo.....	29
Sensor de Pressão	29
3.3. Massa	34
3.4. Plataforma de Comunicação.....	38
4. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA CÂMARA	41
4.1. Configuração do sistema válvula-câmara-válvula.....	41
4.2. Aquecimento – Filmes Finos.....	44
4.3. Método de Fabricação	46
4.4. Ensaio Experimentais e Resultados.....	48

5. VÁLVULAS TESLA.....	51
5.1. Produção 3D.....	51
5.2. Método de Fabricação.....	52
5.3. Ensaio Experimentais e Resultados.....	54
Modelo TV1-5.....	55
6. SISTEMA VÁLVULA-CÂMARA-VÁLVULA.....	61
6.1. Microfluídica.....	61
6.2. Método de Fabricação.....	62
Molde SU-8.....	62
Chips PDMS.....	66
6.3. Ensaio Experimentais e Resultados.....	68
Sistema TV1-CAM.....	69
Sistema TV3-CAM.....	70
7. CONCLUSÃO	73
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
9. ANEXOS	79
9.1. Anexo A: Datasheet do Sensor MPX5100DP	79
9.2. Anexo B: Datasheet do Sensor de Nível.....	81
9.3. Anexo C: Datasheet do Sensor MPXV5004DP	83

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 - ESQUEMA DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MICRO-BOMBA: SISTEMA VÁLVULA-CÂMARA-VÁLVULA EM (A), PROCESSO DE EVAPORAÇÃO EM (B) E PROCESSO DE CONDENSAÇÃO EM (C). ADAPTADO DE [1].....	2
FIGURA 2.1 – CONDUÇÃO TÉRMICA NUM SÓLIDO. ADAPTADO DE [2].....	6
FIGURA 2.2 – ILUSTRAÇÃO DA CIRCULAÇÃO DO FLUIDO DE TRABALHO NUM PHP EM (A), TUBO COM “OPEN LOOP” EM (B) E TUBO COM “CLOSED LOOP” EM (C). ADAPTADO DE [4].....	8
FIGURA 2.3 – ILUSTRAÇÃO DA CIRCULAÇÃO DO FLUIDO DE TRABALHO NUM CLHP [5].....	9
FIGURA 2.4 – CLASSIFICAÇÃO DAS MICRO-BOMBAS EXISTENTES NA LITERATURA. ADAPTADO DE [7].....	10
FIGURA 2.5 - ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UMA MICRO-BOMBA DE DIAFRAGMA: AUSÊNCIA DE DEFLEXÃO DO DIAFRAGMA EM (A), EXPANSÃO DA CÂMARA EM (B) E COMPRESSÃO DA CÂMARA EM (C). ADAPTADO DE [8]..	11
FIGURA 2.6 - ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UMA MICRO-BOMBA DE FLUIDO: FORMAÇÃO DAS BOLHAS EM (A), DESLOCAÇÃO DAS BOLHAS EM (B) E CONDENSAÇÃO DAS BOLHAS EM (C). ADAPTADO DE [7].....	11
FIGURA 2.7 – ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UMA MICRO-BOMBA “ROTATIVE-GEAR”. ADAPTADO DE [7].....	12
FIGURA 2.8 – DIFERENTES TIPOS DE MICRO-BOMBA “VISCOUS FORCE”. ADAPTADO DE [7].....	12
FIGURA 2.9 – MICRO-BOMBAS ELETRO-HIDRODINÂMICAS DO TIPO INDUÇÃO EM (A), INJEÇÃO EM (B) E POLARIZAÇÃO EM (C). ADAPTADO DE [7].....	13
FIGURA 2.10 - ILUSTRAÇÃO DA DIREÇÃO DO MOVIMENTO INDUZIDO NO FLUIDO, ATRAVÉS DAS FORÇAS DE LORENTZ RESULTANTES DA PERPENDICULARIDADE ENTRE UM CAMPO ELÉTRICO E UM CAMPO MAGNÉTICO. ADAPTADO DE [10].....	13
FIGURA 2.11 - CLASSIFICAÇÃO DAS MICRO-VÁLVULAS EXISTENTES NA LITERATURA. ADAPTADO DE [11].....	14
FIGURA 2.12 - MODOS DE OPERAÇÃO DE UMA VÁLVULA DO TIPO <i>FLAP</i> : SENTIDO DIRETO EM (A) E SENTIDO INDIRETO EM (B).....	15
FIGURA 2.13 - MODOS DE OPERAÇÃO DE UMA VÁLVULA DO TIPO <i>TESLA</i> [7].....	15
FIGURA 2.14 – REGIMES DE ESCOAMENTO DEFINIDOS PELO NÚMERO DE REYNOLDS. O FLUXO LAMINAR PARA $Re \ll 2000$ EM (A) E O FLUXO TURBULENTO PARA $Re \gg 2000$ EM (B). ADAPTADO DE [13].....	17
FIGURA 2.15 - ESQUEMA DO SISTEMA DE MAIORES DIMENSÕES COM VÁLVULAS <i>FLAP</i> EM (A) E PLACA FINAL DE <i>PLEXIGLASS</i> PRODUZIDA PARA TESTAR O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CIRCULADOR PROPOSTO EM (B). ADAPTADO DE [1].....	18

FIGURA 2.16 - ESQUEMA DOS DOIS SISTEMAS (TV1-CAM E TV3-CAM) DE MENORES DIMENSÕES COM VÁLVULAS <i>TESLA</i> EM (A) E UM DOS <i>CHIPS</i> FINAIS EM PDMS PRODUZIDO PARA TESTAR O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CIRCULADOR PROPOSTO EM (B). ADAPTADO DE [1].	18
FIGURA 3.1 - SENSOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO MPX5100DP.	21
FIGURA 3.2 – ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL DESENVOLVIDA PARA REALIZAR A CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE PRESSÃO MPX5100DP.	22
FIGURA 3.3 – GRÁFICO DA DIFERENÇA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO VALOR DE BITS, ATRAVÉS DO QUAL SE OBTVEU A RETA DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR DE PRESSÃO MPX5100DP.	23
FIGURA 3.4 – SENSORES DE NÍVEL UTILIZADOS NOS TESTES: SENSOR DE NÍVEL DE ÁGUA EM (A) E SENSOR DE HUMIDADE DE SOLO EM (B).	23
FIGURA 3.5 – ESQUEMA DA PRIMEIRA MONTAGEM EXPERIMENTAL DESENVOLVIDA PARA VERIFICAR O MODO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE NÍVEL DE ÁGUA.	24
FIGURA 3.6 – LEITURA DO SENSOR DE NÍVEL DE ÁGUA (SENSOR 1) COM BASE NA MONTAGEM EXPERIMENTAL DA FIGURA 3.5. SÃO APRESENTADOS OS RESULTADOS DE DUAS MEDIDAS INDEPENDENTES.	25
FIGURA 3.7 – LEITURA DO SENSOR DE NÍVEL DE ÁGUA (SENSOR 2) COM BASE NA MONTAGEM EXPERIMENTAL DA FIGURA 3.5. SÃO APRESENTADOS OS RESULTADOS DE DUAS MEDIDAS INDEPENDENTES.	25
FIGURA 3.8 - SEGUNDA MONTAGEM EXPERIMENTAL DESENVOLVIDA PARA VERIFICAR O MODO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE NÍVEL DE ÁGUA (SENSOR 3) E TENTAR REALIZAR A SUA CALIBRAÇÃO.	26
FIGURA 3.9 – LEITURA DO SENSOR DE NÍVEL DE ÁGUA (SENSOR 3) COM BASE NA MONTAGEM EXPERIMENTAL DA FIGURA 3.8. SÃO APRESENTADOS OS RESULTADOS DE TRÊS MEDIDAS INDEPENDENTES.	27
FIGURA 3.10 – COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS POR NÓS COM OS VALORES DO TESTE ENCONTRADO NA LITERATURA.	27
FIGURA 3.11 – LEITURA DO SENSOR 3 (APÓS A LIMPEZA DAS PISTAS CONDUTORAS) COM BASE NA MONTAGEM EXPERIMENTAL DA FIGURA 3.8. SÃO APRESENTADOS OS RESULTADOS DE TRÊS MEDIDAS INDEPENDENTES.	28
FIGURA 3.12 – COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS POR NÓS (APÓS A LIMPEZA DAS PISTAS CONDUTORAS) COM OS VALORES DO TESTE ENCONTRADO NA LITERATURA.	28
FIGURA 3.13 – LEITURA DO SENSOR DE HUMIDADE DE SOLO COM BASE NA MONTAGEM EXPERIMENTAL DA FIGURA 3.8. SÃO APRESENTADOS OS RESULTADOS DE TRÊS MEDIDAS INDEPENDENTES.	29
FIGURA 3.14 – SENSOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO MPXV5004DP (UTILIZADO COMO SENSOR DE NÍVEL).	30
FIGURA 3.15 - GRÁFICO DA DIFERENÇA DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO VALOR DE BITS, ATRAVÉS DO QUAL SE OBTVEU A RETA DE CALIBRAÇÃO PARA O SENSOR DE PRESSÃO MPXV5004DP.	30
FIGURA 3.16 – ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL ATRAVÉS DA QUAL O SENSOR DE PRESSÃO MPXV5004DP FUNCIONA COMO MEDIDOR DE NÍVEL.	32
FIGURA 3.17 – ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL DESENVOLVIDA PARA VERIFICAR O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR DE PRESSÃO MPXV5004DP COMO MEDIDOR DE NÍVEL.	32
FIGURA 3.18 – LEITURA DO SENSOR DE PRESSÃO MPXV5004DP COM BASE NA MONTAGEM EXPERIMENTAL DA FIGURA 3.17. SÃO APRESENTADOS OS RESULTADOS DE DUAS MEDIDAS INDEPENDENTES.	33
FIGURA 3.19 – LEITURA DO SENSOR DE PRESSÃO MPXV5004DP (TENDO EM CONTA QUE O RESERVATÓRIO 2 SOFRE UMA VARIAÇÃO DE ALTURA MÁXIMA DE APROXIMADAMENTE 48 MM) COM BASE NA MONTAGEM EXPERIMENTAL DA FIGURA 3.17.	34
FIGURA 3.20 – ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL DESENVOLVIDA PARA EFETUAR A CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO PARA PERMITIR, EM TRABALHOS FUTUROS, A MEDIÇÃO DIRETA DA CARACTERÍSTICA PRESSÃO-CAUDAL DE UMA VÁLVULA <i>TESLA</i> E DA QUANTIDADE DE MASSA DE ÁGUA TRANSFERIDA PELO SISTEMA VÁLVULA-CÂMARA-VÁLVULA.	35

FIGURA 3.21 - MONTAGEM EXPERIMENTAL DESENVOLVIDA PARA EFETUAR A CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO PARA PERMITIR, EM TRABALHOS FUTUROS, A MEDIÇÃO DIRETA DA CARATERÍSTICA PRESSÃO-CAUDAL DE UMA VÁLVULA <i>TESLA</i> E DA QUANTIDADE DE MASSA DE ÁGUA TRANSFERIDA PELO SISTEMA VÁLVULA-CÂMARA-VÁLVULA.....	35
FIGURA 3.22 – CALIBRAÇÃO DA MASSA: RELAÇÃO ENTRE OS SENSORES 1 E 2 EM (A) E RELAÇÃO ENTRE A BALANÇA E O SENSOR 2 EM (B).....	38
FIGURA 3.23 – INTERFACE GRÁFICA DESENVOLVIDA ATRAVÉS DO LABVIEW: JANELA ATRAVÉS DA QUAL É APRESENTADA A MEDIDA SIMULTÂNEA DA PRESSÃO E DO NÍVEL DE ÁGUA NUM RESERVATÓRIO EM (A) E JANELA ATRAVÉS DA QUAL É APRESENTADA A QUANTIDADE DE ÁGUA TRANSFERIDA PELO SISTEMA EM (B).	39
FIGURA 4.1 – ESQUEMA DO SISTEMA PROPOSTO PELA ENG. ^a SOFIA ALVES, NO QUAL A CÂMARA DE TRABALHO NÃO SE ENCONTRA ALINHADA COM O CONJUNTO DE VÁLVULAS DE ENTRADA/SAÍDA. ADAPTADO DE [1].....	42
FIGURA 4.2 – ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MICRO-BOMBA COM A NOVA CONFIGURAÇÃO: SISTEMA VÁLVULA-CÂMARA-VÁLVULA EM (A); PROCESSO DE EVAPORAÇÃO EM (B) E PROCESSO DE CONDENSAÇÃO EM (C).	43
FIGURA 4.3 - PERFIL DE TEMPERATURA NA ÁGUA ($x \leq 0$) E NO VIDRO ($x \geq 0$), APÓS O AQUECIMENTO DA ÁGUA ATÉ AOS 100 °C (NOTE-SE QUE OS VALORES DE “t” INDICAM O TEMPO NECESSÁRIO PARA AQUECER A ÁGUA ATÉ AOS 100 °C)	45
FIGURA 4.4 – DESENHOS DOS FILMES (DESENVOLVIDOS ATRAVÉS DE UM <i>SOFTWARE</i> TIPO CAD): DF1 EM (A), DF2 EM (B), DF3 EM (C) E DF4 EM (D).....	45
FIGURA 4.5 – PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO PARA A DEPOSIÇÃO DO METAL: REVESTIMENTO DO SUBSTRATO COM O FOTORESISTE AZ6632 ATRAVÉS DA TÉCNICA “ <i>SPIN COATING</i> ” EM (A) E MÁSCARA DE ACETATO COM OS DESENHOS DOS FILMES FINOS A DEPOSITAR NO VIDRO EM (B).	47
FIGURA 4.6 - FILMES FINOS PRODUZIDOS ATRAVÉS DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO POR EVAPORAÇÃO ASSISTIDA EM VÁCUO POR CANHÃO DE ELETRÕES: DF1 EM (A), DF2 EM (B), DF3 EM (C) E DF4 EM (D).	48
FIGURA 4.7 - PRIMEIRA MONTAGEM DESENVOLVIDA PARA TESTAR AS RESISTÊNCIAS DE AQUECIMENTO E VERIFICAR O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA BASEADO NA NOVA CONFIGURAÇÃO. CONJUNTO VIDRO-CÂMARA CONECTADO AO RESERVATÓRIO DE ENTRADA/SAÍDA DE ÁGUA. ADICIONOU-SE CORANTE ALIMENTAR À ÁGUA DE MODO A FACILITAR A VISUALIZAÇÃO DO DESLOCAMENTO DO FLUIDO NO TUBO DE CONEXÃO.	49
FIGURA 4.8 – CONJUNTO VIDRO-CÂMARA ASSOCIADO AO FILME DF3: PRIMEIRA FASE DE AQUECIMENTO (Δt DE 7 A 14 s).....	50
FIGURA 4.9 – CONJUNTO VIDRO-CÂMARA ASSOCIADO AO FILME DF3: PRIMEIRA FASE DE ARREFECIMENTO (Δt DE 14 A 21 s).	50
FIGURA 4.10 – CONJUNTO VIDRO-CÂMARA ASSOCIADO AO FILME DF3: SEGUNDA FASE DE AQUECIMENTO (Δt DE 21 A 28 s).	50
FIGURA 5.1 – DESENHOS DOS DOIS MODELOS DIFERENTES DE VÁLVULAS (DESENVOLVIDOS ATRAVÉS DE UM <i>SOFTWARE</i> TIPO CAD): TV1-5 EM (A) E TV3-5 EM (B). ADAPTADO DE [1].....	52
FIGURA 5.2 – ESQUEMA DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D COM BASE NO SISTEMA <i>UPSIDE-DOWN SLA</i> . ADAPTADO DE [18].....	53
FIGURA 5.3 – ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL DESENVOLVIDA PARA TESTAR O BOM FUNCIONAMENTO DAS PEÇAS IMPRESSAS E OBTER A CARATERIZAÇÃO PRESSÃO-CAUDAL DAS VÁLVULAS DE CADA UM DOS MODELOS ESCOLHIDOS.	54
FIGURA 5.4 – PEÇA 1 (PRIMEIRA PEÇA “ <i>ONE SIDE</i> ” IMPRESSA).....	56
FIGURA 5.5 – IMAGEM MICROSCÓPICA DAS VÁLVULAS DE ENTRADA/SAÍDA DA PEÇA 1.	56

FIGURA 5.6 – CARATERIZAÇÃO PRESSÃO-CAUDAL DAS VÁLVULAS DA PEÇA 1: VÁLVULA DE ENTRADA EM (A) E VÁLVULA DE SAÍDA EM (B).....	56
FIGURA 5.7 – PEÇA 2 (SEGUNDA PEÇA “ONE SIDE” IMPRESSA).....	57
FIGURA 5.8 – IMAGEM MICROSCÓPICA DAS VÁLVULAS DE ENTRADA/SAÍDA DA PEÇA 2.	57
FIGURA 5.9 - CARATERIZAÇÃO PRESSÃO-CAUDAL DAS VÁLVULAS DA PEÇA 2: VÁLVULA DE ENTRADA EM (A) E VÁLVULA DE SAÍDA EM (B).....	57
FIGURA 5.10 – PEÇA 3 (PEÇA “FULL 3D” IMPRESSA).....	58
FIGURA 5.11 – IMAGEM MICROSCÓPICA DAS VÁLVULAS DE ENTRADA/SAÍDA DA PEÇA 3.....	58
FIGURA 5.12 - CARATERIZAÇÃO PRESSÃO-CAUDAL DAS VÁLVULAS DA PEÇA 3: VÁLVULA DE ENTRADA EM (A) E VÁLVULA DE SAÍDA EM (B).....	58
FIGURA 6.1 – DESENHOS DOS DOIS SISTEMAS VÁLVULA-CÂMARA-VÁLVULA (DESENVOLVIDOS ATRAVÉS DE UM SOFTWARE TIPO CAD): SISTEMA TV1-CAM EM (A) E TV3-CAM EM (B). EM AMBOS OS SISTEMAS, AO CENTRO DA CÂMARA ESTÁ DESENHADO UM PILAR PARA EVITAR A DEFORMAÇÃO DO PDMS NESTA ZONA MENOS ESPESSE (E, PORTANTO, MAIS FLEXÍVEL) E MANTER A PROFUNDIDADE DE 500 μ M DA CÂMARA.	62
FIGURA 6.2 – ESQUEMA DO PROCESSO DE EXPOSIÇÃO DO FOTORESISTE SU-8 À LUZ UV. ADAPTADO DE [20].....	62
FIGURA 6.3 – ESQUEMA DOS 6 PASSOS PARA A FABRICAÇÃO DO MOLDE SU-8. ADAPTADO DE [21].....	63
FIGURA 6.4 – DEPOSIÇÃO DO FOTORESISTE SU-8 DO TIPO “NEGATIVO” SOBRE O CENTRO DA BOLACHA DE SI ANTES DA REALIZAÇÃO DA TÉCNICA “SPIN COATING”.....	64
FIGURA 6.5 – GRÁFICO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SPIN COATER CONFORME A ESPESURA DA CAMADA DESEJADA DO FOTORESISTE SU-8 [22].	64
FIGURA 6.6 – DESENHO DA MÁSCARA DE ACETATO COM OS DOIS SISTEMAS (TV1-CAM E TV3-CAM) A SEREM GRAVADOS NO SUBSTRATO DA BOLACHA REVESTIDA COM O FOTORESISTE SU-8 2150 (COM BASE NA FOTOLITOGRAFIA).....	65
FIGURA 6.7 – MOLDE FINAL EM SU-8 COM OS MODELOS DOS SISTEMAS GRAVADOS (TV1-CAM E TV3-CAM).....	66
FIGURA 6.8 – ESQUEMA DOS 5 PASSOS PARA A FABRICAÇÃO DA RÉPLICA PDMS. ADAPTADO DE [24].	67
FIGURA 6.9 – ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL DESENVOLVIDA PARA TESTAR AS RESISTÊNCIAS DE AQUECIMENTO E VERIFICAR O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS TV1-CAM E TV3-CAM. CONJUNTO VIDRO-CHIP CONECTADO AOS RESERVATÓRIOS DE ENTRADA E SAÍDA DE ÁGUA. ADICIONOU-SE CORANTE ALIMENTAR À ÁGUA PRESENTE NO RESERVATÓRIO DE ENTRADA, DE MODO A FACILITAR A VISUALIZAÇÃO DO DESLOCAMENTO DO FLUIDO NOS CANAIS DAS VÁLVULAS.....	69
FIGURA 6.10 – SISTEMA TV3-CAM ASSOCIADO AO FILME DF2: PROCESSO DE EVAPORAÇÃO-CONDENSAÇÃO DA ÁGUA (T=0 s).....	71
FIGURA 6.11 – SISTEMA TV3-CAM ASSOCIADO AO FILME DF2: DESLOCAMENTO DO FLUIDO APÓS A PRIMEIRA FASE DE AQUECIMENTO (T=10 s).....	71
FIGURA 6.12 – SISTEMA TV3-CAM ASSOCIADO AO FILME DF2: DESLOCAMENTO DO FLUIDO APÓS A PRIMEIRA FASE DE ARREFECIMENTO (T=16 s).....	71
FIGURA 6.13 – SISTEMA TV3-CAM ASSOCIADO AO FILME DF2: APÓS 3 CICLOS DE EVAPORAÇÃO-CONDENSAÇÃO DA ÁGUA (T=28 s).....	71
FIGURA 9.1 – DESCRIÇÃO GERAL PARA DIFERENTES TIPOS DE SENSOR PERTENCENTES À GAMA MPX5100.	79
FIGURA 9.2 – TABELA DE VALORES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÉTRICAS PARA DIFERENTES TIPOS DE SENSOR PERTENCENTES À GAMA MPX5100.....	80
FIGURA 9.3 – CIRCUITO NECESSÁRIO PARA O USO DE UM SENSOR DE NÍVEL.....	81
FIGURA 9.4 – EXEMPLO DE CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO NECESSÁRIO PARA O USO DE UM SENSOR DE NÍVEL.....	82
FIGURA 9.5 - DESCRIÇÃO GERAL PARA DIFERENTES TIPOS DE SENSOR PERTENCENTES À GAMA MPXV5004.	83

FIGURA 9.6 - TABELA DE VALORES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÉTRICAS PARA DIFERENTES TIPOS DE SENSOR
PERTENCENTES À GAMA MPXV5004.....84

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 – VALORES CORRESPONDENTES À ENERGIA NECESSÁRIA PARA AQUECER (20 °C A 100 °C) E EVAPORAR, RESPETIVAMENTE, 0.1 MM ³ DO VOLUME DE ÁGUA INICIAL, COM BASE NO MODELO CIRCULAR DA FIGURA 4.1.43	
TABELA 4.2 – DIMENSÕES DOS FILMES.....	46

Lista de Acrónimos

PHP	Pulsating Heat Pipe
CLHP	Cryogenic Loop Heat Pipe
VCV	Válvula-Câmara-Válvula
PCR	Polymerase Chain Reaction
LoC	Lab-on-Chip
EDL	Electrical Double Layer
DC	Direct Current
AC	Alternative Current
Re	Reynolds
CNC	Computer Numerical Control
DF	Drawing of the Thin Film
CAD	Computer Aided Design
3D	Three-Dimensional
TV	Tesla Valve
CAM	Câmara de Trabalho
IPA	Isopropyl Alcohol
SLA	Stereolithography
PDMS	Polydimethylsiloxane

Lista de Variáveis

\dot{Q}	Potência
k	Condutividade térmica do material
A	Área da secção transversa do material
T	Temperatura
L	Comprimento do material
\dot{V}	Caudal Volúmico
L	Calor de Vaporização
Re	Número de Reynolds
q_0''	Fluxo de calor no material
α	Difusividade térmica do material
ρ	Densidade de fluido
v	Velocidade do fluxo do fluido
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
D_H	Diâmetro hidráulico do canal
D_i	Diodicidade
ΔP	Diferença de Pressão
Δh	Variação de Altura
Z	Impedância hidrodinâmica do canal

1

Introdução

Na criogenia espacial, um dos temas mais importantes está relacionado com o elevado desempenho dos sistemas de detecção de radiação (sobretudo radiação infravermelha). De modo a que tal seja alcançado, é necessário manter este tipo de aparelhos a baixas temperaturas. Logo, surge a necessidade de dissipar o calor gerado pelo próprio detetor quando este se encontra exposto a uma fonte quente pela absorção de radiação ou pelos sistemas eletrónicos que estão integrados e contribuem para o seu funcionamento. Desta forma, nos últimos anos verificou-se um aumento significativo no desenvolvimento de sistemas de arrefecimento eficientes e de pequenas dimensões, nos quais a maximização da transferência de calor e a existência do mínimo de partes móveis que evite o desgaste precoce são dois fatores determinantes nas aplicações espaciais. Assim, é fundamental que nos satélites o transporte de grandes fluxos de calor e/ou a grandes distâncias seja um processo leve e bastante eficaz.

Atualmente, uma solução que permite ultrapassar este problema e, portanto, aumentar a eficiência do transporte de calor, baseia-se no uso de sistemas que funcionem por convecção, substituindo a condução térmica, como por exemplo os “*Pulsating Heat Pipe*” (PHP) e os “*Cryogenic Loop Heat Pipe*” (CLHP).

Como tal, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e otimizar o funcionamento de um circulador de pequenas dimensões, no qual é inexistente qualquer movimento mecânico, uma vez que isso tornaria mais complexa a fabricação e operação do mesmo. O sistema é formado por uma câmara de trabalho e um conjunto de válvulas unidirecionais (do tipo *Tesla*) que operam através da diferença de pressão e possibilitam a circulação do fluido (por enquanto água à temperatura ambiente) que é obtida através do uso de um circulador térmico que funciona por meio de ciclos de evaporação-condensação (Figura 1.1-a). Isto é, quando se liga o aquecimento localizado na câmara, de modo a ser transferido calor apenas ao fluido (em estado líquido) presente na mesma, ocorre o processo de evaporação (Figura 1.1-b). Assim, parte do fluido aquece e transita para o estado gasoso ocupando todo o volume da câmara e devido às diferenças de pressão existentes entre esta e os canais, todo o restante líquido é empurrado e flui apenas

através da válvula de saída. Quando o aquecimento é desligado ocorre o processo de condensação, ou seja, a pequena parte do fluido que evaporou volta ao volume líquido inicial (Figura 1.1-c). Assim, a pressão na câmara é inferior à pressão nos canais e o líquido passa apenas pela válvula de entrada, enchendo novamente a câmara. Futuramente, será necessário adaptar o circulador às baixas temperaturas com a finalidade de funcionar com azoto líquido e, assim, permitir que o mesmo seja uma solução alternativa aos PHP e CLHP, com grande simplicidade em alguns casos específicos. É de salientar, que o sistema que se pretende estudar neste trabalho foi parcialmente estudado pela Eng.^a Sofia Alves em [1]. Apesar do estudo anterior demonstrar que o princípio base de funcionamento do sistema foi alcançado, ocorreu a necessidade de dar continuidade a esse trabalho, a fim de introduzir medidas muito mais quantitativas e resolver alguns dos problemas que surgiram durante a realização do mesmo.

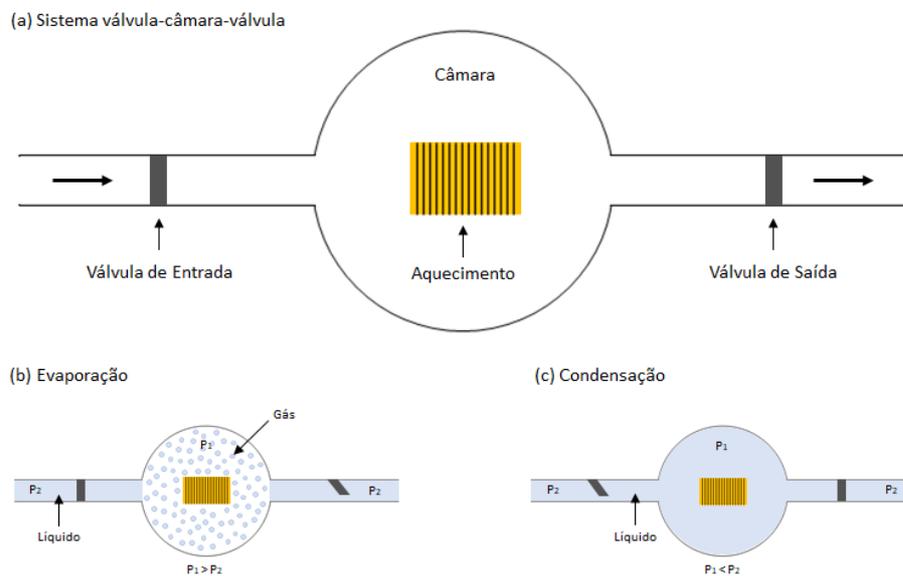


Figura 1.1 - Esquema do princípio de funcionamento da micro-bomba: sistema válvula-câmara-válvula em (a), processo de evaporação em (b) e processo de condensação em (c). Adaptado de [1].

Este trabalho divide-se em quatro etapas essenciais: a primeira consiste no desenvolvimento de uma montagem experimental, de um sistema de aquisição e de uma interface gráfica que permite a medição e a apresentação simultânea e em tempo real dos parâmetros mais importantes para este estudo, nomeadamente, a característica Pressão-Caudal de uma válvula e a quantidade de massa de água transferida pelo sistema. A segunda etapa consiste na otimização do aquecimento do fluido de trabalho. A terceira etapa consiste na produção de válvulas *Tesla* através da impressão 3D. A quarta e última etapa consiste na produção de novas configurações do sistema válvula-câmara-válvula (VCV) através das técnicas típicas da microfluídica.

No capítulo 2 é exposta uma breve explicação dos conceitos teóricos fundamentais para a realização deste trabalho, bem como pequenos cálculos que realçam a eficiência do uso da

convecção no transporte de fluidos na criogenia. Similarmente, é explicado o princípio de funcionamento dos sistemas PHP e CLHP, os diferentes tipos de micro-bombas e micro-válvulas encontradas na literatura e o trabalho anteriormente realizado na faculdade.

No capítulo 3 são apresentadas a montagem experimental e a interface gráfica desenvolvidas para permitir, respetivamente, a medição e apresentação simultânea e em tempo real dos parâmetros importantes para este estudo. São expostos os diferentes tipos de sensores testados e os resultados obtidos que permitiram a escolha dos dispositivos mais adequados para a calibração do sistema de aquisição.

No capítulo 4 são estudadas alternativas que permitem a otimização do aquecimento do fluido de trabalho presente na câmara. Um primeiro dimensionamento do tipo de aquecimento a ser utilizado é explicado com base nas correções efetuadas aos cálculos anteriormente realizados. Posto isto, é descrito o processo de fabricação dos novos aquecimentos, bem como o método escolhido para a realização dos ensaios experimentais e os resultados obtidos.

No capítulo 5 é apresentada a técnica alternativa (impressão 3D) utilizada na fabricação das válvulas *Tesla*. Após efetuados os ajustes necessários no dimensionamento dos dois modelos diferentes de válvulas a serem utilizados neste trabalho, é exposto todo o processo inerente à fabricação dos mesmos, assim como os ensaios experimentais e resultados correspondentes.

No capítulo 6 são expostas as novas configurações do sistema válvula-câmara-válvula, a fim de o tornar mais simples e eficiente. Os novos sistemas são produzidos através das técnicas já utilizadas em [1]. Após efetuados os ensaios experimentais, os resultados obtidos são comparados com os que foram anteriormente alcançados.

Por último, no capítulo 7 são apresentadas as devidas conclusões sobre o trabalho desenvolvido e quais as possíveis melhorias que devem ser analisadas na realização de um trabalho futuro.

2

Estado de Arte

2.1. Transferência de Energia sob a forma de calor

Neste trabalho é abordada a transferência de energia sob a forma de calor, sendo que esta é definida como a energia térmica trocada entre dois sistemas que se encontram a temperaturas diferentes. Este processo pode ocorrer de três formas distintas: por condução, convecção ou radiação.

Condução

A condução térmica é definida como a transferência microscópica de energia que ocorre através de um meio por interação direta entre os átomos ou moléculas vizinhas, sem que haja transporte de matéria. Este modo de propagação de calor ocorre não só nos sólidos, como também nos líquidos e gases, apesar de ser um processo menos eficaz nos últimos dois. Nos sólidos, a energia propaga-se através das vibrações da rede cristalina ou dos elétrons livres existentes nos mesmos. Nos líquidos e gases, a condução ocorre devido às colisões entre os átomos ou moléculas.

A partir do exemplo da figura 2.1, se a condução térmica varia através de uma pequena distância entre T_Q e T_F , a potência (calor transferido por unidade de tempo) que atravessa o sólido é calculada através da seguinte equação:

$$\dot{Q} = k \frac{A}{L} (T_Q - T_F) \quad (2.1)$$

onde k representa a condutividade térmica do material, A a área da secção transversa e $(T_Q - T_F)/L$ o gradiente de temperatura para uma distribuição linear da mesma.

De modo a demonstrar que a condução de calor se torna um processo pouco eficaz através dos sólidos e sobre grandes distâncias, apresenta-se um cálculo simples similar ao de [1]. Então, ao considerarmos uma barra de alumínio (o mais leve dos materiais bons condutores) de 30 cm de comprimento e 2.5 cm de diâmetro, com uma diferença de temperatura de 1 K entre as suas extremidades, a potência transportada seria de valor igual a:

$$\dot{Q} = 250 \text{ W/mK} \times \pi \times \left(\frac{0.025}{2}\right)^2 \text{ m}^2 \times \frac{1 \text{ K}}{0.3 \text{ m}} \approx 0.4 \text{ W} \quad (2.2)$$

sendo que $k_{\text{Al}(77 \text{ K})} \approx 250 \text{ W/mK}$. Ou seja, para evacuar uma potência de 0.4 W ao longo de 30 cm de uma barra de alumínio, a secção da barra terá de ser superior a 2.5 cm para limitar o aumento de temperatura a 1 K. Logo, o sistema seria não só muito rígido, como também teria uma massa de aproximadamente 0.4 kg.

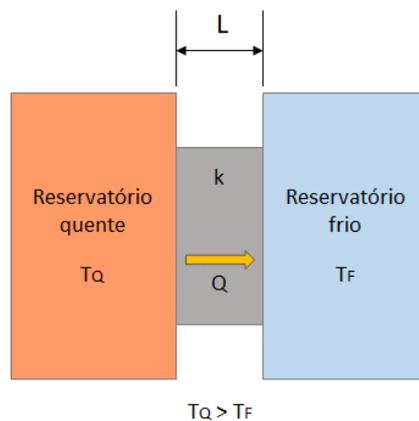


Figura 2.1 – Condução térmica num sólido. Adaptado de [2].

Convecção

A convecção é definida como a transferência macroscópica de calor que ocorre somente nos fluidos, sendo que estes podem ser líquidos ou gasosos, acompanhada pelo deslocamento das partículas desses mesmos fluidos de uma região quente e por isso menos densa, para uma região fria e mais densa (ou seja, ocorre o que se designa por correntes de convecção).

Existem dois tipos de convecção: natural ou forçada. À convecção natural associa-se a ocorrência de transporte de matéria devido às diferenças de densidade causadas pelas variações de temperatura no fluido. Este modo, apesar de simples e espontâneo, tem o inconveniente de funcionar apenas na presença de um campo gravítico, cuja sua eficácia depende de forças naturais. À convecção forçada associa-se o movimento do fluido a um estímulo externo (como

uma ventoinha, uma bomba, um circulador, etc...). Para além dos dois tipos de convecção descritos, é possível que haja processos de convecção onde ocorre a troca de calor latente devido a mudanças de fase do fluido do estado líquido para o estado gasoso e, vice-versa, tal como nos ciclos de evaporação-condensação. Nestes casos bifásicos, destaca-se que o transporte de calor (que envolve o calor latente) é mais eficaz que nos casos monofásicos (que envolve apenas o calor sensível do fluido).

De modo a demonstrar que a convecção é um processo de transferência de calor mais eficaz relativamente à condução, apresenta-se um cálculo simples para que haja um termo de comparação com os valores obtidos anteriormente com uma barra de alumínio. Assim, tendo em conta que o fluido a ser utilizado *a posteriori* pelo sistema será o azoto líquido (calor de vaporização igual a 161 J/cm³), para transportar 0.4 W seria necessário obter um caudal volúmico (\dot{V}) de valor igual a:

$$\dot{V} = \frac{0.4 \text{ W}}{161 \text{ J/cm}^3} \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (2.3)$$

Desta forma, é possível verificar que o valor obtido é relativamente baixo (2.5 mm³/s). Portanto, se este fluido passar num capilar de 1 mm de diâmetro terá uma velocidade de cerca de 3 mm/s equivalente a um número de Reynolds de aproximadamente 5, o que corresponde a um fluxo laminar que não causará quaisquer vibrações. Logo, este sistema seria muito mais flexível e eficiente comparado com o sistema descrito anteriormente. Além destas duas vantagens, o sistema poderia também funcionar como interruptor térmico. Isto é, com uma bomba a permitir a circulação do fluido é possível a transferência de um "espaço inquebrável", nas condições já mencionadas. Caso a circulação pare, o calor é unicamente transferido por condução através do azoto líquido (que se encontra estático) e da espessura de *inox* do capilar. Através dos cálculos demonstra-se que a uma diferença de 1 K corresponde uma potência de valor igual a 5×10^{-5} W. Assim, verifica-se que o sistema deixa passar 8000 vezes mais potência quando o fluido circula, o que vai de encontro com o princípio de funcionamento pretendido.

De seguida é apresentada uma breve explicação sobre o princípio de funcionamento de cada um dos sistemas referenciados na Introdução como uma das soluções ao principal problema existente na criogenia espacial. Igualmente, são expostos os diferentes tipos de micro-bombas e micro-válvulas existentes e utilizadas para a circulação de fluidos nesta área, bem como o trabalho anteriormente realizado na faculdade.

2.2. Sistemas de Convecção

Uma vez referido e demonstrado nas seções anteriores que o transporte de calor por condução térmica sobre grandes distâncias é um processo pouco eficaz, ocorre a necessidade de desenvolver sistemas que funcionem através do fenómeno de convecção, como por exemplo os PHP e os CLHP.

Pulsating Heat Pipes (PHP)

Os PHP, propostos por Akachi nos meados dos anos 90 [3], são formados por um tubo sinuoso com um determinado número de voltas em “U”, onde se encontra naturalmente distribuído o fluido de trabalho nos estados líquido e gasoso. Estes dispositivos podem ser de dois tipos: “*closed loop*” ou “*open loop*”, caso as extremidades do tubo se encontrem conectadas ou não entre si, respetivamente. O princípio de funcionamento deste sistema (Figura 2.2-a) baseia-se no transporte do fluido da extremidade quente (zona de aquecimento) para a extremidade fria (zona de arrefecimento) devido às oscilações espontâneas de pressão que ocorrem no interior do tubo, estando o movimento do fluido associado a um fenómeno de evaporação-condensação. Apesar de apresentarem um princípio relativamente simples e um baixo custo, os PHP possuem uma termodinâmica e uma descrição quantitativa do transporte (de calor e massa) muito complexa, dificultando o seu dimensionamento. Além disso, são sistemas pouco adaptáveis ao transporte de baixas potências.

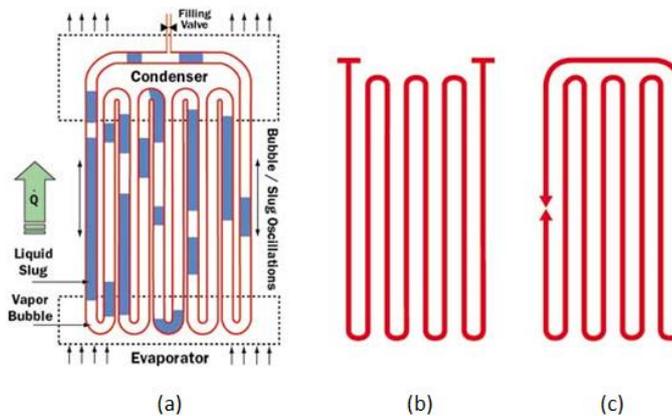


Figura 2.2 – Ilustração da circulação do fluido de trabalho num PHP em (a), tubo com “*open loop*” em (b) e tubo com “*closed loop*” em (c). Adaptado de [4].

Cryogenic Loop Heat Pipe (CLHP)

Nos CLHP a circulação do fluido ocorre devido às forças capilares da parte fria para a parte quente, onde a entalpia é removida pela evaporação de algum líquido [5]. Estes sistemas permitem o transporte de calor a grandes distâncias e possuem a capacidade de funcionar sem a presença de um campo gravítico, sendo por isso uma boa solução para as aplicações espaciais. Apesar destas vantagens, os CLHP são muito complexos e com vários componentes (dois evaporadores, dois condensadores, reservatórios e tubos). Na figura 2.3 encontra-se um esquema dos componentes e direção do movimento do fluido num CLHP.

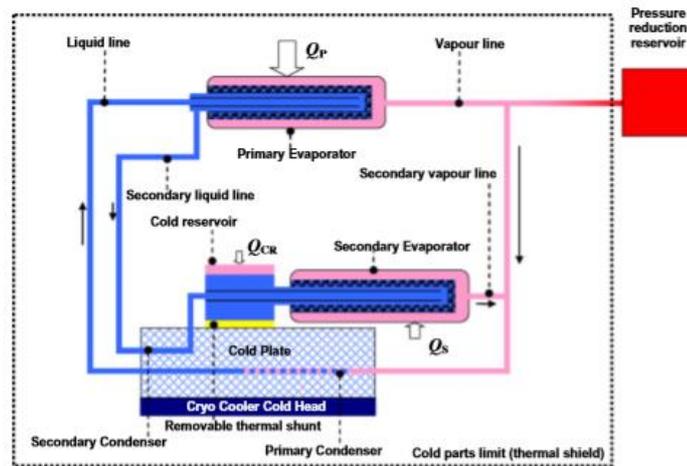


Figura 2.3 – Ilustração da circulação do fluido de trabalho num CLHP [5].

Posto isto, mantém-se a necessidade de estudar e abordar novos tipos de sistemas de arrefecimento com um tempo de vida muito longo e sem quaisquer partes móveis, nomeadamente, micro-bombas que proporcionem um elevado desempenho a baixas potências, especificamente na ordem dos 100 mW a 5 W.

2.3. Micro-bombas

Os sistemas descritos na secção anterior foram desenvolvidos com o objetivo específico de promover o transporte de calor. No entanto e paralelamente, foram desenvolvidas micro-bombas cuja aplicação tem sido cada vez maior nas áreas da biologia e eletrónica, nomeadamente, no desenvolvimento de mecanismos de bombeamento para manusear fluidos biológicos em sistemas *PCR* e *LoC* (do inglês, “*Polymerase Chain Reaction*” e “*Lab-on-Chip*”, respetivamente) e no arrefecimento de componentes eletrónicos através do deslocamento forçado de fluidos [1]. Por possuírem uma boa portabilidade devido às suas dimensões micrométricas e, assim ocuparem um menor espaço, estas bombas são vistas como uma solução possível para as aplicações espaciais [6], podendo ser igualmente utilizadas para a concretização do nosso objetivo.

Com base no esquema da figura 2.4, é possível dividir estes sistemas em duas grandes categorias: bombeamento por deslocamento e bombeamento dinâmico.

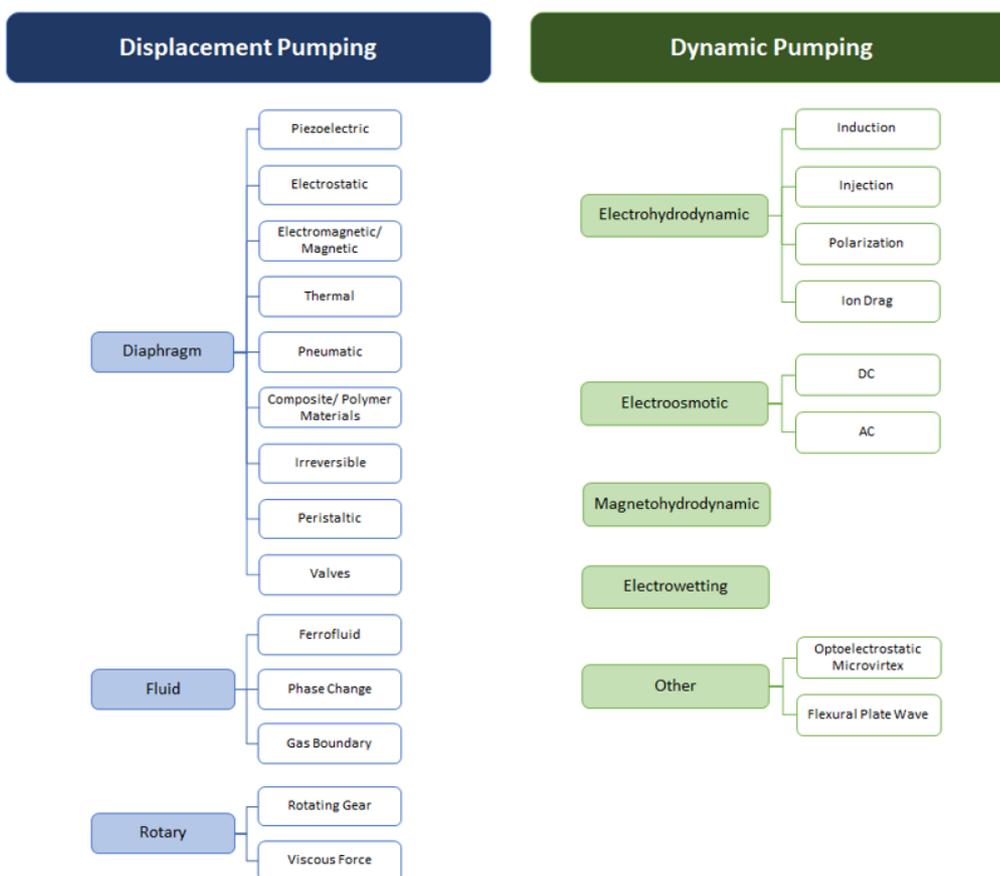


Figura 2.4 – Classificação das micro-bombas existentes na literatura. Adaptado de [7].

De seguida são apresentados alguns exemplos de bombas que pertencem a uma das duas categorias.

Bombeamento por Deslocamento

Nas bombas que funcionam por deslocamento é exercida uma pressão sobre o fluido de trabalho quando existe uma fronteira, que pode ser do tipo sólido-fluido ou fluido-fluido. Isto é, este tipo de bomba utiliza o movimento de um sólido (tal como um diafragma ou uma engrenagem) ou de um fluido para gerar a diferença de pressão necessária para mover o fluido de trabalho.

DIAFRAGMA

Este tipo de bomba é o mais comum e consiste no uso de uma peça de material flexível, cuja amplitude de deflexão está associada a um poder de bombeamento maior ou menor. Esta peça, designada por diafragma, pode ter diferentes mecanismos de atuação: piezoelétrico, eletrostático, magnético, térmico, entre outros. Na figura 2.5 observa-se o esquema típico de funcionamento deste tipo de bomba.

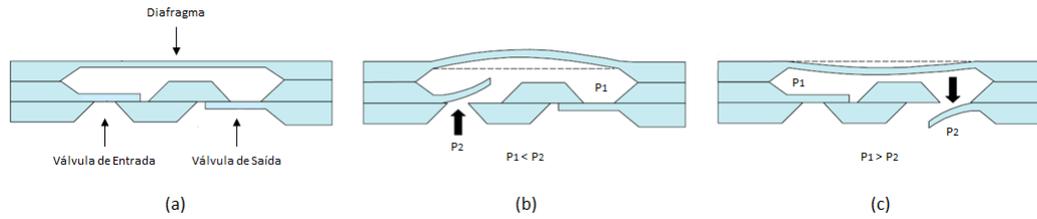


Figura 2.5 - Ilustração do funcionamento de uma micro-bomba de diafragma: ausência de deflexão do diafragma em (a), expansão da câmara em (b) e compressão da câmara em (c). Adaptado de [8].

Na figura é representado o sistema constituído pela câmara de bombeamento de diafragma, à qual estão conectadas as válvulas de entrada/saída necessárias para controlar o fluxo do fluido (Figura 2.5-a). Durante a expansão da câmara, a pressão no interior da mesma diminui. Assim, quando a pressão de entrada é superior à pressão interna, a válvula de entrada abre e o fluido entra na câmara (Figura 2.5-b). Durante a compressão, o volume da câmara diminui com o movimento do diafragma e, conseqüentemente, a pressão no seu interior aumenta, fazendo com que a válvula de saída abra e o fluido saia (Figura 2.5-c).

FLUIDO

Este tipo de bomba utiliza um segundo fluido, que pode estar no estado líquido ou gasoso, com a finalidade de provocar o movimento do fluido de trabalho. Os dois fluidos são obrigatoriamente imiscíveis, isto é, são fluidos que quando misturados formam camadas separadas. Quando é utilizado um líquido, este pode ser por exemplo um ferrofluido. Se for utilizado um gás, temos de ter em conta que ocorre uma mudança de fase do estado líquido para o estado gasoso através do uso de um aquecimento localizado. Assim, ocorrerá a formação de bolhas que após as suas deslocações e interrupção do aquecimento sofrem condensação [1]. Na figura 2.6 encontra-se um esquema que representa todo o processo.

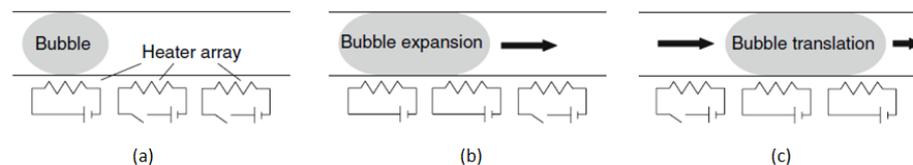


Figura 2.6 - Ilustração do funcionamento de uma micro-bomba de fluido: formação das bolhas em (a), deslocação das bolhas em (b) e condensação das bolhas em (c). Adaptado de [7].

Devido às características que o nosso sistema apresenta (ver secção 1), o mesmo pode ser inserido neste tipo de micro-bomba.

ROTATIVA

Este tipo de bomba pode ser de dois gêneros: “*rotative-gear*” ou “*viscous force*”. As “*rotative-gear*” (Figura 2.7) são mais tradicionais e o seu funcionamento consiste no uso de engrenagens dentadas que possuem um movimento rotatório gerado por um motor elétrico. Assim, o fluido que se encontra presente na câmara fica preso entre os dentes da engrenagem e é transportado do canal de entrada para o canal de saída. Nas “*viscous force*” (Figura 2.8) é utilizado um componente rotativo para gerar as forças viscosas que provocam o deslocamento do fluido da câmara.

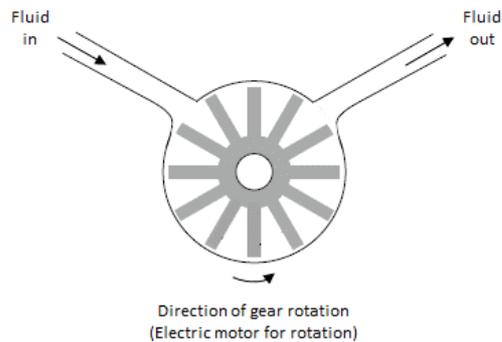


Figura 2.7 – Ilustração do funcionamento de uma micro-bomba “*rotative-gear*”. Adaptado de [7].

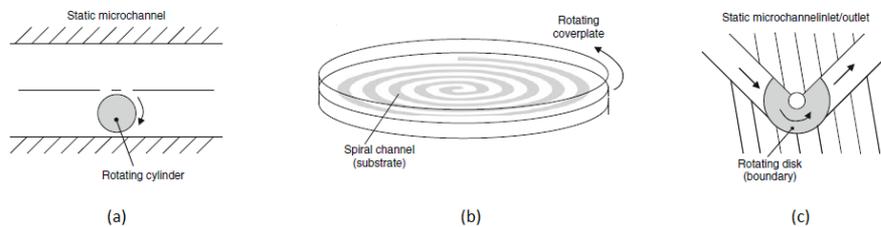


Figura 2.8 – Diferentes tipos de micro-bomba “*viscous force*”. Adaptado de [7].

Bombeamento Dinâmico

As bombas que funcionam por bombeamento dinâmico fornecem uma transferência direta de energia para o fluido de trabalho, permitindo que sejam gerados fluxos constantes.

ELETRO-HIDRODINÂMICA

O funcionamento deste tipo de bomba baseia-se no uso das forças eletrostáticas sobre os íões de um líquido dielétrico, de modo a provocar um fluxo no mesmo. Podem ser de três tipos, os quais diferem no método pelo qual as partículas carregadas são introduzidas no líquido [1]. Na figura 2.9 encontram-se representados os três tipos de micro-bombas eletro-hidrodinâmicas.

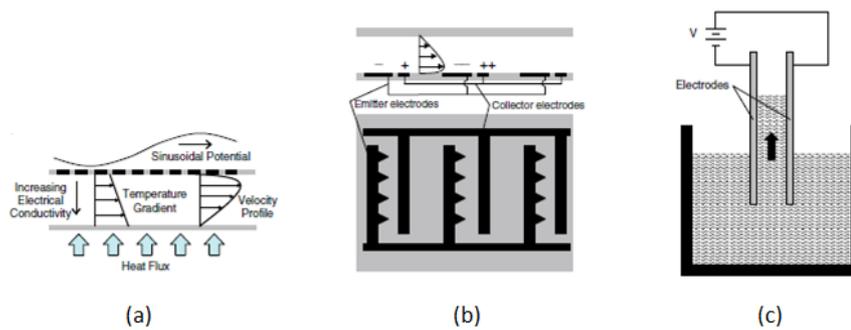


Figura 2.9 – Micro-bombas eletro-hidrodinâmicas do tipo indução em (a), injeção em (b) e polarização em (c). Adaptado de [7].

ELETRO-OSMÓTICA

Este tipo de bomba explora a carga superficial da dupla camada (*Electrical Double Layer – EDL*) estabelecida quando um líquido (eletrólito) entra em contato com um sólido (por exemplo, a parede de um canal) ou quando são colocados elétrodos nas extremidades de um sólido. Os íões carregados da *EDL* podem ser manipulados através de um campo elétrico *DC* ou *AC* [1].

MAGNETO-HIDRODINÂMICA

Neste tipo de bomba é explorada a força de Lorentz criada quando uma corrente elétrica circula perpendicularmente a um campo magnético. Isto é, um campo elétrico é gerado pelos elétrodos que se encontram nas paredes opostas do canal e o campo magnético é gerado através dos ímanes permanentes que se encontram nas restantes duas paredes, uma vez que é considerado um canal quadrangular ou retangular. Assim, o fluido experimenta uma força de Lorentz que atua ao longo do canal e induz um fluxo como ilustrado na figura 2.10. Note-se que este princípio é estudado atualmente para a propulsão de navios: neste caso o fluxo induzido no fluido (água do mar) será no sentido contrário ao qual se dá o deslocamento do navio [9].

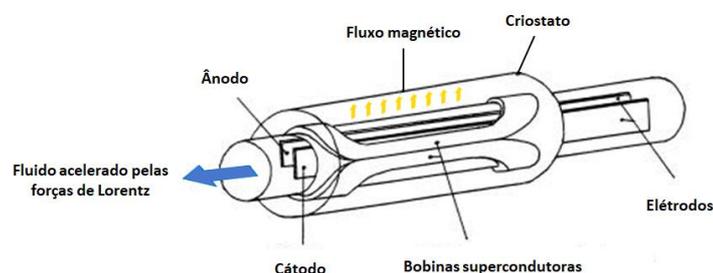


Figura 2.10 - Ilustração da direção do movimento induzido no fluido, através das forças de Lorentz resultantes da perpendicularidade entre um campo elétrico e um campo magnético. Adaptado de [10].

2.4. Micro-válvulas

As válvulas utilizadas em alguns dos sistemas de bombeamento descritos na secção anterior, são consideradas o componente essencial que permite o controlo do fluxo. Para uma melhor classificação das mesmas, encontra-se representado na figura 2.11 um esquema que permite dividi-las em duas principais categorias: ativas e passivas.

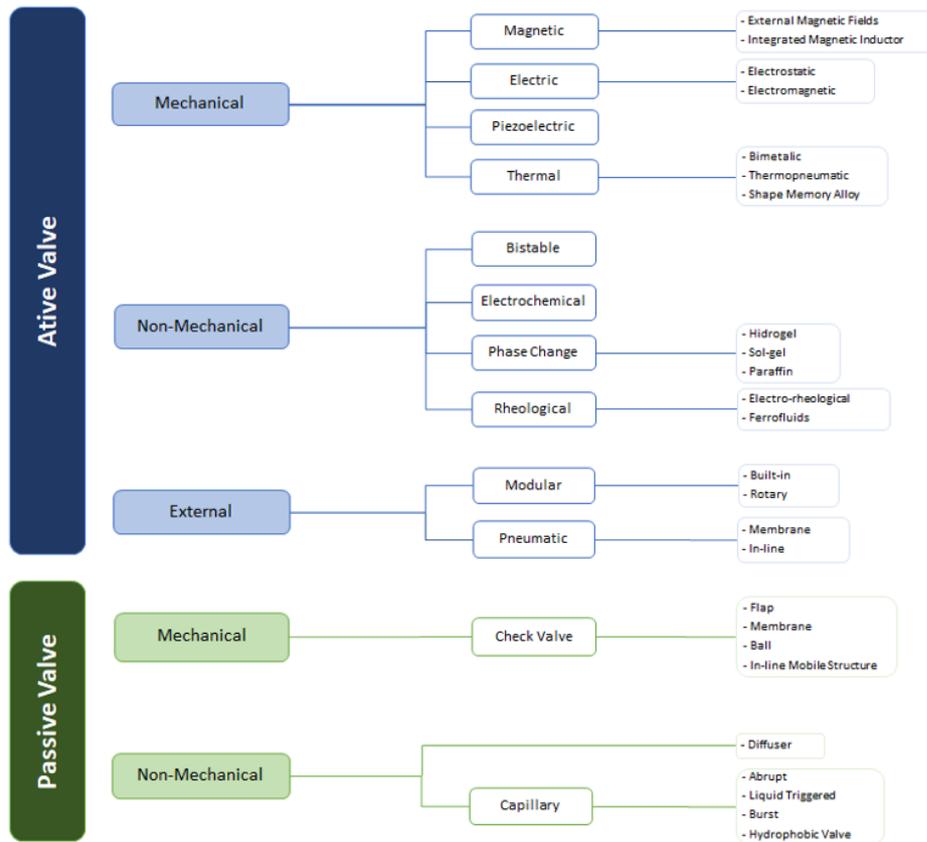


Figura 2.11 - Classificação das micro-válvulas existentes na literatura. Adaptado de [11].

Ativas

Em geral, as válvulas ativas possuem estruturas muito elaboradas e funcionam através do uso de um estímulo energético. Estas podem ser divididas em mecânicas, não-mecânicas e externas. Normalmente, estas válvulas são atuadores de bombas de diafragma (semelhante às válvulas dos motores térmicos) e funcionam de forma sincronizada com o mesmo [1]. Apesar de garantirem um grande desempenho da bomba à qual pertencem, a fabricação destas válvulas é bastante exigente devido à elevada complexidade das mesmas e, conseqüentemente, estão sujeitas facilmente a um grande desgaste.

Passivas

As válvulas passivas possuem estruturas simples e dispensam qualquer tipo de controle externo, funcionando apenas através da diferença de pressão. Estas podem ser divididas em mecânicas e não-mecânicas, sendo que as primeiras na maioria das vezes são incorporadas como peças móveis, na entrada e saída de sistemas de bombeamento por deslocamento.

Para a realização deste trabalho destaca-se um maior interesse pelas válvulas do tipo *Flap* (mecânicas) e do tipo *Tesla* (não-mecânicas).

VÁLVULAS FLAP

Este tipo de válvulas é constituído por uma espécie de aba flexível que permite a passagem do fluido apenas numa direção. Isto é, quando a pressão no sentido em montante da válvula é superior à do sentido em jusante, a válvula abre e deixa passar o fluido pelo canal (Figura 2.12-a). Contudo, se a pressão no sentido indireto for superior à do sentido direto, a válvula permanece fechada e impede a passagem do fluido (Figura 2.12-b).

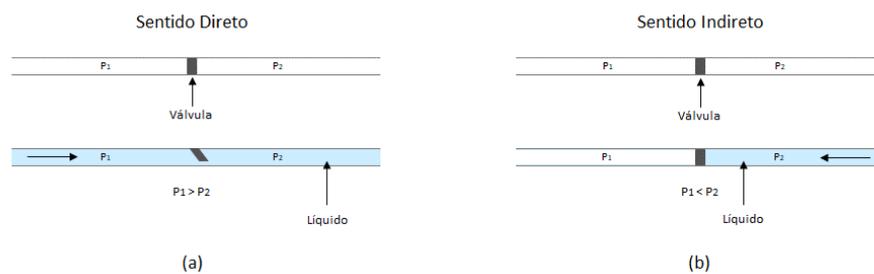


Figura 2.12 - Modos de operação de uma válvula do tipo *Flap*: sentido direto em (a) e sentido indireto em (b).

VÁLVULAS TESLA

Este tipo de válvulas, propostas em 1920 por Nikola Tesla [12], possui estruturas de canais bifurcados sem partes móveis que permitem maior facilidade na circulação do fluido na direção direta, apesar do mesmo poder circular em ambas as direções (direta e indireta) como é ilustrado na figura 2.13.

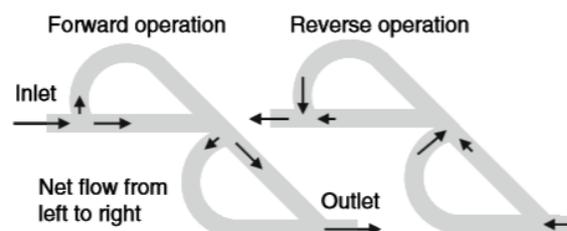


Figura 2.13 - Modos de operação de uma válvula do tipo *Tesla* [7].

O desempenho e eficácia destas válvulas depende de dois fatores: a geometria das próprias válvulas e o número de Reynolds do escoamento. O número de Reynolds (Re) descreve a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas num fluido e pode ser calculado através da seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu} \quad (2.4)$$

onde ρ representa a densidade do fluido, v a velocidade do fluxo do fluido, μ a viscosidade dinâmica do fluido e D_H o diâmetro hidráulico do canal (dimensão característica calculada geralmente como quatro vezes a área a dividir pelo perímetro). Assim, para um baixo número de Re o fluido é dominado pelas forças viscosas e o fluxo é laminar (Figura 2.14-a). Caso contrário, quando o número de Re é elevado, as forças inerciais são dominantes e o fluxo é turbulento (Figura 2.14-b). A transição entre os dois regimes ocorre para um número de Re de valor aproximadamente 2000.

Por sua vez, o desempenho destes dispositivos é quantificado através do cálculo da diodicidade (D_i), isto é, a razão entre a diferença de pressão no sentido indireto e no sentido direto para o mesmo caudal.

$$D_i = \left(\frac{\Delta P_{indireto}}{\Delta P_{direto}} \right)_{caudal} \quad (2.5)$$

Logo, verifica-se que para um valor elevado deste fator a válvula funciona corretamente, isto é, o fluido encontra maior resistência no sentido indireto promovendo a passagem de uma maior quantidade no sentido direto.

Comparativamente às válvulas descritas na subsecção anterior, as válvulas *Tesla* possuem uma maior simplicidade de fabrico e o seu funcionamento proporciona não só um menor consumo de energia, como também uma menor probabilidade de desgaste ou fadiga. Adicionalmente, apresentam geometrias que garantem versatilidade de bombeamento de fluidos carregados de partículas, uma vez que o risco de entupimento é igualmente menor. No entanto, um fluxo no sentido indireto é muito difícil de evitar.

É de salientar que neste trabalho apenas serão utilizadas este tipo de válvulas, visto que o princípio de funcionamento da micro-bomba pretendida foi testado e alcançado, ainda que de forma qualitativa, no trabalho realizado anteriormente através do uso de válvulas *Flap* [1]. Adicionalmente, não se justifica a utilização das válvulas anti-retorno devido à complexidade existente na sua construção e à intenção de desenvolver um novo tipo de dispositivo.

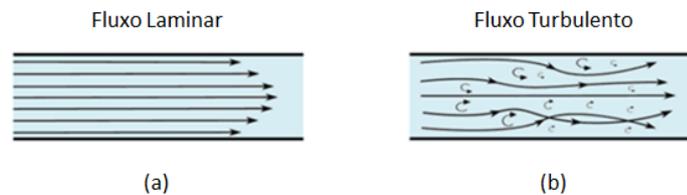


Figura 2.14 – Regimes de escoamento definidos pelo número de Reynolds. O fluxo laminar para $Re \ll 2000$ em (a) e o fluxo turbulento para $Re \gg 2000$ em (b). Adaptado de [13].

2.5. Projeto realizado anteriormente na FCT-UNL

O projeto realizado anteriormente baseou-se no desenvolvimento de um circulador equivalente ao que é descrito na Introdução. O trabalho executado teve como principal objetivo a aprovação do princípio de funcionamento sob o qual o circulador se baseia e dividiu-se em duas etapas: a construção de um sistema de maiores dimensões com válvulas do tipo *Flap* e a construção de um sistema de menores dimensões com válvulas do tipo *Tesla*.

Resumidamente, apresentam-se os dois sistemas:

1. Sistema de maiores dimensões (Válvulas *Flap*)

Este sistema é formado por uma câmara retangular (na qual se encontra o aquecimento) e um conjunto de válvulas localizadas à entrada e saída da mesma. Tendo em conta o material disponível em laboratório, o aquecimento escolhido e utilizado trata-se de um conjunto em série de dez resistências de eletrónica e para a fabricação do sistema e das válvulas *Flap* recorreu-se ao uso de um tipo de acrílico transparente (*plexiglass*) e de uma folha de *inox* com uma espessura de 50 μm , respetivamente. A gravação do sistema na placa de *plexiglass* efetuou-se com o auxílio da máquina *CNC* (do inglês, “*Computer Numerical Control*”) do departamento de Física da faculdade. O esquema do sistema e a placa de *plexiglass* produzida e, posteriormente utilizada nos testes, encontram-se representados na figura 2.15.

2. Sistema de menores dimensões (Válvulas *Tesla*)

Este sistema é formado por uma câmara circular (na qual se encontra o aquecimento) e um conjunto de válvulas, que funcionam como microcanais, à entrada e saída da mesma. Tendo em conta a facilidade e a rapidez de implementação, o aquecimento escolhido e utilizado consiste num enrolamento de fio constantan. Para a fabricação do sistema recorreu-se ao uso das técnicas de microfluídica com dois materiais: o fotore-siste *SU-8* e o *PDMS*. Todo o processo de gravação do sistema efetuou-se nos laboratórios dos centros de investigação (*CENIMAT* e *CEMOP*) da faculdade. O esquema dos sistemas (*TV1-CAM* e *TV3-CAM*) e um dos *chips* finais produzido e, posteriormente utilizado nos testes, encontram-se representados na figura 2.16.

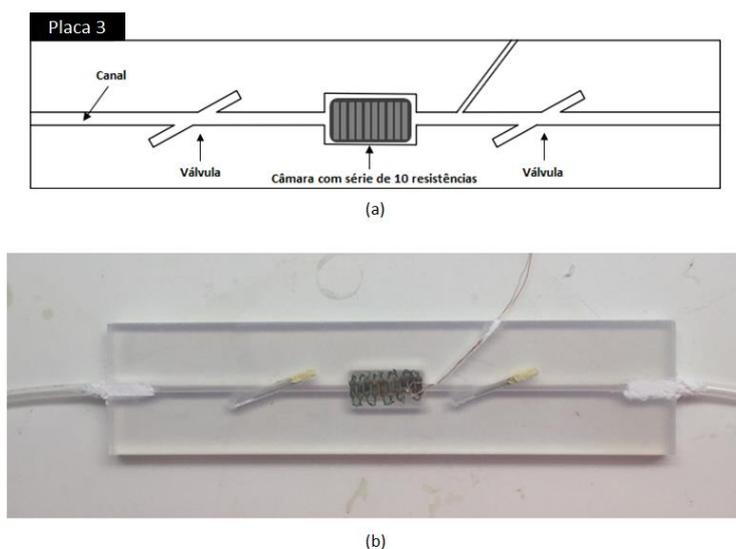


Figura 2.15 - Esquema do sistema de maiores dimensões com válvulas *Flap* em (a) e placa final de *plexiglass* produzida para testar o princípio de funcionamento do circulador proposto em (b). Adaptado de [1].

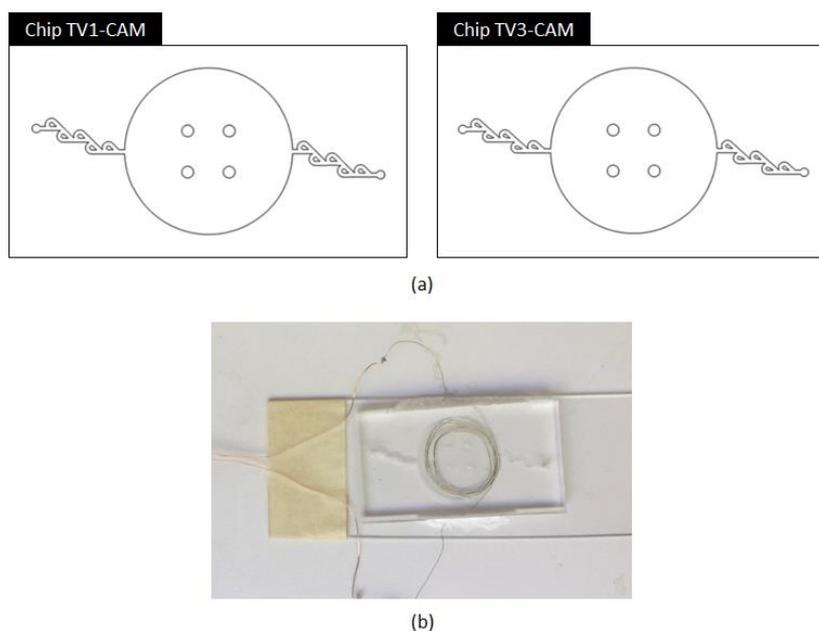


Figura 2.16 - Esquema dos dois sistemas (TV1-CAM e TV3-CAM) de menores dimensões com válvulas *Tesla* em (a) e um dos *chips* finais em PDMS produzido para testar o princípio de funcionamento do circulador proposto em (b). Adaptado de [1].

Relativamente aos resultados obtidos, verificou-se que tanto no sistema com as válvulas *Flap* como no sistema com as válvulas *Tesla*, o princípio de funcionamento foi alcançado de forma qualitativa. Contudo, a presença de alguns problemas como a existência de um refluxo e

a escolha e dimensionamento do aquecimento para cada um dos sistemas, levaram a que ambos ficassem muito aquém do que foi inicialmente desejado, sendo necessário uma melhoria dos mesmos com destaque para o sistema de menores dimensões que é abordado neste trabalho.

Sistema de Aquisição

3.1. Pressão

Tendo em conta a necessidade de efetuar uma caracterização quantitativa do sistema válvula-câmara-válvula (VCV), sobretudo no que diz respeito à característica Pressão-Caudal de uma válvula, é fundamental que se consiga ter uma ideia dos valores de pressão alcançados no interior da câmara de trabalho durante os ciclos de evaporação-condensação. Como tal, recorreu-se ao uso de um sensor diferencial de pressão (Figura 3.1). O sensor MPX5100DP (ver Anexo A) é um transdutor piezoresistivo, cujo sinal de saída analógico é proporcional à diferença de pressão aplicada entre as duas entradas, com valores a pertencerem ao intervalo de pressão de 0 kPa a 400 kPa, ao qual corresponde um sinal de tensão máximo de 5 V.



Figura 3.1 - Sensor diferencial de pressão MPX5100DP.

O sensor é conectado a uma placa com o microcontrolador Arduino Uno. Esta placa é programada de forma a que o valor lido pelo sensor (com valores de 0 bits a 1023 bits) seja convertido, através de uma reta de calibração, para valores de pressão. Para a calibração do sensor desenvolveu-se a montagem experimental da figura 3.2. Esta é constituída por um tubo colocado verticalmente na parede (“Tubo-parede”) cuja sua extremidade inferior se encontra conectada através de um “T” ao sensor de pressão e a um tubo de saída com uma válvula que

permite controlar a circulação do fluido. A diferença de pressão (que corresponde à diferença de pressão imposta pela altura da coluna do fluido no tubo vertical com a pressão atmosférica) é calculada através da seguinte equação:

$$\Delta P = \rho g \Delta h \quad (3.1)$$

onde ρ representa a densidade do fluido (no nosso caso água), g a aceleração gravítica e Δh a altura da coluna do fluido no tubo.

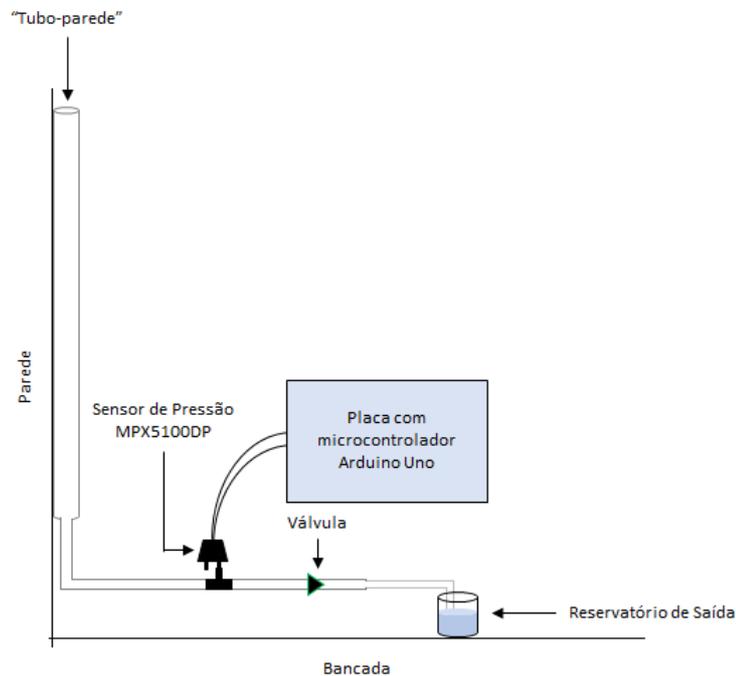


Figura 3.2 – Esquema da montagem experimental desenvolvida para realizar a calibração do sensor de pressão MPX5100DP.

Como procedimento, inicialmente, é necessário encher o tubo vertical com água. De seguida, intercalando a abertura/fecho da válvula, faz-se variar a altura da coluna de água e a cada uma destas faz-se corresponder um valor em bits lido pelo sensor e um valor de diferença de pressão (calculado através da equação 3.1).

Assim, obteve-se o gráfico da figura 3.3 e a equação da reta de calibração para o sensor de pressão MPX5100DP (Equação 3.2):

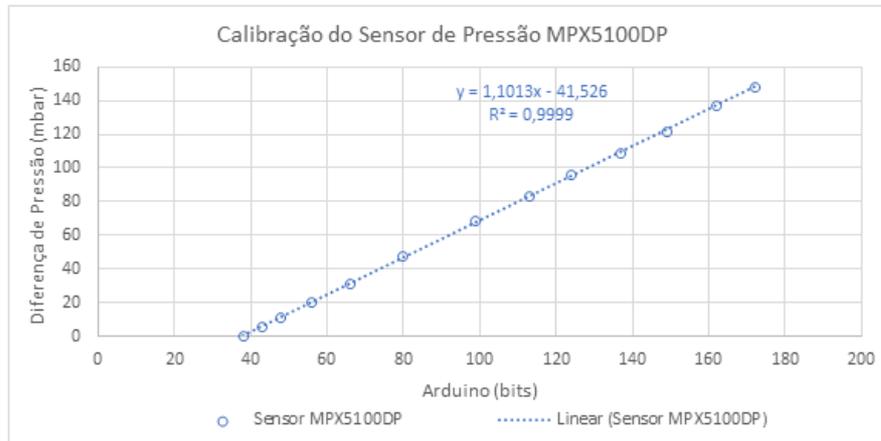


Figura 3.3 – Gráfico da diferença de pressão em função do valor de bits, através do qual se obteve a reta de calibração para o sensor de pressão MPX5100DP.

$$\Delta P_{\text{Sensor de Pressão MPX5100DP}} = 1.1013 (\text{Valor em bits}) - 41.526 \quad (3.2)$$

3.2. Nível de Água

Para além da medida de pressão, é igualmente importante realizar o monitoramento do nível de água num reservatório (gobelé) de modo a que, posteriormente, seja possível quantificar a massa de água transferida através do sistema VCV. Como tal, recorreu-se ao uso de um sensor de nível. Este tipo de sensor pode ser resistivo, capacitivo ou ultrassónico e, em termos práticos, é frequentemente utilizado para efetuar a medição do nível de líquidos em reservatórios para a indústria de transformação, realizar o monitoramento da altura de água em barragens de centrais hidroelétricas e em rios ou lagos a fim de prevenir enchentes e/ou outros desastres ambientais, entre outras aplicações [14]. Devido à diversidade existente deste género de sensores e com o objetivo de ter um sistema de pequenas dimensões, neste projeto optou-se por realizar os testes com apenas dois deles: o sensor de nível de água (Figura 3.4-a) e o sensor de humidade de solo em (Figura 3.4-b) (ver Anexo B).

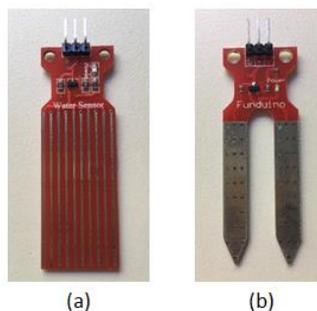


Figura 3.4 – Sensores de nível utilizados nos testes: sensor de nível de água em (a) e sensor de humidade de solo em (b).

Sensor de Nível de Água

O sensor de nível de água (Figura 3.4-a) é um sensor analógico constituído por um conjunto de dez pistas condutoras (elétrodos) com um comprimento de 40 mm cada. O funcionamento deste aparelho baseia-se na medição da variação da resistência entre os elétrodos quando ocorre uma variação da altura da interface entre o fluido (no nosso caso água) e o ar, isto é, uma variação do comprimento dos elétrodos que se encontram submersos na água.

Tal como o sensor de pressão (ver subsecção 3.1), o sensor resistivo é conectado à placa com o microcontrolador Arduino Uno e, de modo a verificar o seu funcionamento, desenvolveu-se a montagem experimental da figura 3.5. Esta é constituída por dois reservatórios (gobelés): o reservatório 1 possui no seu interior o sensor, contrariamente ao reservatório 2 que se encontra “livre”. Estes estão conectados entre si por um tubo (“Tubo vaso comunicante”) através do qual se efetua a transferência de água com base no processo de vasos comunicantes.

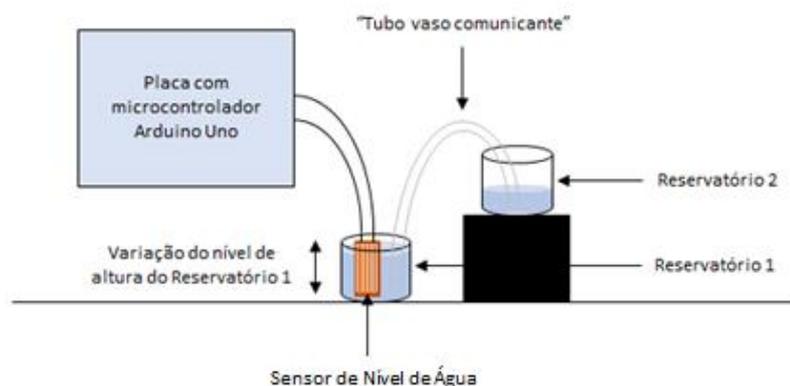


Figura 3.5 – Esquema da primeira montagem experimental desenvolvida para verificar o modo de funcionamento do sensor de nível de água.

Como procedimento, inicialmente, é necessário encher o reservatório 1 com água até que as pistas do sensor se encontrem completamente submersas (note-se que os dois reservatórios se encontram a níveis de altura diferentes). De seguida, faz-se variar o nível de altura deste reservatório para que o mesmo permaneça num nível superior ao do reservatório 2 e, assim, a água presente no primeiro é transferida gradualmente para o segundo. Por conseguinte, quando as pistas condutoras se encontram descobertas, coloca-se o reservatório 1 no nível correspondente à sua posição inicial. Desta forma, a água é transferida gradualmente do reservatório 2 para o reservatório 1, que no final possui o sensor novamente submerso.

Assim, obteve-se o gráfico da figura 3.6:

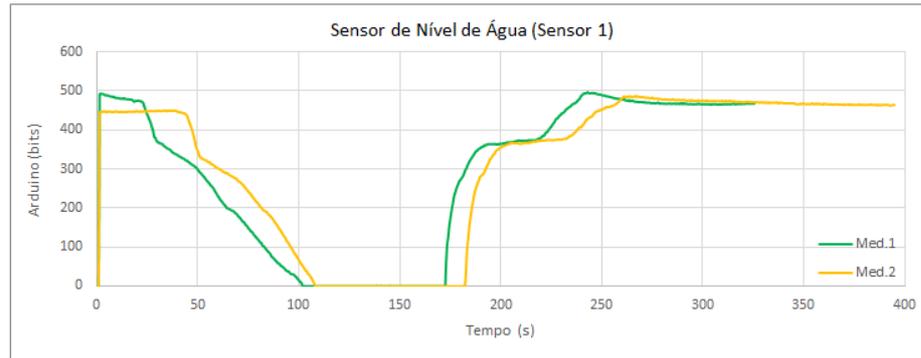


Figura 3.6 – Leitura do sensor de nível de água (Sensor 1) com base na montagem experimental da figura 3.5. São apresentados os resultados de duas medidas independentes.

A análise destes resultados pode ser dividida em duas zonas: zona 1 (intervalo de tempo de 0 s a 100 s) e zona 2 (intervalo de tempo de 150 s a 300 s). A zona 1 corresponde ao esvaziamento do reservatório 1 até que o sensor fique completamente descoberto e a zona 2 corresponde ao enchimento do mesmo reservatório até que o sensor fique novamente submerso. Relativamente à zona 1, verifica-se que nos primeiros 50 s os valores absolutos iniciais em bits de ambas as medidas não coincidem, demonstrando que este sensor possui uma má reprodutibilidade e, portanto, impossibilita-nos de obter medidas quantitativas. Neste mesmo intervalo de tempo ocorre uma descida repentina no número de bits (intervalo de 350 bits a 450 bits) que não coincide com o que se observa visualmente – descida progressiva do nível de água – durante o esvaziamento do reservatório 1. Relativamente à zona 2, ocorre uma subida repentina no número de bits (intervalo de 0 bits a 400 bits) que não coincide com o que se observa visualmente – subida progressiva do nível de água – durante o enchimento do reservatório 1.

Repetiu-se o teste anterior para um novo sensor deste tipo (Sensor 2) e obteve-se o gráfico da figura 3.7:

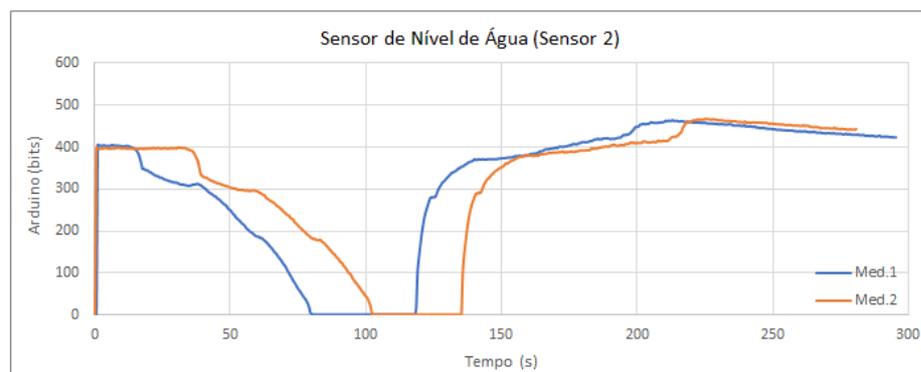


Figura 3.7 – Leitura do sensor de nível de água (Sensor 2) com base na montagem experimental da figura 3.5. São apresentados os resultados de duas medidas independentes.

Tal como no gráfico da figura 3.6, a análise destes resultados (Figura 3.7) pode ser dividida em duas zonas: zona 1 (intervalo de tempo de 0 s a 100 s) e zona 2 (intervalo de tempo de 100 s a 250 s). Ambas as zonas correspondem, respetivamente, à ação descrita anteriormente. Comparativamente ao Sensor 1, verifica-se que nos primeiros 50 s os valores absolutos iniciais em bits de ambas as medidas do Sensor 2 coincidem. Porém, não é possível afirmar que este sensor funciona de forma satisfatória, uma vez que ocorre igualmente uma descida (intervalo de 300 bits a 400 bits) e uma subida (intervalo de 0 bits a 400 bits) repentina do número de bits que não coincide com o que se observa visualmente – descida e subida progressiva do nível de água – durante o esvaziamento e o enchimento do reservatório 1, respetivamente.

Desta forma, na tentativa de alcançar medidas mais precisas e, assim, realizar a calibração do sensor, desenvolveu-se uma segunda montagem experimental (Figura 3.8). Esta é constituída por um suporte fixo com um “braço” amovível verticalmente, no qual se encontra afixado o sensor (Sensor 3) que é, posteriormente, submerso num reservatório (gobelé) com água até ao limite das suas pistas.

Como procedimento, inicialmente, é necessário encher o reservatório com água. De seguida, o sensor é submerso gradualmente na água a cada 10 mm do comprimento das pistas condutoras. Assim que estas se encontrem totalmente cobertas, inicia-se a ação contrária. Isto é, a cada 10 mm do comprimento das pistas, o sensor é retirado da água até que se encontre completamente descoberto.

Assim, obteve-se o gráfico da figura 3.9, cujos valores foram comparados com os valores do teste encontrado na literatura [15] e apresentados no gráfico da figura 3.10.

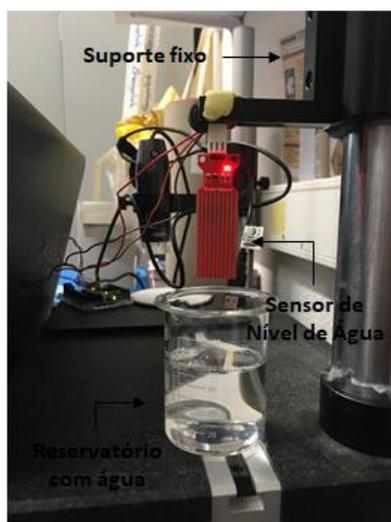


Figura 3.8 - Segunda montagem experimental desenvolvida para verificar o modo de funcionamento do sensor de nível de água (Sensor 3) e tentar realizar a sua calibração.

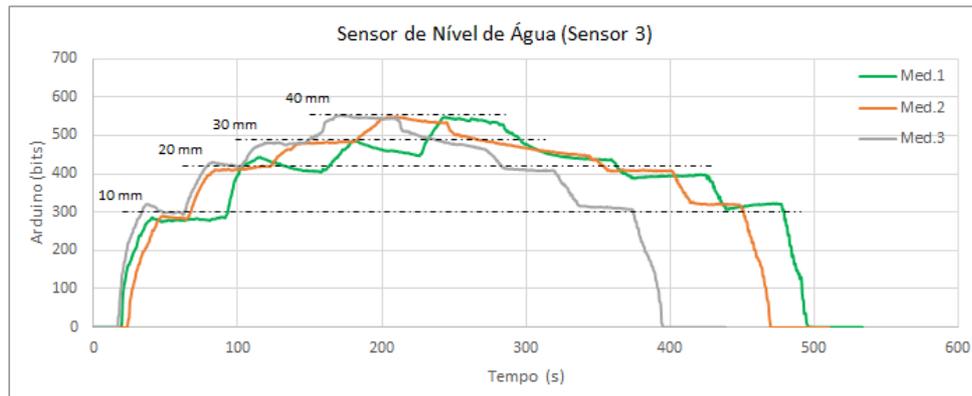


Figura 3.9 – Leitura do sensor de nível de água (Sensor 3) com base na montagem experimental da figura 3.8. São apresentados os resultados de três medidas independentes.

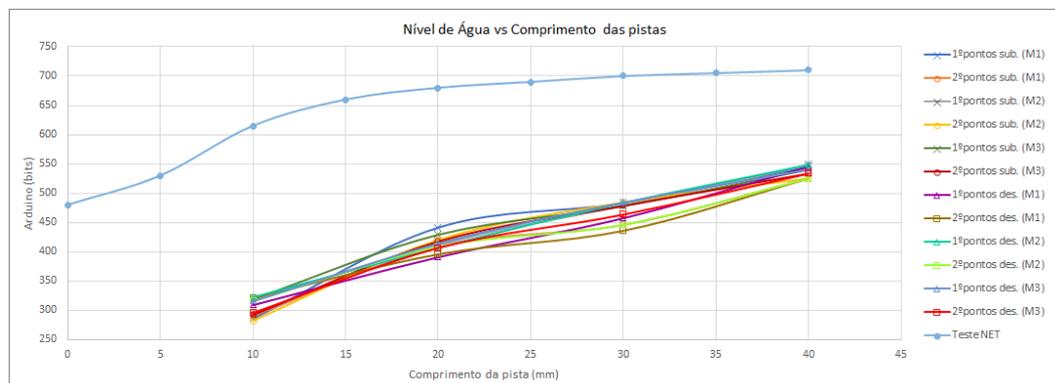


Figura 3.10 – Comparação dos valores obtidos por nós com os valores do teste encontrado na literatura.

Através do gráfico da figura 3.9, verifica-se que nas três medidas independentes e a cada 10 mm do comprimento das pistas condutoras, os valores absolutos em bits durante a descida (intervalo de tempo de 0 s a 250 s) e a subida (intervalo de tempo de 250 s a 500 s) do sensor não coincidem. No intervalo de comprimento de 0 mm a 10 mm ocorre uma variação de cerca de 30 bits/mm, enquanto no intervalo de comprimento de 10 mm a 40 mm apenas ocorre uma variação de cerca de 10 bits/mm. Assim, verifica-se a não linearidade do número de bits relativamente ao comprimento das pistas, quando o sensor se encontra supostamente estável em cada um dos níveis definidos, demonstrando que o mesmo possui uma má reprodutibilidade e, portanto, impossibilita-nos de obter as medidas precisas desejadas. Através do gráfico da figura 3.10, verifica-se que os valores obtidos por nós se distanciam e muito dos valores do teste encontrado na literatura.

Com estes resultados, colocou-se em causa a existência de impurezas nas pistas condutoras que pudessem influenciar as medidas. Como tal, procedeu-se à limpeza das mesmas com um produto próprio para metais, repetiu-se o teste anterior e obteve-se os gráficos das figuras 3.11 e 3.12:

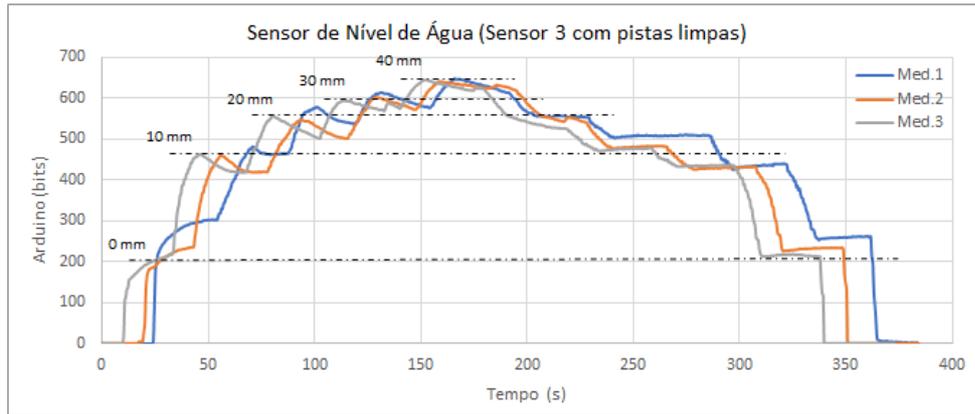


Figura 3.11 – Leitura do Sensor 3 (após a limpeza das pistas condutoras) com base na montagem experimental da figura 3.8. São apresentados os resultados de três medidas independentes.

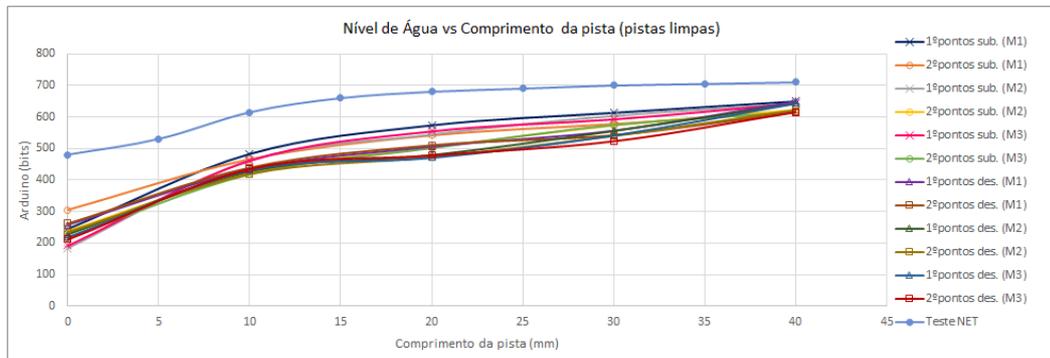


Figura 3.12 – Comparação dos valores obtidos por nós (após a limpeza das pistas condutoras) com os valores do teste encontrado na literatura.

À semelhança dos resultados obtidos anteriormente, através do gráfico da figura 3.11, verifica-se que nas três medidas independentes e a cada 10 mm do comprimento das pistas condutoras, os valores absolutos em bits continuam a não coincidir. Da mesma forma, as variações de bits/mm permanecem diferentes, sendo que no intervalo de comprimento de 0 mm a 10 mm ocorre uma variação de cerca de 25 bits/mm, enquanto no intervalo de comprimento de 10 mm a 40 mm apenas ocorre uma variação de cerca de 5 bits/mm. Verifica-se, igualmente, a não linearidade do número de bits relativamente ao comprimento das pistas, quando o sensor se encontra supostamente estável em cada um dos níveis. Através do gráfico da figura 3.12, verifica-se que os valores obtidos por nós se aproximam dos valores do teste encontrado na literatura, porém continuam a não ser coincidentes. Assim, optou-se por não usar este tipo de sensor e recorreu-se ao uso de um sensor de humidade de solo.

Sensor de Humidade de Solo

O sensor de humidade de solo (Figura 3.4-b) é um sensor analógico, cujo seu funcionamento é equivalente ao do sensor de nível de água (ver subsecção 3.2.1) e cuja sua aplicação no ramo da agricultura tem vindo a crescer nos últimos anos, uma vez que em termos práticos este sensor mede a quantidade de água presente no solo, permitindo o controlo e o auxílio na previsibilidade da sua produção [16].

A fim de substituir o sensor resistivo, verificou-se o modo de funcionamento do sensor de humidade com base na montagem experimental da figura 3.8. Logo, à semelhança do teste anterior, o sensor de humidade é submerso e, posteriormente, retirado da água de forma gradual tendo em conta cinco níveis de altura das pistas condutoras. Assim, obteve-se o gráfico da figura 3.13:

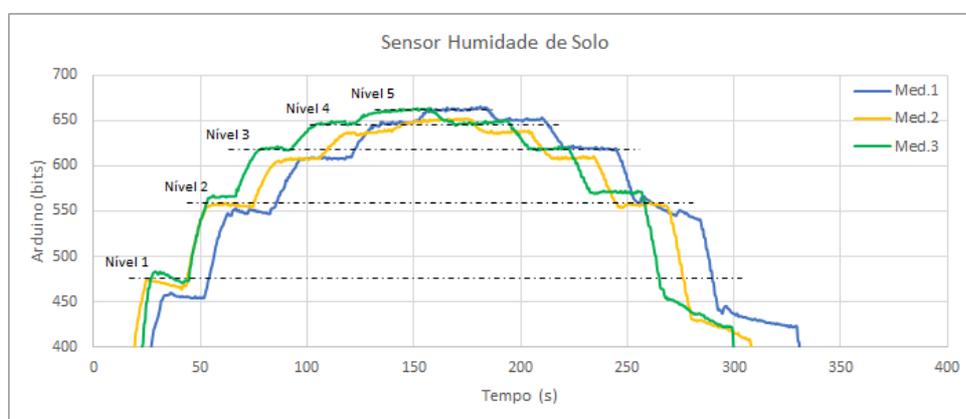


Figura 3.13 – Leitura do sensor de humidade de solo com base na montagem experimental da figura 3.8. São apresentados os resultados de três medidas independentes.

Através do gráfico da figura 3.13, verifica-se uma maior estabilidade, uma vez que nas três medidas independentes e a cada um dos níveis do comprimento das pistas, os valores absolutos em bits durante a descida (intervalo de tempo de 0 s a 150 s) e a subida (intervalo de tempo de 150 s a 350 s) do sensor são mais coincidentes. Contudo, tal como nos testes referentes ao sensor de nível de água, verifica-se a não linearidade do número de bits relativamente ao comprimento das pistas, quando o sensor se encontra supostamente estável em cada um dos níveis definidos, demonstrando que também este possui uma má reprodutibilidade e, portanto, impossibilita-nos de obter as medidas precisas desejadas. Assim, optou-se por não usar este tipo de sensor.

Sensor de Pressão

Uma vez excluído o uso dos sensores de nível, recorreu-se ao uso de um sensor diferencial de pressão equivalente ao descrito anteriormente, mas com uma maior sensibilidade (Figura 3.14). O sensor MPXV5004DP (ver Anexo C) é um transdutor piezoresistivo, cujo sinal de saída analógico é proporcional à diferença de pressão aplicada entre as duas entradas, com valores a

pertenceram ao intervalo de pressão de 0 kPa a 16 kPa, ao qual corresponde um sinal de tensão máximo de 5 V.



Figura 3.14 – Sensor diferencial de pressão MPXV5004DP (utilizado como sensor de nível).

O sensor MPXV5004DP é conectado à placa com o microcontrolador Arduino Uno, através da qual o valor lido por este (com valores de 0 bits a 1023 bits) é convertido para valores de pressão. Desta forma, realizou-se a calibração do sensor com base numa montagem experimental equivalente à da figura 3.2.

Assim, obteve-se o gráfico da figura 3.15 e a equação da reta de calibração para o sensor de pressão MPXV5004DP (Equação 3.3):

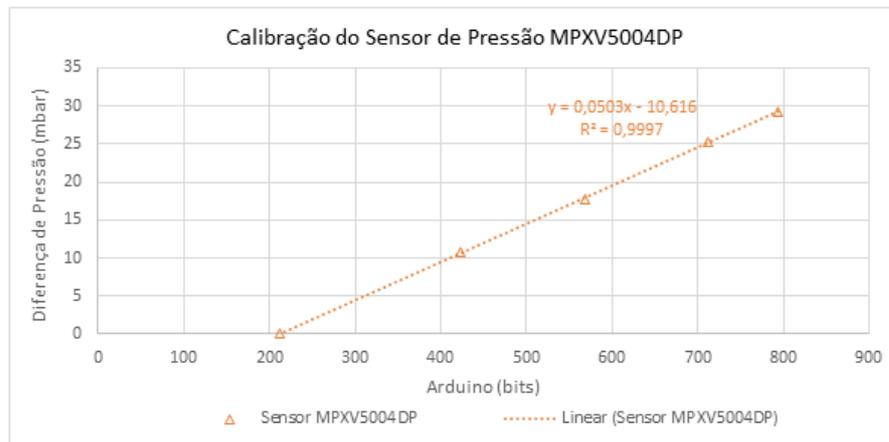


Figura 3.15 - Gráfico da diferença de pressão em função do valor de bits, através do qual se obteve a reta de calibração para o sensor de pressão MPXV5004DP.

$$\Delta P_{\text{Sensor de Pressão MPXV5400DP}} = 0.0503 (\text{Valor em bits}) - 10.616 \quad (3.3)$$

Uma vez efetuada a calibração do sensor, é importante compreender o modo de funcionamento deste como medidor de nível. Com base no esquema da figura 3.16, observa-se que o

sensor possui uma das entradas (responsável pela leitura dos valores de pressão) conectada a uma das extremidades de um tubo (no nosso caso utilizou-se um tubo metálico). A extremidade oposta do tubo encontra-se submersa num reservatório (gobelé) com água, de modo a que seja possível manter um volume de ar preso no interior do tubo. Ora, segundo esta configuração, a pressão lida pelo sensor (P_{Sensor}) corresponde à pressão exercida sobre esse volume de ar que, por sua vez, é calculada através da seguinte equação:

$$P_{\text{Sensor}} - P_{\text{atm}} = \rho g \Delta h_{\text{tubo}} \quad (3.4)$$

onde P_{atm} representa a pressão atmosférica, ρ a densidade do fluido (água), g a aceleração gravítica e Δh_{tubo} o comprimento do tubo que se encontra submerso.

Então, tendo em conta a equação da reta de calibração (Equação 3.3), temos que:

$$P_{\text{Sensor}} - P_{\text{atm}} = \alpha (\text{Valor em bits}) - \beta \quad (3.5)$$

E, portanto:

$$\rho g \Delta h_{\text{tubo}} = \alpha (\text{Valor em bits}) - \beta \quad (3.6)$$

Logo:

$$\Delta h_{\text{tubo}} = 0.0503 (\text{Valor em bits}) - 10.616 \quad (3.7)$$

Neste sentido, uma variação de pressão corresponde a uma variação do comprimento do tubo que se encontra submerso na água que, por sua vez, corresponde a uma variação do nível de água no reservatório.

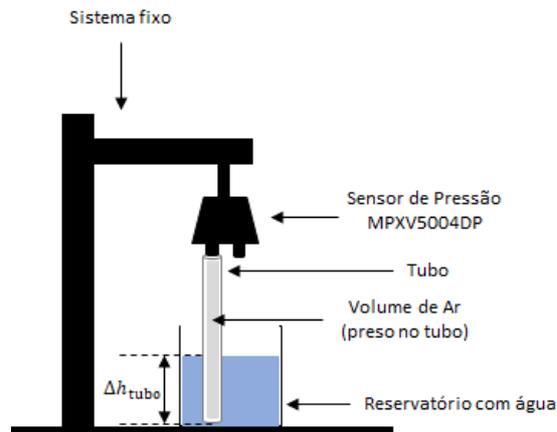


Figura 3.16 – Esquema da montagem experimental através da qual o sensor de pressão MPXV5004DP funciona como medidor de nível.

De modo a verificar o princípio de funcionamento do sensor como medidor de nível, desenvolveu-se a montagem experimental da figura 3.17. Esta é constituída por um suporte fixo, no qual se encontra afixado o conjunto sensor-tubo e dois reservatórios (gobelés) com água. Estes estão conectados entre si por um tubo (“Tubo vaso-comunicante”) através do qual se efetua a transferência de água com base no processo de vasos comunicantes.

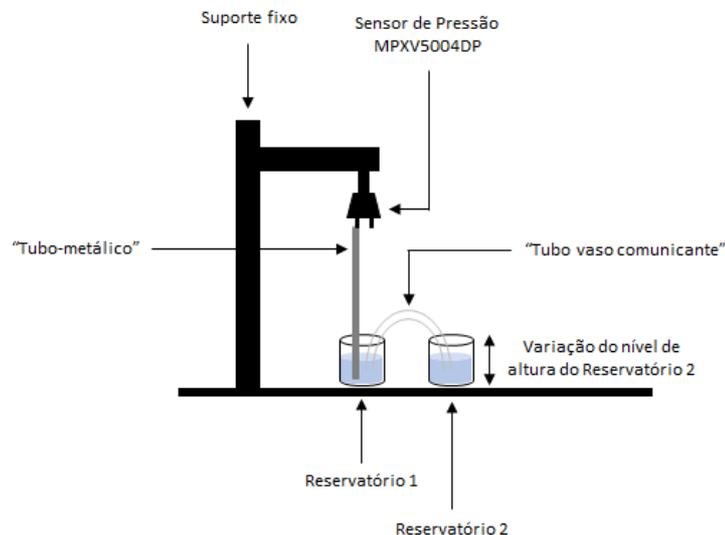


Figura 3.17 – Esquema da montagem experimental desenvolvida para verificar o princípio de funcionamento do sensor de pressão MPXV5004DP como medidor de nível.

Como procedimento, inicialmente, é necessário encher os reservatórios com água até que estes tenham uma quantidade de fluido igual (note-se que os dois reservatórios se encontram ao mesmo nível de altura). De seguida, faz-se variar o nível de altura do reservatório 2 para que o mesmo permaneça num nível superior ao do reservatório 1 e, assim, uma pequena quantidade

de água é transferida gradualmente para este último. Desta forma, o reservatório 1 apresenta um aumento do nível de água equivalente a metade da altura a que o reservatório 2 é colocado (segundo a conservação da massa). Por conseguinte, o reservatório 2 apresenta uma redução do nível de água equivalente a metade da altura a que o mesmo é colocado. Posteriormente, coloca-se o reservatório 2 no nível correspondente à sua posição inicial e, assim, a pequena quantidade de água transferida anteriormente é transferida gradualmente do reservatório 1 para o reservatório 2, fazendo com que ambos fiquem novamente com uma quantidade de água igual.

Assim, obteve-se o gráfico da figura 3.18:

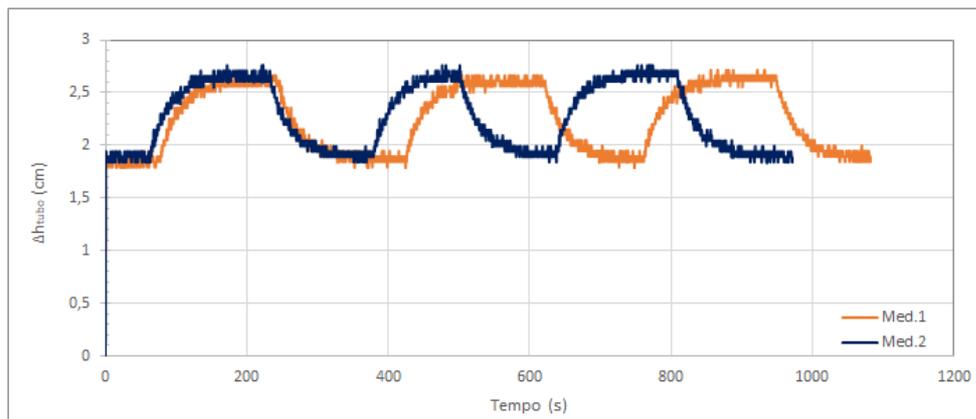


Figura 3.18 – Leitura do sensor de pressão MPXV5004DP com base na montagem experimental da figura 3.17. São apresentados os resultados de duas medidas independentes.

Através do gráfico da figura 3.18, verifica-se que após o enchimento dos reservatórios com água e antes de se iniciar o procedimento descrito anteriormente, o tubo conectado ao sensor possui cerca de 20 mm do seu comprimento submerso na água. Posteriormente, tendo em conta que o reservatório 2 sofre uma variação de altura de aproximadamente 16 mm e, conseqüentemente, ocorre um aumento do nível de água no reservatório 1 equivalente a metade da altura a que o reservatório 2 é colocado (ou seja, de aproximadamente 8 mm), verifica-se que o tubo possui cerca de 28 mm do seu comprimento submerso na água, isto é, cerca de 8 mm a mais do que possuía inicialmente. Entretanto, quando o reservatório 2 é colocado no nível correspondente à sua posição inicial, a pequena quantidade de água é transferida gradualmente do reservatório 1 para o reservatório 2 e, assim, o tubo possui novamente cerca de 20 mm do seu comprimento submerso na água. Com estes resultados, é possível afirmar que o princípio de funcionamento do sensor como medidor de nível foi alcançado, uma vez que nas duas medidas independentes é demonstrado que o mesmo possui uma boa e constante reprodutibilidade.

Repetiu-se o teste anterior, desta vez tendo em conta que o reservatório 2 sofre uma variação de altura máxima de aproximadamente 48 mm, para reafirmar a reprodutibilidade do sensor e obteve-se o gráfico da figura 3.19:

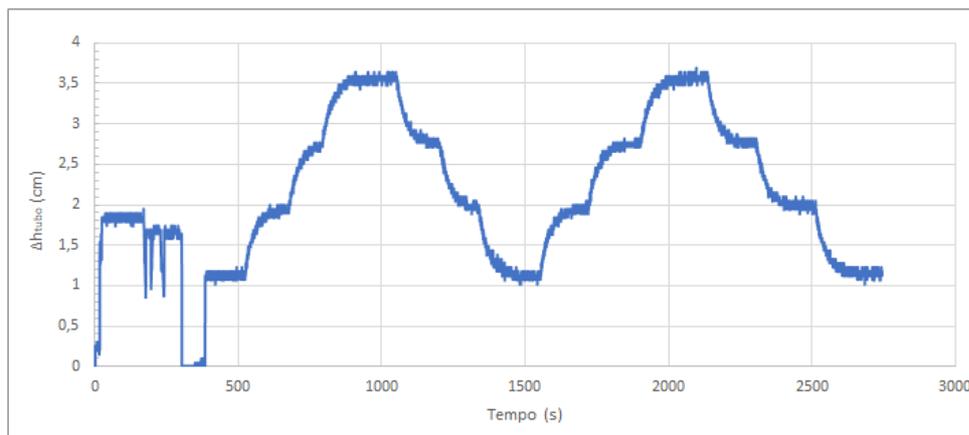


Figura 3.19 – Leitura do sensor de pressão MPXV5004DP (tendo em conta que o reservatório 2 sofre uma variação de altura máxima de aproximadamente 48 mm) com base na montagem experimental da figura 3.17.

Através do gráfico da figura 3.19, verifica-se que inicialmente o tubo conectado ao sensor possui cerca de 10 mm do seu comprimento submerso na água. Posteriormente, tendo em conta que o reservatório 2 sofre uma variação de altura de aproximadamente 48 mm, verifica-se que o tubo possui cerca de 34 mm do seu comprimento submerso na água, isto é, cerca de 24 mm a mais do que possuía inicialmente, como seria de esperar. Quando o reservatório 2 é colocado no nível correspondente à sua posição inicial, o tubo possui novamente cerca de 10 mm do seu comprimento submerso na água. Desta forma, é possível confirmar a boa reprodutibilidade deste sensor.

Com estes resultados, apesar da anomalia inicial que ocorreu neste último teste, optou-se por usar o sensor de pressão MPXV5004DP como medidor de nível de água nos testes realizados *a posteriori*.

3.3. Massa

Uma vez definido quais os sensores mais adequados para utilizar no sistema de aquisição, desenvolveu-se a montagem experimental das figuras 3.20 e 3.21. O objetivo desta montagem é efetuar a calibração do sistema para permitir, em trabalhos futuros, a medição direta dos parâmetros mais importantes para este estudo, nomeadamente, a característica Pressão-Caudal de uma válvula *Tesla* (representada nas figuras 3.20 e 3.21 por um “Tubo-válvula”) e a quantidade de massa de água transferida pelo sistema válvula-câmara-válvula. Desta forma, a medição da pressão e do nível de água num reservatório (gobelé) é efetuada simultaneamente através do sensor MPX5100DP (Sensor 1) e do sensor MPXV5004DP (Sensor 2), respetivamente.

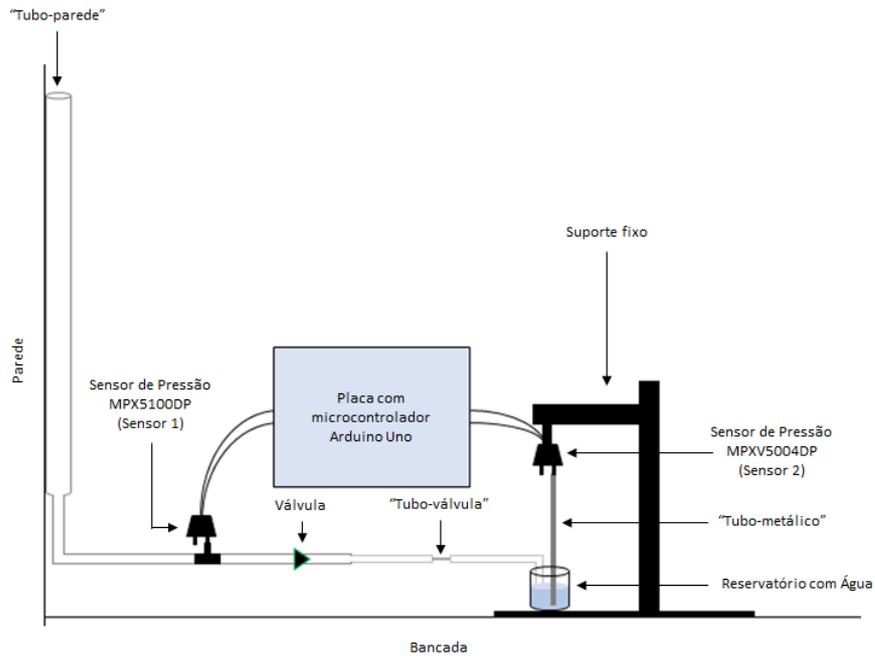


Figura 3.20 – Esquema da montagem experimental desenvolvida para efetuar a calibração do sistema de aquisição para permitir, em trabalhos futuros, a medição direta da característica Pressão-Caudal de uma válvula *Tesla* e da quantidade de massa de água transferida pelo sistema válvula-câmara-válvula.

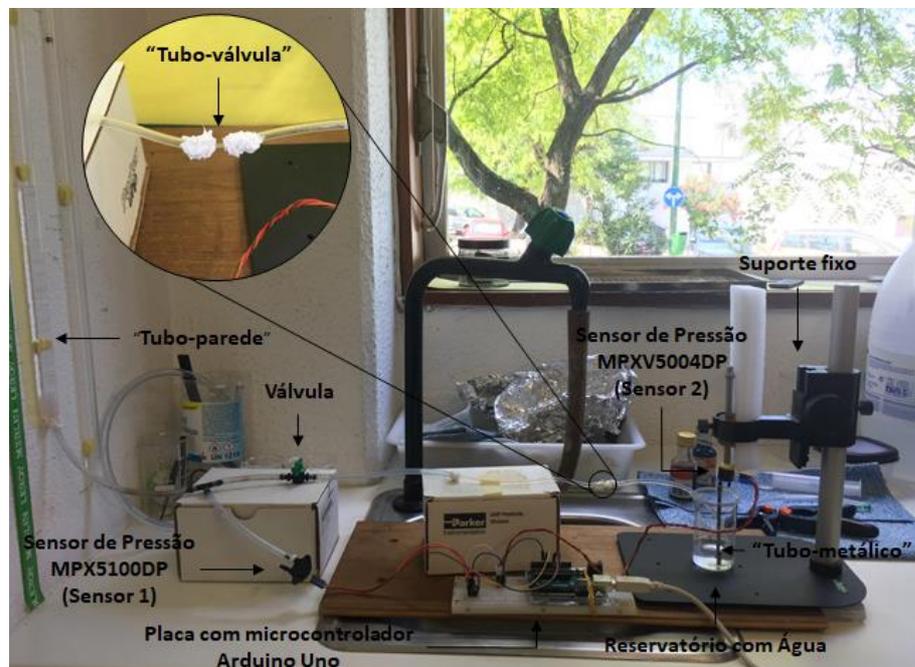


Figura 3.21 - Montagem experimental desenvolvida para efetuar a calibração do sistema de aquisição para permitir, em trabalhos futuros, a medição direta da característica Pressão-Caudal de uma válvula *Tesla* e da quantidade de massa de água transferida pelo sistema válvula-câmara-válvula.

Ora, segundo esta configuração experimental, a massa de água transferida pode ser calculada através de 3 modos independentes:

- **Sensor MPX5100DP (Sensor 1)**

A pressão à entrada do “Tubo-válvula” é medida pelo Sensor 1. Consequentemente, esta medida permite obter o nível de água no tubo vertical através da seguinte equação:

$$P_{\text{Sensor 1}} - P_{\text{atm}} = \rho g \Delta h_{\text{Tubo-parede}} \quad (3.8)$$

Logo:

$$P_{\text{Sensor 1}} - P_{\text{atm}} = \Delta h_{\text{Tubo-parede}} \quad (3.9)$$

A variação volúmica no tubo é dada por:

$$\Delta V_{\text{Sensor 1}} = S_{\text{Tubo-parede}} \Delta h_{\text{Tubo-parede}} \quad (3.10)$$

A variação mássica é dada por:

$$\Delta m_{\text{Sensor 1}} = \Delta V_{\text{Sensor 1}} M_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.11)$$

Logo, temos que:

$$\Delta m_{\text{Sensor 1}} = S_{\text{Tubo-parede}} \Delta h_{\text{Tubo-parede}} M_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.12)$$

- **Sensor MPXV5004DP (Sensor 2)**

A pressão medida pelo Sensor 2 corresponde à pressão exercida sobre o volume de ar preso no interior do tubo metálico. Consequentemente, esta medida permite obter o comprimento do tubo submerso na água através da seguinte equação:

$$P_{\text{Sensor 2}} - P_{\text{atm}} = \Delta h_{\text{Tubo-metálico}} \quad (3.13)$$

A variação volúmica no reservatório é dada por:

$$\Delta V_{\text{Sensor 2}} = S_{\text{reservatório}} \Delta h_{\text{"Tubo-metálico"}} \quad (3.14)$$

E, tendo em conta que o comprimento do tubo submerso corresponde à altura da água no reservatório ($\Delta h_{\text{"Tubo-metálico"}} = \Delta h_{\text{"Nível de Água no reservatório"}}$), temos que:

$$\Delta V_{\text{Sensor 2}} = S_{\text{reservatório}} \Delta h_{\text{"Nível de Água no reservatório"}} \quad (3.15)$$

A variação mássica é dada por:

$$\Delta m_{\text{Sensor 2}} = \Delta V_{\text{Sensor 2}} M_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.16)$$

Logo, temos que:

$$\Delta m_{\text{Sensor 2}} = S_{\text{reservatório}} \Delta h_{\text{"Nível de Água no reservatório"}} M_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.17)$$

- **Balança Digital**

A massa medida pela balança corresponde à quantidade de água líquida que se encontra no reservatório antes e/ou após o processo de transferência. Logo, temos que a variação mássica é dada por:

$$\Delta m_{\text{Balança}} = m_{\text{final}} - m_{\text{inicial}} \quad (3.18)$$

Assim, é possível quantificar a massa de água transferida através de duas relações: relação entre os Sensores 1 e 2 e relação entre a balança e o Sensor 2. Desta forma, obteve-se os gráficos da figura 3.22 e as respetivas equações das retas de calibração (Equações 3.19 e 3.20).

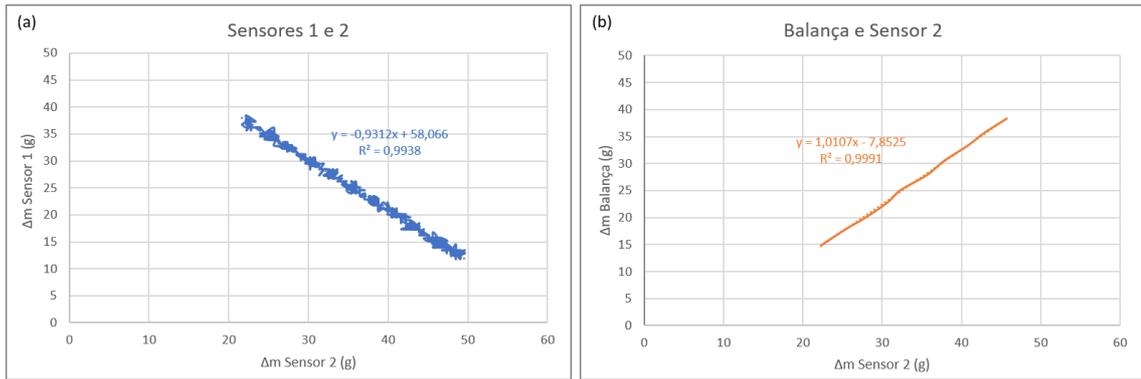


Figura 3.22 – Calibração da massa: relação entre os Sensores 1 e 2 em (a) e relação entre a balança e o Sensor 2 em (b).

$$\Delta m_{\text{Sensor 1}} = -0,9312 \Delta m_{\text{Sensor 2}} + 58,066 \quad (3.19)$$

$$\Delta m_{\text{Balança}} = 1,0107 \Delta m_{\text{Sensor 2}} - 7,8525 \quad (3.20)$$

As medidas efetuadas demonstram que o Sensor 2 permite quantificar a massa de água transferida com boa precisão. Desta forma, tendo em conta que futuramente o objetivo é transferir água de um reservatório de entrada para um reservatório de saída, o uso do Sensor 1 deixa de ser necessário e o Sensor 2 torna-se o único sensor viável para medir esta grandeza. No entanto, uma outra solução a considerar é a construção de uma mini balança digital através do uso, por exemplo, de um sensor de força que possa ser associado à placa com o microcontrolador Arduino.

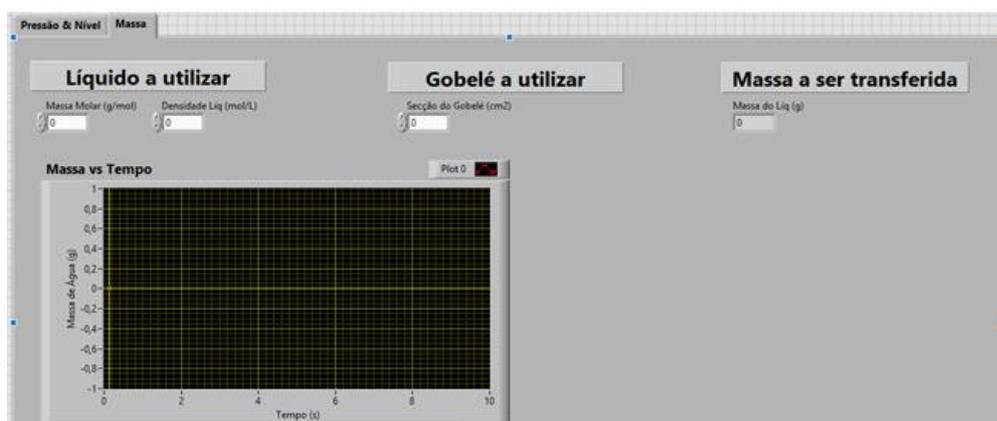
3.4. Plataforma de Comunicação

Tendo em conta a montagem experimental desenvolvida e a calibração efetuada para o sistema de aquisição, é importante que os resultados de teste possam ser apresentados numa interface gráfica. Assim, desenvolveu-se uma interface em LabView (*software* de engenharia de sistemas criado especificamente para aplicações de teste, medição e controlo com acesso rápido ao *hardware* e às informações obtidas a partir de dados) que funciona como uma plataforma de comunicação com o utilizador, através da qual este tem acesso direto aos dados lidos diretamente pelos sensores. Em termos gráficos, a plataforma é constituída por duas janelas: a primeira apresenta a medida simultânea da pressão e do nível de água num reservatório (Figura 3.23-a) e a segunda apresenta a medida quantificada da massa de água transferida pelo sistema (Figura 3.23-b). Nesta segunda janela é permitida a introdução de alguns parâmetros indispensáveis para que a conversão Altura-Massa Líquida seja realizada e apresentada automaticamente.

É importante referir que a apresentação dos resultados dos testes efetuados e descritos nas subsecções anteriores, teve como base o uso desta plataforma de comunicação. Esta foi igualmente usada para a apresentação dos resultados dos testes efetuados *a posteriori*.



(a)



(b)

Figura 3.23 – Interface gráfica desenvolvida através do LabView: janela através da qual é apresentada a medida simultânea da pressão e do nível de água num reservatório em (a) e janela através da qual é apresentada a quantidade de água transferida pelo sistema em (b).

Transferência de calor na câmara

4.1. Configuração do sistema válvula-câmara-válvula

Tendo em conta a necessidade, demonstrada no trabalho anterior [1], de otimizar o funcionamento do sistema válvula-câmara-válvula, nomeadamente, obter valores superiores de diferença de pressão entre os terminais das válvulas unidirecionais, surgiu a ideia de abordar e desenvolver uma nova configuração do sistema. Esta nova configuração tem como principal objetivo otimizar a ação de saída/entrada de fluido líquido na câmara através das válvulas durante o processo de aquecimento/arrefecimento da água, respetivamente.

Assim, é fundamental saber que valor de energia permite a evaporação de uma pequena porção do fluido que se encontra inicialmente no estado líquido, para que essa porção no estado gasoso preencha todo o volume da câmara. Desta forma, a energia total (Q_{total}) é calculada através da seguinte equação:

$$Q_{total} = Q_{aquecimento} + Q_{latente} \quad (4.1)$$

onde $Q_{aquecimento}$ representa a energia necessária para aquecer a pequena porção do fluido da temperatura ambiente (que se considerou ser igual a 20 °C) até à temperatura de evaporação (que é igual a 100 °C no caso da água) e $Q_{latente}$ a energia necessária para que ocorra uma mudança de fase da água do estado líquido para o estado gasoso. As duas energias podem ser calculadas através das seguintes equações:

$$Q_{aquecimento} = (H_{100\text{ }^{\circ}\text{C}} - H_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}) n_{mol(H_2O\text{ liq.}20\text{ }^{\circ}\text{C})} \quad (4.2)$$

$$Q_{latente} = m_{H_2O\text{ gas.}100\text{ }^{\circ}\text{C}} L_{H_2O} \quad (4.3)$$

onde $n_{\text{mol}}(\text{H}_2\text{O liq.20 }^\circ\text{C})$ representa o número de moles correspondente ao volume inicial de água no estado líquido, $m_{\text{H}_2\text{O gas.100 }^\circ\text{C}}$ a quantidade de massa correspondente ao volume de água no estado gasoso que preenche toda a câmara de trabalho e $L_{\text{H}_2\text{O}}$ o calor latente de vaporização da água.

Com base no modelo circular da figura 4.1 e nos cálculos efetuados pela Eng.^a Sofia Alves [1], de modo a que seja possível preencher de vapor uma câmara de trabalho de volume aproximadamente igual a 157 mm^3 , seria necessário evaporar apenas 0.1 mm^3 de todo o volume líquido inicial. Logo, teríamos um gasto energético de aproximadamente 0.02 J e 0.2 J para aquecer (20°C a 100°C) e evaporar, respetivamente, 0.1 mm^3 líquidos. Contudo, tendo em conta que o aquecimento se encontra localizado no centro da câmara, para que a pequena porção igual a 0.1 mm^3 mude de fase a 100°C , é necessário que todo o volume líquido inicial (ou seja, 157 mm^3 de água) se encontre a essa temperatura. Assim, inicialmente é preciso aquecer a quantidade total de água presente na câmara, processo que corresponde a um gasto de energia ($Q_{\text{aquecimento}}$) de aproximadamente 52 J (ver tabela 4.1). Este valor revela-se bastante elevado e tecnicamente complicado de se atingir num intervalo de tempo, por exemplo, inferior a 1 s . Por sua vez, a discrepância entre os valores de energia calculados (0.02 J e 52 J) pode explicar em parte alguns dos problemas obtidos no funcionamento do sistema desenvolvido anteriormente.

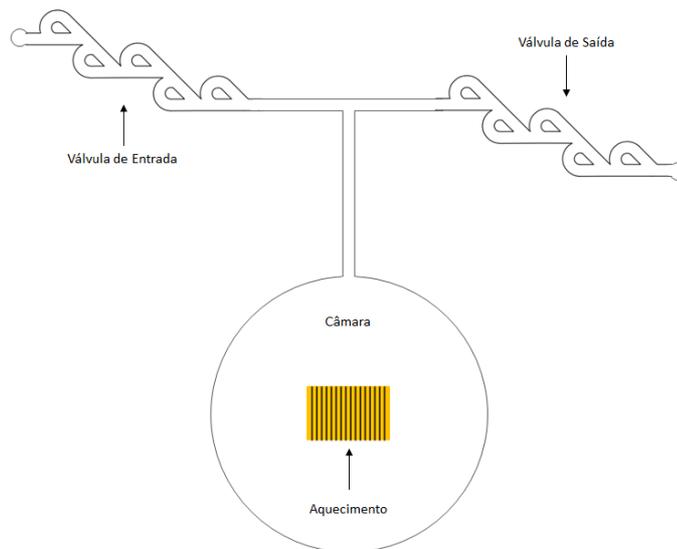


Figura 4.1 – Esquema do sistema proposto pela Eng.^a Sofia Alves, no qual a câmara de trabalho não se encontra alinhada com o conjunto de válvulas de entrada/saída. Adaptado de [1].

Tabela 4.1 – Valores correspondentes à energia necessária para aquecer (20 °C a 100 °C) e evaporar, respetivamente, 0.1 mm³ do volume de água inicial, com base no modelo circular da figura 4.1.

Aquecimento da Água (20 °C a 100 °C)			Evaporação da Água (100 °C)					
$V_{\text{líquido}}$ (mm ³)	$n_{\text{líquido}}$ (mol)	$Q_{\text{aquecimento}}$ (J)	V_{gasoso} (mm ³)	n_{gasoso} (mol)	m_{gasoso} (g)	$V_{\text{líquido}}$ (mm ³)	Q_{latente} (J)	Q_{total} (J)
157	8.7×10^{-3}	52	157	5.2×10^{-6}	9.4×10^{-5}	0.1	0.2	52

Posto isto, a solução baseia-se em desenvolver um sistema mais simples e eficiente, no qual o aquecimento esteja o mais localizado possível para aquecer e, posteriormente, evaporar apenas 0.1 mm³ do volume de água inicial, sem que seja necessário despende muita energia.

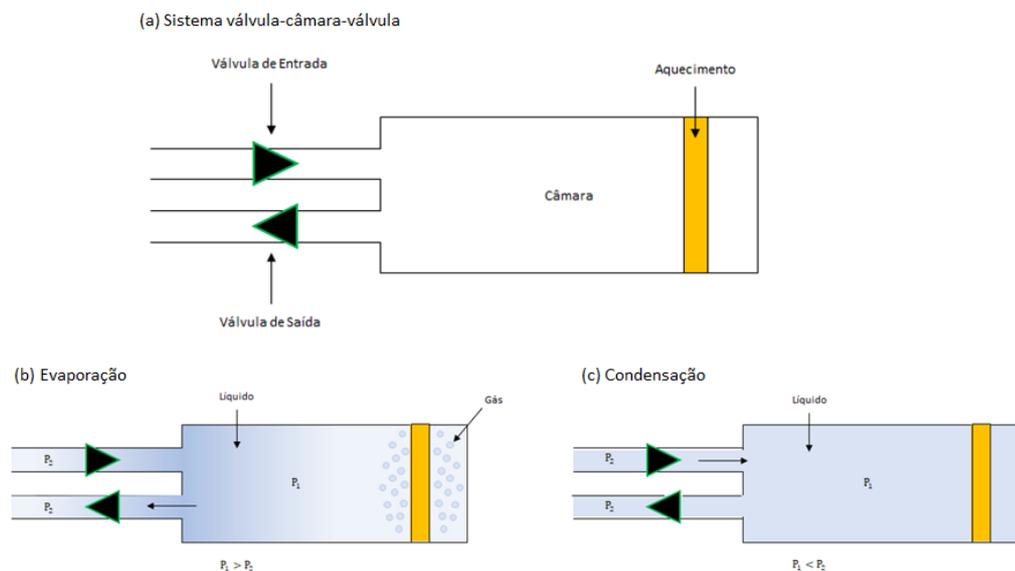


Figura 4.2 – Ilustração do princípio de funcionamento da micro-bomba com a nova configuração: sistema válvula-câmara-válvula em (a); processo de evaporação em (b) e processo de condensação em (c).

O sistema é formado por uma câmara de trabalho retangular e um conjunto de válvulas unidirecionais localizado numa das suas extremidades (Figura 4.2-a). O princípio de funcionamento deste sistema é equivalente ao do sistema descrito na Introdução, no entanto segundo esta nova configuração, o aquecimento está localizado na extremidade oposta à extremidade das válvulas, de modo a que a circulação da água (note-se que apenas circula água fria), entre os ciclos de evaporação-condensação, ocorra obrigatoriamente entre estas. Desta forma, durante o processo de evaporação é aquecida uma pequena porção do fluido na zona de aquecimento, o que faz com que a pressão no interior da câmara seja superior à pressão nos canais e,

assim, a água flui apenas pela válvula de saída (Figura 4.2-b). No processo de condensação, uma vez que a pressão na câmara é inferior à pressão nos canais, a água flui apenas pela válvula de entrada e preenche a câmara na sua totalidade (Figura 4.2-c).

4.2. Aquecimento – Filmes Finos

Tendo em conta a necessidade de otimizar o tipo de aquecimento utilizado, de modo a que o mesmo ocupe um menor volume na câmara de trabalho e permita um aquecimento rápido da água presente na mesma, decidiu-se produzir resistências de filmes finos evaporados diretamente sobre o fundo da câmara. Desta forma, prevê-se que durante o processo de aquecimento ocorre uma transferência de calor não só para a água presente na câmara de trabalho, como também para o vidro que serve de substrato da própria resistência. Assim, de modo a obter o perfil de temperatura na água e no vidro, durante o processo de aquecimento da água até aos 100 °C, aplicou-se ao nosso sistema a equação [17] resultante da resolução da “Equação do Calor” quando um fluxo de calor é dissipado sobre a interface entre dois meios:

$$T(x, t) - T_i = \frac{2q_0''(at/\pi)^{1/2}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4at}\right) - \frac{q_0''x}{k} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)\right) \quad (4.4)$$

onde $T(x, t)$ representa a temperatura da água e/ou do vidro no instante t à distância x da interface ($x = 0$), T_i a temperatura inicial (20 °C) destes dois materiais $t = 0$ (início do aquecimento), q_0'' o fluxo de calor no material, α a difusividade térmica do material, k a condutividade térmica do material.

No nosso caso, o objetivo é aquecer a água até aos 100 °C em apenas 1 s. Assim, é possível através da Equação do Calor (Equação 4.4) e tendo em conta as condições à fronteira, calcular o valor correspondente ao fluxo de calor a dissipar respetivamente na água e no vidro, para um intervalo de tempo igual ou inferior a 1 s. Por sua vez, é possível obter o perfil de temperatura na água e no vidro, tendo em conta que a água preenche uma câmara de trabalho com uma profundidade de 0.5 mm e o vidro possui uma espessura de 1 mm. Desta forma, para os intervalos de tempo igual a 0.1 s, 0.3 s e 1 s, obteve-se um fluxo de calor total (ou seja, o somatório do fluxo de calor dissipado na água com o fluxo de calor dissipado no vidro) de aproximadamente igual a 0.7 W/mm², 0.4 W/mm² e 0.2 W/mm², respetivamente. Os perfis de temperatura na água e no vidro encontram-se representados no gráfico da figura 4.3:

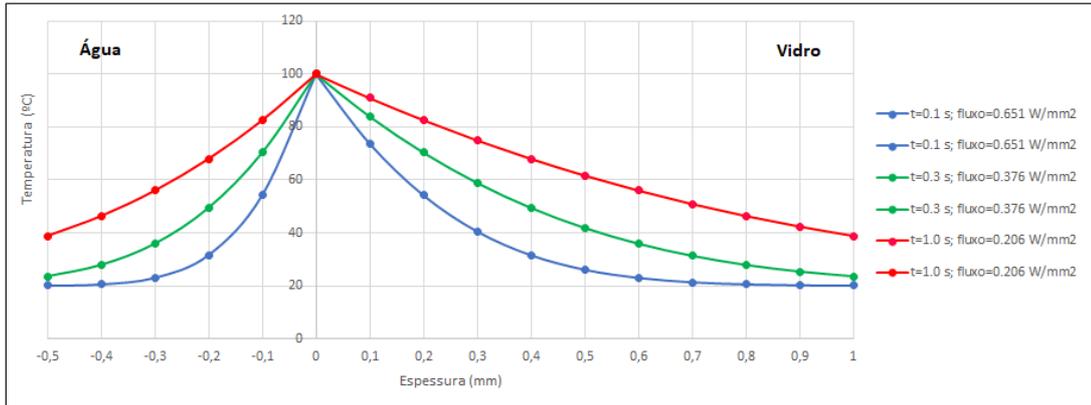


Figura 4.3 - Perfil de temperatura na água ($x \leq 0$) e no vidro ($x \geq 0$), após o aquecimento da água até aos 100 °C (note-se que os valores de “t” indicam o tempo necessário para aquecer a água até aos 100 °C)

Através do gráfico da figura 4.3, observa-se que para se alcançar um aquecimento rápido da água, por exemplo, num intervalo de tempo igual a 0.1 s, é necessário um fluxo de calor igual a 0.65 W/mm². Tal como se esperava, verifica-se que quanto maior é o fluxo, mais rapidamente se aquece a água à interface e menor energia se gasta para aquecer a água longe da mesma, fazendo com que o aquecimento fique mais localizado como pretendido. Note-se que a quantidade de volume líquido a evaporar corresponde a 0.1 mm³, portanto, se o calor fosse transferido através de uma seção com 1 mm², bastava que a temperatura de 100 °C fosse obtida sobre uma espessura de 0.1 mm.

Ora, para que no futuro se evite ultrapassar o valor do fluxo de calor obtido (0.7 W/mm²) e tendo em conta a nova configuração do sistema, os filmes finos produzidos diferem em comprimento e largura da pista. Na figura 4.4 observam-se os desenhos dos filmes, cujas configurações daqui em diante são designadas por DFm em que m diz respeito ao tipo de desenho. Na tabela 4.2 apresentam-se as respetivas dimensões dos filmes.

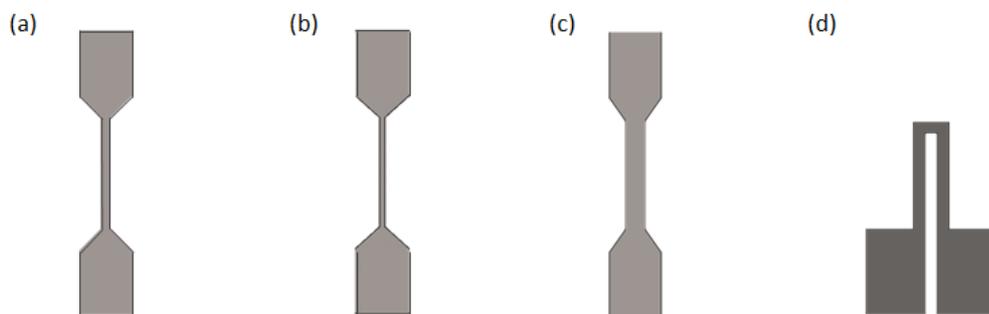


Figura 4.4 – Desenhos dos filmes (desenvolvidos através de um software tipo CAD): DF1 em (a), DF2 em (b), DF3 em (c) e DF4 em (d).

Tabela 4.2 – Dimensões dos Filmes.

Filme	Comprimento da pista metálica (mm)	Largura da pista metálica (mm)
DF1	10	1
DF2	10	0.5
DF3	10	2
DF4	20	1

4.3. Método de Fabricação

A produção dos filmes de aquecimento consiste em 3 passos:

- **Preparação do Substrato**

Como substrato utilizou-se uma placa de vidro (100×100 mm). Inicialmente, foi necessário submetê-la a uma lavagem com água e detergente, acetona (durante 10 min em ultrassons), álcool (durante 10 min em ultrassons) e água ultrapura. Procedeu-se com o revestimento do substrato com o fotoresiste AZ6632 através da técnica “*Spin coating*” com uma velocidade de 3000 rpm durante aproximadamente 20 s (Figura 4.5-a). De seguida, é necessário submeter o substrato a um processo de cura (“*Soft-baking*”). Desta forma, colocou-se o conjunto vidro-fotoresiste numa placa de aquecimento a 115 °C durante aproximadamente 1 min e 15 s. Posteriormente, efetuou-se a gravação dos desenhos dos filmes com base na fotolitografia, isto é, um método que utiliza a radiação UV para transferir o(s) padrão(ões) de uma máscara (fotólito) para uma superfície lisa. Assim, colocou-se o conjunto vidro-fotoresiste-máscara (a máscara desenhada e utilizada está representada na figura 4.5-b) no alinhador de máscaras (*Karl Suss*), através do qual esteve exposto a uma luz UV de comprimento de onda igual a 360 nm durante aproximadamente 10 s. Por conseguinte, colocou-se o substrato submerso num revelador diluído AZ400 com uma diluição de 1/5. Tendo em conta que o fotoresiste é do tipo “positivo”, durante a revelação as áreas expostas à luz são solubilizadas. Uma vez concluído o processo de revelação, mergulhou-se o substrato em água ultrapura de forma a parar a reação. Por último, o substrato é seco com ar comprimido.



Figura 4.5 – Preparação do substrato para a deposição do metal: revestimento do substrato com o fotoresiste AZ6632 através da técnica “*Spin coating*” em (a) e máscara de acetato com os desenhos dos filmes finos a depositar no vidro em (b).

- **Deposição do Metal**

O processo de deposição do metal (no nosso caso titânio) consiste numa evaporação assistida em vácuo por canhão de elétrons, no qual ocorre a emissão de um feixe de elétrons. Este feixe ao incidir no alvo (metal) provoca o seu aquecimento até ao ponto de fusão (ocorre uma transformação de energia cinética em energia térmica) e, desta forma, o metal é evaporado e depositado nos vidros nas zonas que não se encontram revestidas com o fotoresiste.

- **Limpeza pós-deposição**

Posteriormente à deposição, é necessário submeter o vidro com as resistências a um novo processo de limpeza (“*Lift-off*”), de modo a que seja removido da sua superfície o restante fotoresiste. Na lavagem usou-se acetona, álcool isopropílico (IPA) puro e água ultrapura. Por último, secou-se o vidro com ar comprimido e cortou-se o mesmo nos tamanhos desejados, através do uso de um riscador de diamante. Os filmes finais encontram-se representados na figura 4.6 (note-se que foram produzidos seis filmes de cada tipo de desenho).

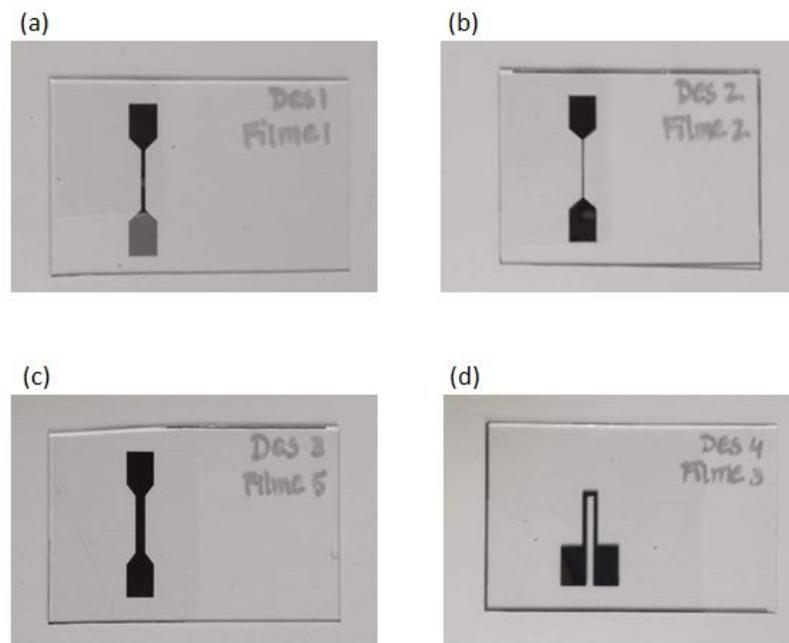


Figura 4.6 - Filmes finos produzidos através do processo de deposição por evaporação assistida em vácuo por canhão de elétrons: DF1 em (a), DF2 em (b), DF3 em (c) e DF4 em (d).

4.4. Ensaios Experimentais e Resultados

A fim de testar as resistências de aquecimento e verificar o princípio de funcionamento do sistema baseado na nova configuração, desenvolveu-se a montagem experimental da figura 4.7. Esta é constituída por um conjunto vidro-câmara (selados entre si com silicone) que se encontra conectado através de um tubo a um reservatório (gobelé) de entrada/saída da água, à qual se adicionou corante alimentar de modo a facilitar a visualização do deslocamento do fluido no tubo de conexão. O objetivo desta montagem é testar se é possível transferir água com corante do reservatório para o interior da câmara ($30 \times 10 \times 0.5$ mm) em *plexiglass*.

Como procedimento, inicialmente, é necessário encher a câmara e o tubo com água (sem corante) e, de seguida, colocar o reservatório à entrada/saída do sistema. Ao ligar-se a fonte de tensão que alimenta a resistência de aquecimento, esta aquece e permite que parte da água presente na câmara evapore. Uma vez que a pressão na câmara aumenta, a restante água é “empurrada” através do tubo de conexão até ao reservatório (fase de aquecimento). Ao desligar-se a fonte de tensão, a pressão na câmara diminui e permite o reenchimento da mesma com água proveniente do reservatório (fase de arrefecimento).

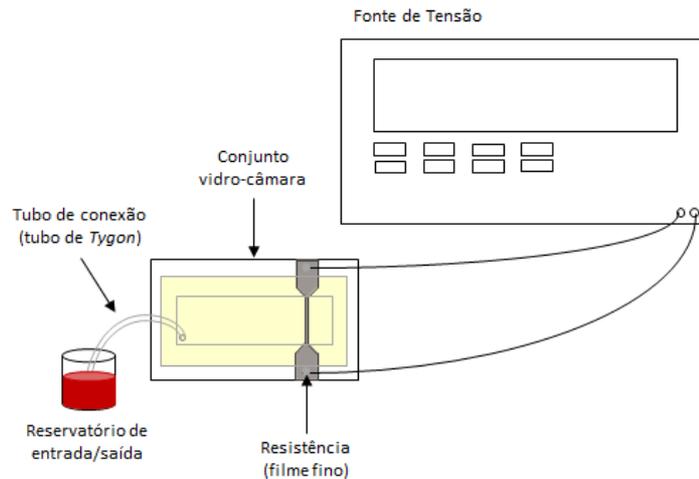


Figura 4.7 - Primeira montagem desenvolvida para testar as resistências de aquecimento e verificar o princípio de funcionamento do sistema baseado na nova configuração. Conjunto vidro-câmara conectado ao reservatório de entrada/saída de água. Adicionou-se corante alimentar à água de modo a facilitar a visualização do deslocamento do fluido no tubo de conexão.

No geral, o sistema demonstrou provas de funcionamento. Nas fases de aquecimento, a resistência foi capaz de evaporar parte da água presente na câmara e, assim, a restante água foi “empurrada” através do tubo de conexão até ao reservatório como ilustrado nas figuras 4.8 e 4.10 retiradas de um vídeo gravado durante o funcionamento do sistema. Nas fases de arrefecimento, a água reentrou na câmara percorrendo o tubo desde o reservatório como ilustrado na figura 4.9 retirada do mesmo vídeo. Desta forma, ao fim de alguns ciclos de evaporação-condensação (cerca de 4), foi possível transferir água com corante vermelho do reservatório para o interior da câmara. Através do vídeo, foi igualmente possível calcular as velocidades correspondentes ao processo de aquecimento/arrefecimento da água, sabendo o tempo decorrido em cada uma das fases e as respetivas distâncias percorridas (convertidas para distâncias reais, de forma algo grosseira, através de uma escala) pela mesma no tubo de conexão. Ora, a velocidade média resultante foi de aproximadamente 15.5 mm/s para o processo de aquecimento e 20 mm/s para o processo de arrefecimento, sendo que a razão entre estas é de aproximadamente 1.3. Para estas velocidades obteve-se um número de Reynolds de 9.3 e 12 (ambos os valores correspondem ao regime laminar) e um caudal de 4.4 mm³/s e 5.7 mm³/s, respetivamente. Além disso, tendo em conta o filme utilizado (DF3) e os valores de tensão e corrente atingidos (14 V e 680 mA), obteve-se um fluxo aproximadamente igual a 0.5 W/mm².

Com estes resultados, é possível afirmar que o princípio de funcionamento do sistema foi alcançado. A resistência demonstrou provas de funcionamento, tendo sido possível a evaporação/condensação de parte da água presente na câmara aquando os ciclos de aquecimento/arrefecimento, respetivamente. No entanto, no processo de aquecimento, a água evaporada não foi capaz de preencher e, posteriormente, esvaziar toda a câmara, estimando-se a olho nu que apenas foi possível esvaziar 1/10 do volume da mesma. Verificou-se também que as velocidades

no processo de aquecimento/arrefecimento da água, foram sempre menores durante o aquecimento, o que indica que este ainda é bastante lento. Logo, o sistema precisa de ser melhorado, nomeadamente, no que diz respeito ao tipo de aquecimento utilizado, uma vez que os processos de evaporação-condensação foram realizados com uma dinâmica mais lenta do que a desejada, obrigando a um gasto de energia ainda muito elevado.



Figura 4.8 – Conjunto vidro-câmara associado ao filme DF3: primeira fase de aquecimento (Δt de 7 s a 14 s).

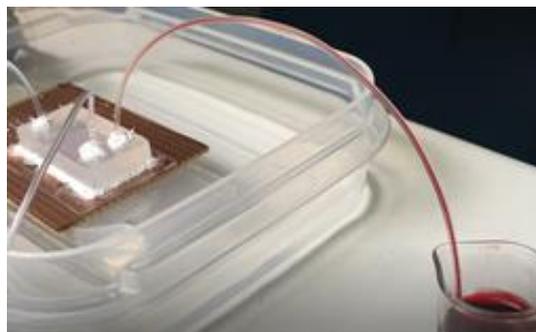


Figura 4.9 – Conjunto vidro-câmara associado ao filme DF3: primeira fase de arrefecimento (Δt de 14 s a 21 s).

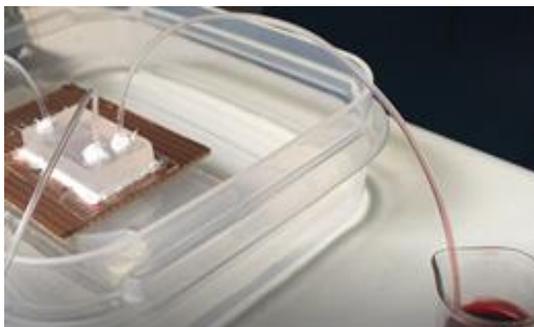


Figura 4.10 – Conjunto vidro-câmara associado ao filme DF3: segunda fase de aquecimento (Δt de 21 s a 28 s).



Válvulas Tesla

5.1. Produção 3D

Tendo em conta a necessidade de encontrar um método de fabricação das válvulas e/ou dos sistemas válvula-câmara-válvula que possua uma boa reprodutibilidade aliada a uma rápida prototipagem, de modo a obter um produto com alta resolução num intervalo de tempo reduzido, recorreu-se a título experimental ao uso da técnica *Stereolithography* (SLA).

A SLA é uma das tecnologias de fabricação aditiva, normalmente referenciada como impressão 3D, que permite converter materiais líquidos em materiais sólidos através da adição camada por camada. Esta tecnologia, cujo seu aparecimento surgiu no início dos anos 70 [18], recorre ao uso de uma fonte de luz UV para curar (ou seja, solidificar) seletivamente as camadas de resina e, assim, formar um objeto sólido.

Existem dois sistemas de impressão diferentes: *Right-Side Up SLA* e *UpSide-Down SLA*. Ambos os sistemas são construídos a partir do mesmo princípio, que se baseia no uso de uma fonte de luz (laser UV ou projetor) responsável por curar a resina líquida de forma a que esta se torne num plástico endurecido. As diferenças entre estes estão relacionadas com o arranjo dos componentes principais como a fonte de luz, a plataforma de construção e o tanque de resina. Relativamente ao tipo de resina utilizada em cada processo, a escolha é feita tendo em conta o tipo de aplicação do objeto impresso. Desta forma, as resinas apresentam diferentes composições e características como a cor, a resistência, a durabilidade, a flexibilidade, a resistência à temperatura, entre outras.

Apesar de se tornar uma técnica por vezes cara, atualmente, esta é utilizada nomeadamente na criação de modelos, protótipos, padrões e peças de produção com aplicações numa variedade de setores industriais como a engenharia, a odontologia, a joalheria, a modelagem e a educação.

Ora, segundo as vantagens apresentadas e os resultados obtidos nos testes realizados anteriormente, foram escolhidos dois modelos diferentes de válvulas (TV1-5 e TV3-5) para serem

impressos. Na figura 5.1 observam-se os desenhos destes dois modelos com os quais se atingiu, anteriormente, valores de diodicidade aproximadamente igual a 2.

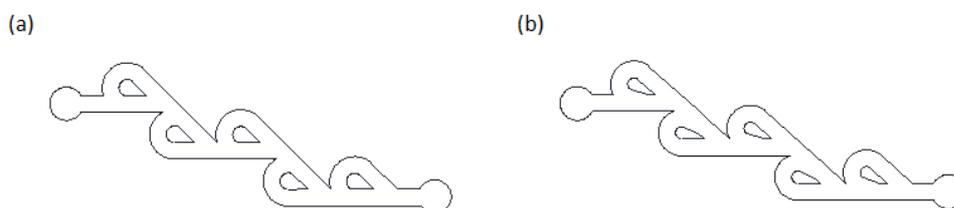


Figura 5.1 – Desenhos dos dois modelos diferentes de válvulas (desenvolvidos através de um *software* tipo CAD): TV1-5 em (a) e TV3-5 em (b). Adaptado de [1].

Note-se que ambos os modelos possuem uma combinação de cinco válvulas em série, sendo, portanto, os ângulos onde se encontram as junções dos canais a única diferença relevante entre os mesmos.

5.2. Método de Fabricação

A produção das peças tridimensionais consiste em 4 passos:

- **Design e Preparação Digital**

O processo de impressão 3D inicia-se com o desenvolvimento do desenho da peça através do uso de um *software* tipo CAD. Posteriormente, prossegue-se com a configuração da impressão (normalmente realizada de forma automática pelo *software*) relativamente à orientação da peça, à escolha da estrutura de suporte, à espessura da camada, entre outras características relevantes para que o produto final seja alcançado com sucesso. Posto isto, encontram-se reunidas todas as condições para que se realize a impressão.

- **Impressão 3D**

Tendo em conta os recursos disponibilizados pelo CENIMAT, a impressora utilizada tem por base o sistema *UpSide-Down SLA* (Figura 5.2) e tal como o nome indica, o processo de impressão ocorre de “cabeça para baixo”. Isto é, a plataforma de construção desce até ao tanque, que serve de substrato para a resina líquida (note-se que neste projeto, a resina utilizada apresenta uma cor transparente para que seja possível observar a circulação da água através dos canais das válvulas, de modo a facilitar o processo de caracterização das mesmas), deixando um espaço igual à espessura de uma camada entre si e a resina ou entre a última camada curada e a resina. De seguida, a luz proveniente do laser UV é focalizada de modo a atravessar o fundo transparente do tanque incidindo na resina tendo em conta as coordenadas específicas que

permitem curar uma nova camada. Uma vez formada a camada, a plataforma de construção sobe. Note-se que o conjunto de passos descritos se repete até que a impressão da peça esteja completa.

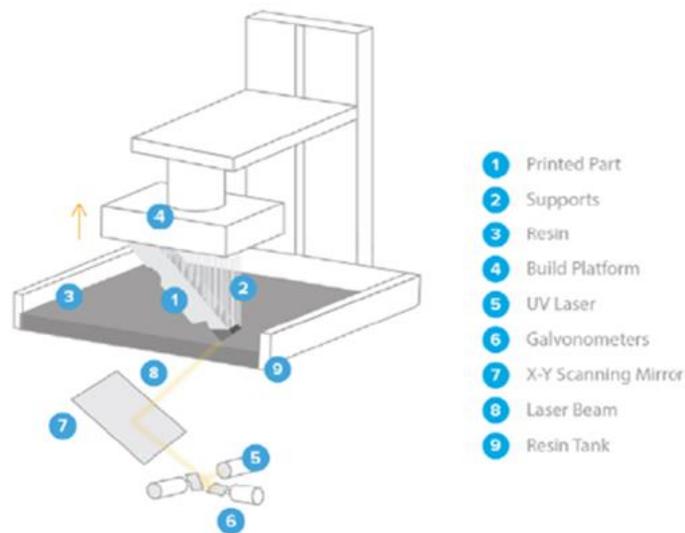


Figura 5.2 – Esquema do processo de impressão 3D com base no sistema *Upside-Down SLA*. Adaptado de [18].

- **Limpeza pós-impressão**

Após concluído o processo anterior, é necessário submeter a peça a um conjunto de banhos de IPA, de modo a retirar quaisquer resíduos ou dissolver o excesso de resina existente na mesma. Assim, coloca-se a peça no primeiro banho durante aproximadamente 30 s e, de seguida, no segundo banho durante aproximadamente 10 min. Caso seja relevante, a peça pode ser submetida a um novo conjunto de banhos sem existir qualquer especificação temporal.

- **Cura pós-impressão**

Uma vez que o processo de polimerização não se encontra completo após a impressão e, por isso, as propriedades mecânicas e térmicas da peça não estão totalmente definidas, é necessário submeter a mesma a um processo de cura. Assim, coloca-se a peça numa câmara UV a 60 °C durante aproximadamente 30 min. Posto isto, a peça possui a resistência e estabilidade necessária para ser utilizada ou integrada num sistema.

5.3. Ensaios Experimentais e Resultados

A fim de testar o bom funcionamento das peças impressas e obter a caracterização Pressão-Caudal das válvulas integradas nas mesmas, desenvolveu-se a montagem experimental da figura 5.3. Esta, à semelhança das montagens experimentais apresentadas anteriormente, é constituída por um tubo colocado verticalmente na parede (“Tubo-parede”) cuja sua extremidade inferior se encontra conectada através de um “T” ao sensor MPX5100DP e a um tubo de saída com uma válvula que permite controlar a circulação do fluido. Por sua vez, este segundo tubo encontra-se conectado à peça impressa através de um tubo de diâmetro menor (“Tubo-conexão”).

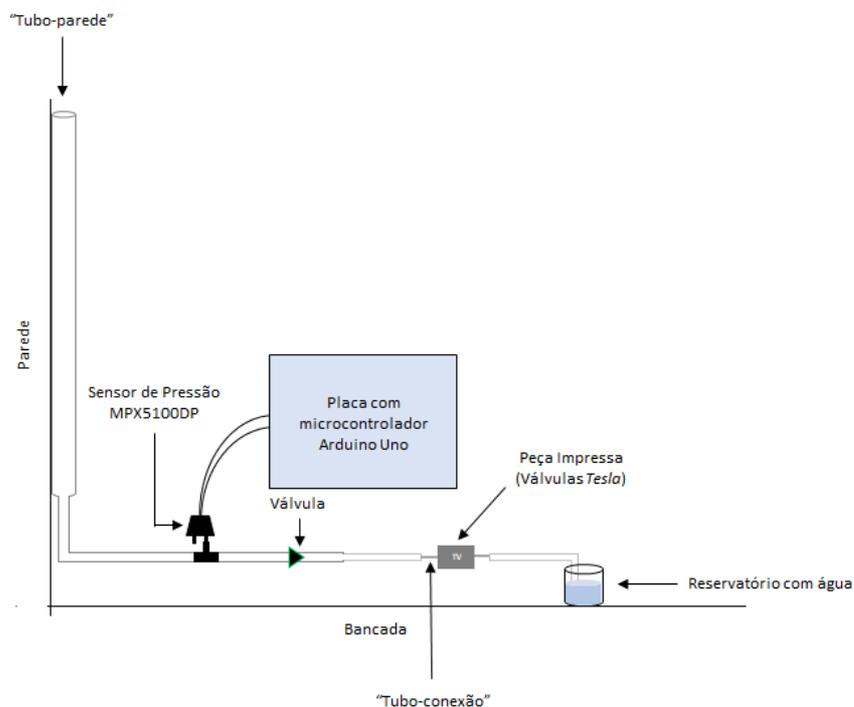


Figura 5.3 – Esquema da montagem experimental desenvolvida para testar o bom funcionamento das peças impressas e obter a caracterização Pressão-Caudal das válvulas de cada um dos modelos escolhidos.

Como procedimento, inicialmente, é necessário encher o tubo vertical com água (com corrente). De seguida, com a abertura da válvula, faz-se escoar a água de forma contínua através da válvula *Tesla*. Ora, aquando o escoamento da água, a pressão à entrada desta última válvula é medida pelo sensor MPX5100DP. Consequentemente, esta medida permite obter o nível de água no tubo vertical através da seguinte equação:

$$\Delta P_{\text{experimental}} = \rho g \Delta h_{\text{"Tubo-parede"}} \quad (5.1)$$

Desta forma, é possível obter o perfil da variação de pressão em função do tempo e o caudal volúmico ($dV/dt = S dh/dt$) para a válvula *Tesla* em questão.

Como termo de comparação, teoricamente, a pressão à entrada da válvula *Tesla* é calculada através da seguinte equação:

$$\Delta P_{\text{teórico}} = Z \mu \dot{V} \quad (5.2)$$

onde Z representa a impedância hidrodinâmica total (ou seja, o somatório da impedância de cada um dos tubos colocados aos terminais da válvula com a impedância da mesma), μ a viscosidade dinâmica da água (à temperatura ambiente) e \dot{V} o caudal volúmico.

Por sua vez, em regime laminar, a impedância da válvula *Tesla* pode ser estimada através da seguinte equação:

$$Z_{\text{canal}} = \frac{128 L}{\pi D_{\text{canal}}^4} \quad (5.3)$$

onde L representa o comprimento e D o diâmetro interno do canal (note-se que neste projeto, a válvula *Tesla* é considerada como um canal reto de comprimento e diâmetro respetivamente igual a 13 mm e 0.5 mm).

Assim, é possível comparar os valores experimentais com os valores teóricos e, por conseguinte, perceber se o uso desta nova técnica é ou não vantajoso em trabalhos futuros.

Modelo TV1-5

Os testes realizados podem ser divididos em duas etapas: a primeira etapa corresponde à impressão e posterior caracterização das válvulas de entrada/saída numa peça “one side”, isto é, uma peça na qual as válvulas são impressas apenas num dos lados para que a mesma possa ser acoplada a uma câmara (por exemplo, a câmara em *plexiglass*). A segunda etapa corresponde à impressão e posterior caracterização dessas mesmas válvulas numa peça “full 3D”, isto é, uma peça na qual as válvulas são totalmente integradas para que a mesma possa ser utilizada separadamente, sem a necessidade anteriormente referida de ser acoplada a uma câmara.

Portanto, realizou-se a impressão da primeira peça “one side” que daqui em diante é designada por “Peça 1” (Figuras 5.4 e 5.5). De seguida, foi necessário observar a peça através do microscópio para perceber se esta apresentava qualquer tipo de anomalia que a tornasse imprópria a testes hidrodinâmicos. Após a sua aprovação, a Peça 1 foi selada (com silicone) a uma “tampa” PDMS (esta fornece a estanquicidade necessária durante a realização dos testes) e conectada ao sistema através de tubos com um diâmetro interno igual a 0.6 mm (Tubos 1). Posto isto, realizaram-se os testes segundo o procedimento descrito anteriormente para ambas as válvulas (entrada/saída) e para ambos os sentidos (direto/indireto) de cada uma respetivamente.

Assim, obteve-se os gráficos da figura 5.6, nos quais se observa o perfil da variação de pressão em função do caudal volúmico (sendo estas duas grandezas obtidas experimentalmente). Nestes gráficos foram acrescentados os valores da diferença de pressão teórica (calculados através da Equação 5.2), supondo um fator 2 de diodicidade para a impedância da válvula *Tesla* no sentido indireto.

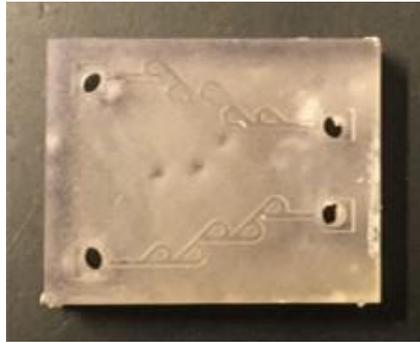


Figura 5.4 – Peça 1 (primeira peça “one side” impressa).

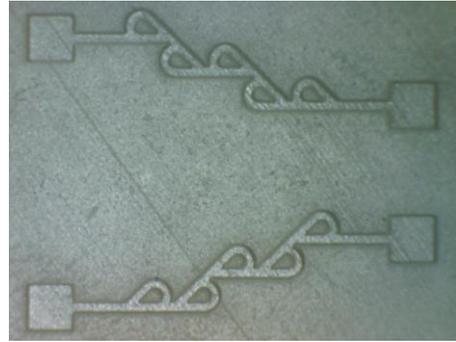


Figura 5.5 – Imagem microscópica das válvulas de entrada/saída da Peça 1.

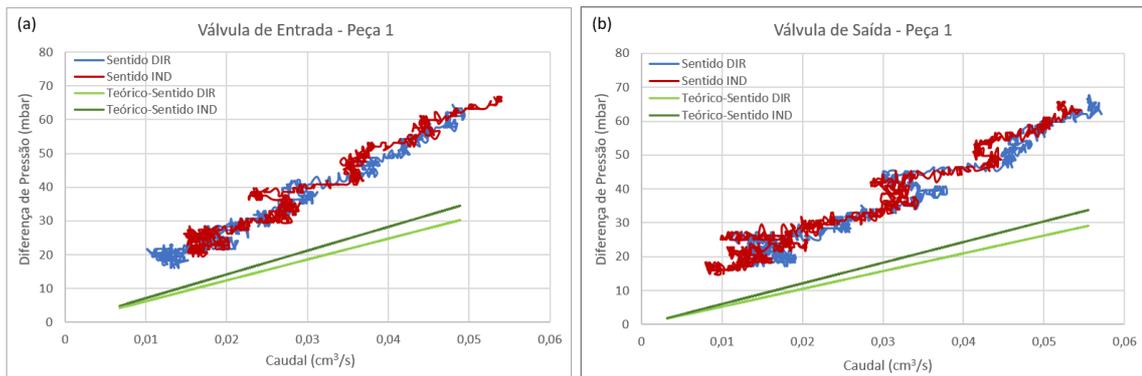


Figura 5.6 – Caracterização Pressão-Caudal das válvulas da Peça 1: válvula de entrada em (a) e válvula de saída em (b).

Através dos gráficos da figura 5.6, verifica-se que os valores medidos pelo sensor não evidenciam a existência de qualquer diferença entre os sentidos direto/indireto para ambas as válvulas. Portanto, a pequena diferença imposta teoricamente pelo fator 2 de diodicidade, pode estar escondida pelo ruído ou a elevada impedância imposta pelos Tubos 1 (devido ao diâmetro interno pequeno dos mesmos) aos terminais da válvula pode, igualmente, esconder a variação imposta pela pequena impedância da mesma. Por outro lado, o declive experimental é duas vezes mais elevado que o declive teórico. Ora, isto faz-nos supor que ocorre um escoamento mais complexo do que o previsto para um canal reto ou as válvulas apresentam pequenos defeitos nos canais que comprometem o escoamento da água ao longo de todo o seu percurso.

Ora, tendo em conta estes resultados, a solução baseia-se em usar tubos de conexão com um diâmetro interno superior ao dos Tubos 1, de modo a que a impedância imposta pelos novos tubos aos terminais da válvula seja menor que a impedância imposta pela mesma.

Desta forma, realizou-se a impressão de uma segunda peça “one side” (Figuras 5.7 e 5.8). Após a observação microscópica e a aprovação da sua utilização para os testes, a Peça 2 foi igualmente selada a uma “tampa” PDMS e conectada ao sistema através de tubos com um diâmetro interno igual a 2.45 mm (Tubos 2) e, portanto, superior ao dos Tubos 1. Posto isto, repetiu-se os testes anteriores e obteve-se os gráficos da figura 5.9.

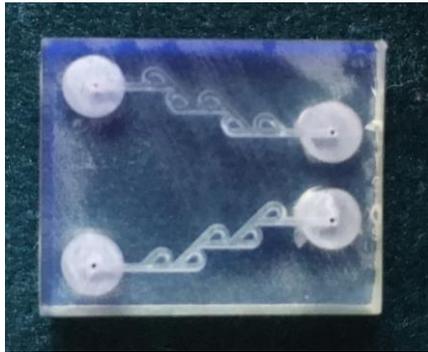


Figura 5.7 – Peça 2 (segunda peça “one side” impressa).

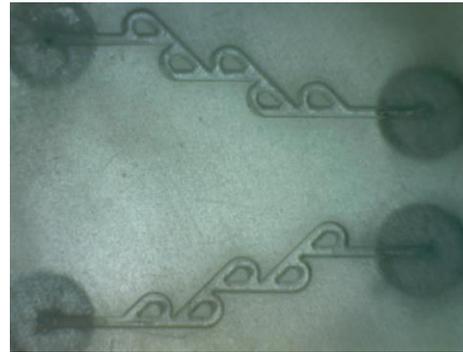


Figura 5.8 – Imagem microscópica das válvulas de entrada/saída da Peça 2.

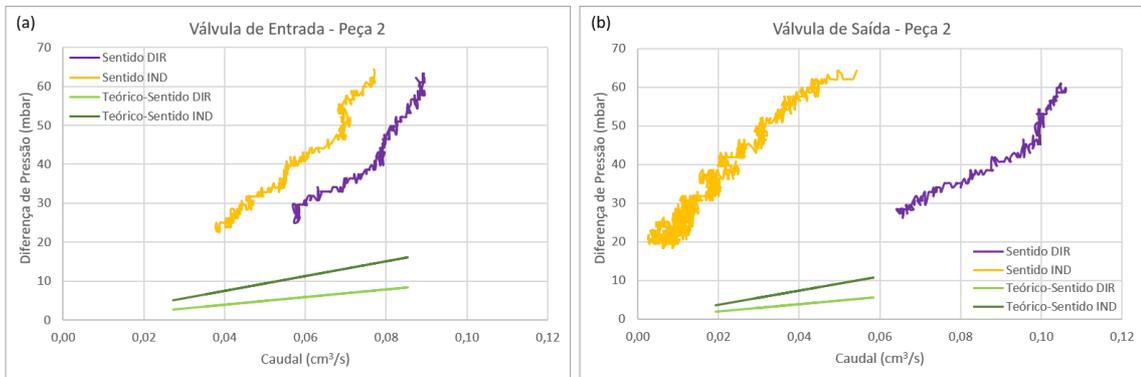


Figura 5.9 - Caracterização Pressão-Caudal das válvulas da Peça 2: válvula de entrada em (a) e válvula de saída em (b).

Através dos gráficos da figura 5.9, verifica-se que os valores medidos pelo sensor evidenciam a existência de diodicidade, sendo que na válvula de saída a diferença entre os sentidos direto/indireto é substancialmente superior do que na válvula de entrada. Assim, através da diferença do declive experimental entre os sentidos direto/indireto, é possível afirmar que a válvula de saída possui uma diodicidade superior a 2. Da mesma forma, verifica-se que para o mesmo

valor de caudal volúmico (por exemplo, quando este é igual a $0.04 \text{ cm}^3/\text{s}$), os valores correspondentes à variação de pressão são menores quando se utiliza a Peça 2 (ΔP encontra-se entre 0 mbar a 10 mbar para ambas as válvulas e ambos os sentidos de cada uma respetivamente) ao invés da Peça 1 (ΔP encontra-se entre 20 mbar a 30 mbar para ambas as válvulas e ambos os sentidos de cada uma respetivamente). Logo, num trabalho futuro, é necessário utilizar tubos de conexão com um diâmetro interno relativamente grande para que a impedância imposta por estes não atenua a impedância imposta pela válvula e, conseqüentemente, os efeitos de diodicidade. No entanto, para ambas as válvulas de cada uma das peças, verifica-se que os valores obtidos de caudal volúmico são muito pequenos e correspondem a números de Reynolds muito baixos, o que pode igualmente justificar a não evidencia de diodicidade.

Ora, uma vez analisadas as peças “one side”, realizou-se a impressão de uma peça “full 3D” (Figuras 5.10 e 5.11). Após a observação microscópica, verificou-se que os canais das válvulas não apresentavam anomalias que impossibilitassem a circulação da água, mas possuíam espessuras diferentes em algumas zonas. Embora estes pequenos defeitos pudessem influenciar negativamente os resultados de teste, a Peça 3 foi conectada ao sistema através dos Tubos 2. Posto isto, repetiu-se os testes anteriores e obteve-se os gráficos da figura 5.12.

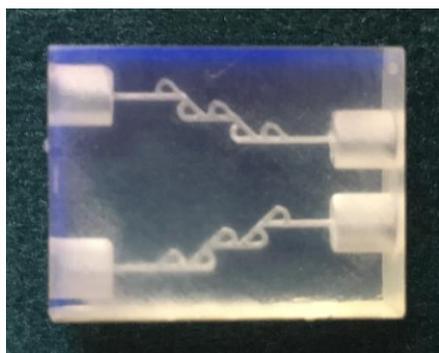


Figura 5.10 – Peça 3 (peça “full 3D” impressa).



Figura 5.11 – Imagem microscópica das válvulas de entrada/saída da Peça 3.

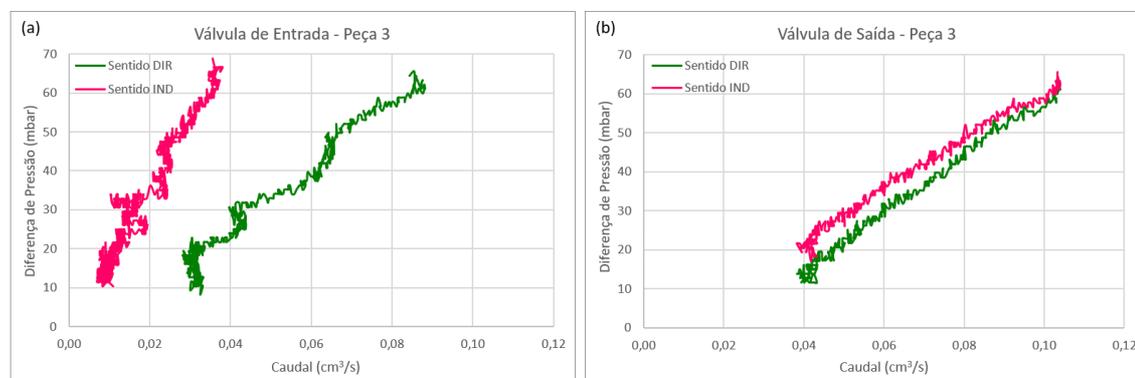


Figura 5.12 - Caracterização Pressão-Caudal das válvulas da Peça 3: válvula de entrada em (a) e válvula de saída em (b).

Através dos gráficos da figura 5.12, verifica-se que os valores medidos pelo sensor evidenciam a existência de diodicidade apenas na válvula de entrada. Desta forma, através da diferença do declive experimental entre os sentidos direto/indireto, é possível afirmar que a válvula de entrada possui uma diodicidade superior a 2. No entanto, à semelhança das peças “*one side*”, para ambas as válvulas da peça “*full 3D*”, verifica-se que os valores de caudal volúmico obtidos são muito pequenos e correspondem a números de Reynolds muito baixos.

No geral, todas as peças 3D apresentaram condições pós-impressão favoráveis e, por isso, foi permitida a utilização das mesmas nos testes. Contudo, os resultados obtidos evidenciam, em qualquer uma dessas peças, a existência de uma inconstante reprodutibilidade entre medidas das válvulas de entrada/saída. Desta forma, conclui-se que não foi alcançada a precisão ideal e essencial na produção deste tipo de válvulas e, portanto, é necessário continuar a explorar o uso desta técnica. Por conseguinte, optou-se por excluir a impressão das peças com as válvulas com o modelo TV3-5 e prosseguiu-se com a produção dos sistemas válvula-câmara-válvula através do uso das técnicas da microfluídica.

Sistema Válvula-Câmara-Válvula

6.1. Microfluídica

Tendo em conta a necessidade de continuar a explorar o uso da impressão 3D e, uma vez que se pretende sistemas de pequenas dimensões com alta resolução, recorreu-se ao uso das técnicas utilizadas no trabalho anterior [1].

A microfluídica é definida como a ciência e tecnologia dos sistemas que processam e/ou manipulam pequenas quantidades de fluidos (10^{-9} a 10^{-8} litros) através do uso de canais com dimensões na ordem dos micrómetros [19]. Normalmente, o processo consiste na fabricação de um *chip*, sendo que este se baseia num conjunto de microcanais gravados ou moldados num material flexível (polímero).

Os microssistemas são cada vez mais aplicados em *LoC* (do inglês, “*Lab-on-Chip*”) para a análise de substâncias biológicas, químicas e biomédicas. Este tipo de sistemas, para além da maior vantagem ser as pequenas dimensões que apresentam, possuem não só uma produção e operação de baixo custo, como também permitem uma maior portabilidade e controlo multifuncional com um menor gasto energético [8].

Ora, tendo em conta a nova configuração do sistema (ver subsecção 4.1) e os dois modelos diferentes de válvulas escolhidos (ver subsecção 5.1) desenvolveu-se os desenhos dos dois sistemas válvula-câmara-válvula (TV1-CAM e TV3-CAM) para serem gravados nos *chips*. Na figura 6.1 observam-se os desenhos destes dois sistemas, sendo cada um deles constituído por uma câmara de trabalho ($20 \times 10 \times 0.5$ mm) e um conjunto de válvulas de entrada/saída.

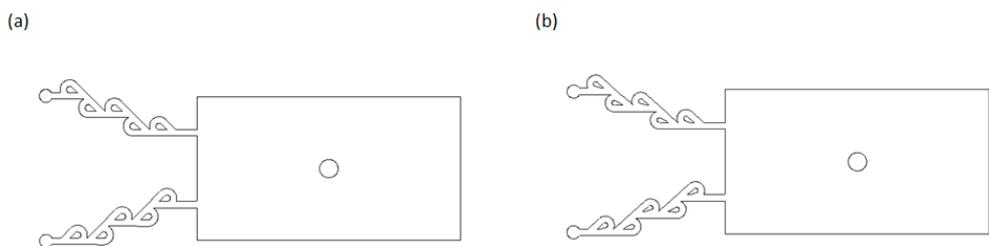


Figura 6.1 – Desenhos dos dois sistemas válvula-câmara-válvula (desenvolvidos através de um software tipo CAD): sistema TV1-CAM em (a) e TV3-CAM em (b). Em ambos os sistemas, ao centro da câmara está desenhado um pilar para evitar a deformação do PDMS nesta zona menos espessa (e, portanto, mais flexível) e manter a profundidade de 500 μm da câmara.

6.2. Método de Fabricação

Tal como no trabalho anterior, na fabricação dos componentes dos sistemas foram utilizados dois materiais: o SU-8 e o PDMS. Todo o processo pode ser dividido em duas etapas principais, cujas respetivas descrições são apresentadas de seguida.

Molde SU-8

A primeira etapa corresponde à produção de um molde SU-8. O SU-8 é um fotoresiste do tipo “positivo” ou “negativo” que ao ser exposto à luz ultravioleta (UV) forma ligações químicas irreversíveis, o que lhe confere uma estrutura molecular rígida. Se for do tipo “positivo”, as áreas expostas à luz através da máscara (fotólito) tornam-se solúveis quando se realiza a revelação. Caso contrário, se for do tipo “negativo”, as áreas expostas tornam-se insolúveis (Figura 6.2).

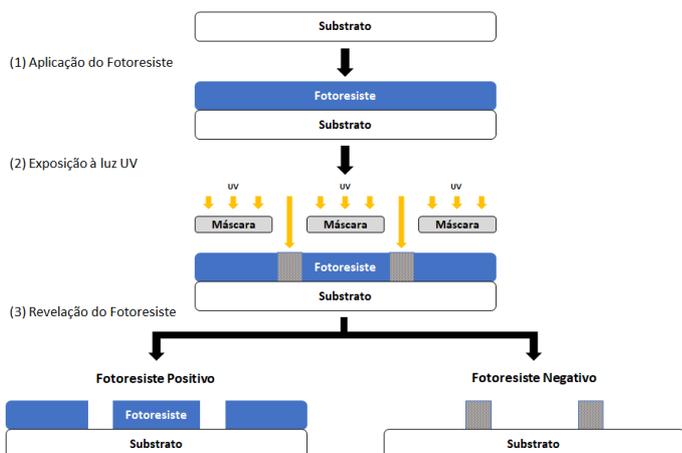


Figura 6.2 – Esquema do processo de exposição do fotoresiste SU-8 à luz UV. Adaptado de [20].

Apesar de possuir um custo elevado, este fotoresiste garante uma boa reprodutibilidade de padrões, sendo por isso muito utilizado neste tipo de processos.

A produção do molde consiste em 6 passos (Figura 6.3):

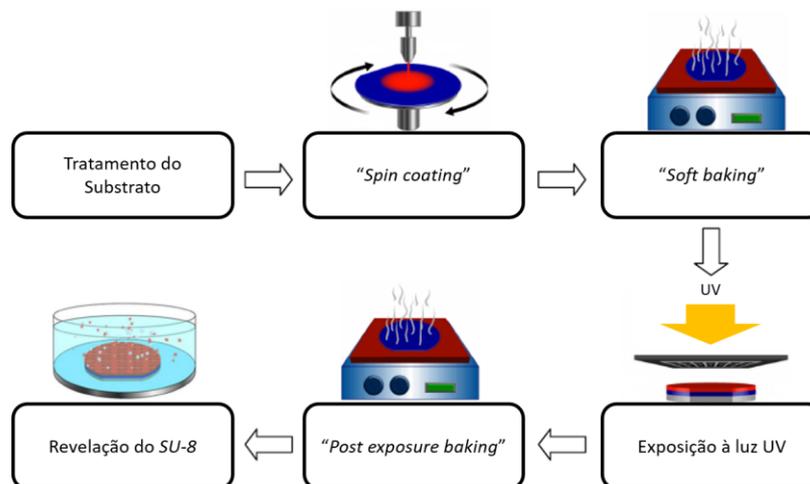


Figura 6.3 – Esquema dos 6 passos para a fabricação do molde SU-8. Adaptado de [21].

- **Tratamento do substrato**

Como substrato utilizou-se uma bolacha de Silício ("Wafer") com 100 mm de diâmetro. Na primeira fase do tratamento realizou-se a lavagem da bolacha com IPA e água. De seguida, procedeu-se à secagem da mesma com azoto e colocou-se numa placa de aquecimento a 180 °C durante aproximadamente 10 min, de modo a garantir a evaporação total da água presente na sua superfície. Este último passo é considerado o mais importante, uma vez que só a secagem total do substrato permite que haja uma maior adesão do fotoresiste ao mesmo. Posto isto, para dar continuidade ao processo, é necessário que o substrato arrefeça até à temperatura ambiente.

- **Revestimento do substrato com SU-8**

Uma vez concluída a limpeza do substrato, este apresenta todas as condições para que se efetue o processo de revestimento através da técnica "Spin coating". Após a colocação da bolacha no centro do *spin coater*, depositou-se uma pequena quantidade do fotoresiste SU-8 do tipo "negativo" sobre o centro da mesma (Figura 6.4). De seguida, o fotoresiste é espalhado pela superfície do substrato através da rotação do *spin coater*, originando uma camada uniforme com uma determinada espessura. Tendo em conta que a espessura desejada para definir a profundidade do sistema é de 500 µm, utilizou-se o fotoresiste SU-8 2150. Assim, o processo decorreu a uma velocidade de rotação de cerca de 1400 rpm (gráfico da figura 6.5) durante aproximadamente 30 s.

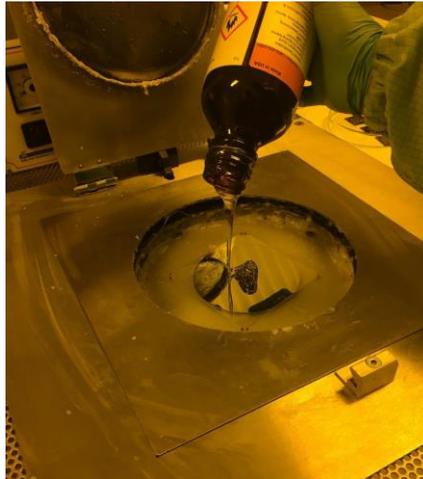


Figura 6.4 – Deposição do fotoresiste SU-8 do tipo “negativo” sobre o centro da bolacha de Si antes da realização da técnica “*Spin coating*”.

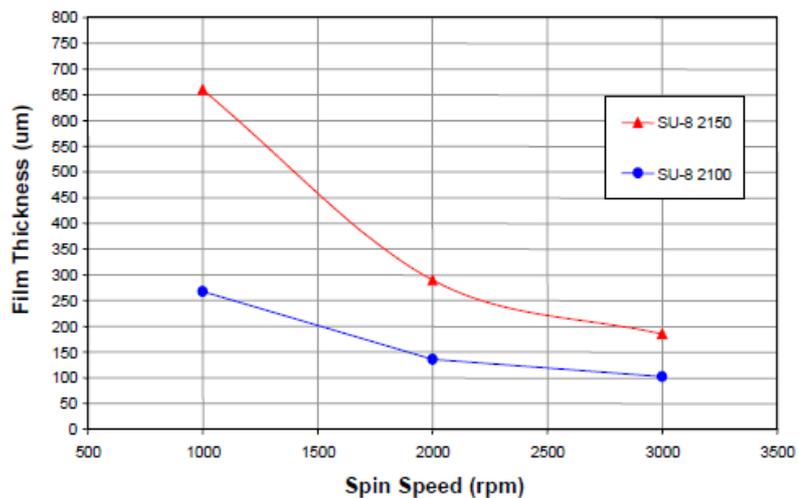


Figura 6.5 – Gráfico da velocidade de rotação do *spin coater* conforme a espessura da camada desejada do fotoresiste SU-8 [22].

- **Cura pré-exposição**

Assim que esteja terminado o processo de revestimento do substrato, é necessário que este seja submetido a um primeiro processo de cura (“*Soft baking*”). Este processo, dividido em duas etapas, permite a evaporação do solvente existente no fotoresiste SU-8 para que este adquira uma maior solidez. Primeiramente, colocou-se a bolacha numa placa de aquecimento a 65 °C durante aproximadamente 9 min e, de seguida, numa placa de aquecimento a 95 °C durante aproximadamente 110 min. Posteriormente, a bolacha terá de arrefecer até à temperatura ambiente.

- **Exposição à luz UV (fotolitografia)**

A gravação dos sistemas no substrato é efetuada com base na fotolitografia. Assim, colocou-se a bolacha revestida com SU-8 e a máscara (Figura 6.6) de acetato no alinhador MA6 (Suss MicroTech, Alemanha). Tendo em conta que o fotoresiste utilizado absorve uma luz de comprimento de onda inferior a 365 nm, houve a necessidade de utilizar um filtro (G180336, Suss MicroTech, Alemanha) para obter o comprimento de onda adequado para a realização do processo. Após uma espera de cerca de 20 min para que a lâmpada aquecesse e uma vez obtido um fluxo constante de ar no alinhador, o substrato esteve exposto a uma energia de 550 mJ/cm² durante aproximadamente 250 s.

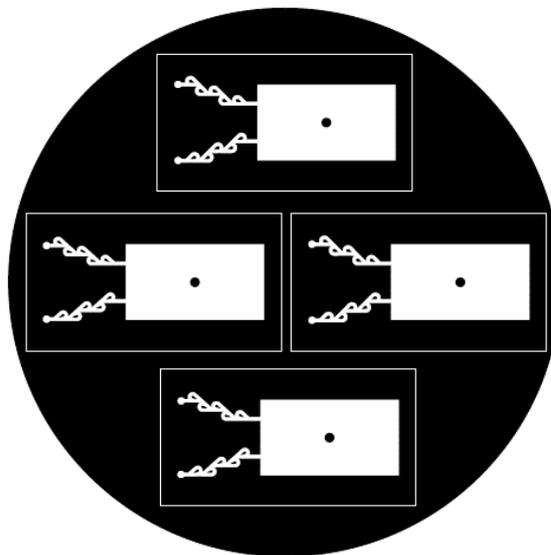


Figura 6.6 – Desenho da máscara de acetato com os dois sistemas (TV1-CAM e TV3-CAM) a serem gravados no substrato da bolacha revestida com o fotoresiste SU-8 2150 (com base na fotolitografia).

- **Cura pós-exposição**

A exposição à luz UV provoca a ativação dos componentes fotoativos presentes no fotoresiste. Deste modo, é preciso submeter o substrato a um segundo processo de cura (“*Post exposure baking*”). Este possui a energia necessária para fortalecer as ligações químicas do SU-8 e deve ser realizado o mais rapidamente possível após a exposição, de modo a evitar que ocorra qualquer alteração no perfil do sistema devido à migração dos componentes fotoativos para as zonas que não foram expostas à radiação. Tal como o primeiro, este segundo processo de cura divide-se em duas etapas. Primeiramente, colocou-se a bolacha numa placa de aquecimento a 65 °C durante aproximadamente 5 min e, de seguida, numa placa de aquecimento a 95 °C durante aproximadamente 30 min. Durante esta última etapa, deverá tornar-se visível a olho nu o(s) padrão(ões) transferido(s) para o fotoresiste. Se porventura tal não

aconteça, significa que o tempo de exposição não foi o adequado. Posteriormente, a bolacha terá de arrefecer até à temperatura ambiente.

- **Revelação do SU-8**

A revelação do fotoresiste deve ser realizada o mais rapidamente possível após a segunda cura do substrato. Assim, o substrato é submerso no revelador “*Propylene glycol monomethyl ether acetate*” (solução de revelação própria para o SU-8) durante aproximadamente 30 min. De modo a facilitar a dissolução de todo o perfil dos sistemas, colocou-se o conjunto substrato-revelador numa placa vibratória. Concluído o tempo de revelação estipulado, realizou-se a lavagem do substrato com IPA para retirar o revelador. Antes de se proceder à secagem da bolacha com azoto, deve-se verificar que não existe a formação de um composto esbranquiçado quando se junta o IPA ao fotoresiste, uma vez que o seu aparecimento significa que o tempo de revelação não foi o adequado. Para retirar esse composto é necessário repetir todo o processo de revelação, desde o banho na solução reveladora até à lavagem do substrato com IPA. O molde final com os modelos dos sistemas gravados encontra-se representado na figura 6.7

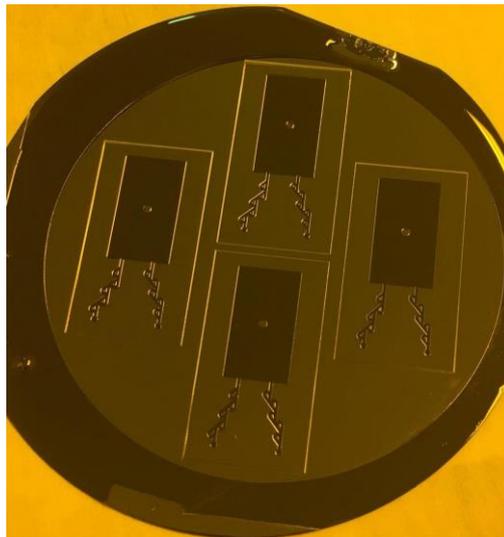


Figura 6.7 – Molde final em SU-8 com os modelos dos sistemas gravados (TV1-CAM e TV3-CAM).

Chips PDMS

A segunda etapa corresponde à produção dos *chips* PDMS que constituem o produto final, posteriormente, testado. O PDMS (polidimetilsiloxano) é um polímero mineral orgânico utilizado, maioritariamente, na fabricação e prototipagem de *chips* de pequenas dimensões. A utilização deste material na microfluídica tem vindo a crescer, surgindo assim como alternativa à “*hard lithography*”, uma vez que possui uma capacidade de réplica espetacular permitindo a produção

em massa de estruturas com altas resoluções a um custo reduzido. Adicionalmente, este polímero apresenta características relevantes como a capacidade de se ligar firmemente ao vidro ou a outra camada de PDMS, permitindo a produção de dispositivos multicamadas devido à sua flexibilidade, à transparência ótica que facilita a observação de conteúdos presentes nos micro-canais e à grande estabilidade térmica, sendo assim a sua utilização considerada uma grande vantagem nesta área. Por outro lado, à parte do contexto deste projeto, o PDMS pode ser utilizado como aditivo alimentar (E900), em *shampoos* e como agente anti-espumante em bebidas e/ou óleos lubrificantes [23].

A produção da réplica é efetuada através do molde SU-8 e consiste em 5 passos (Figura 6.8):

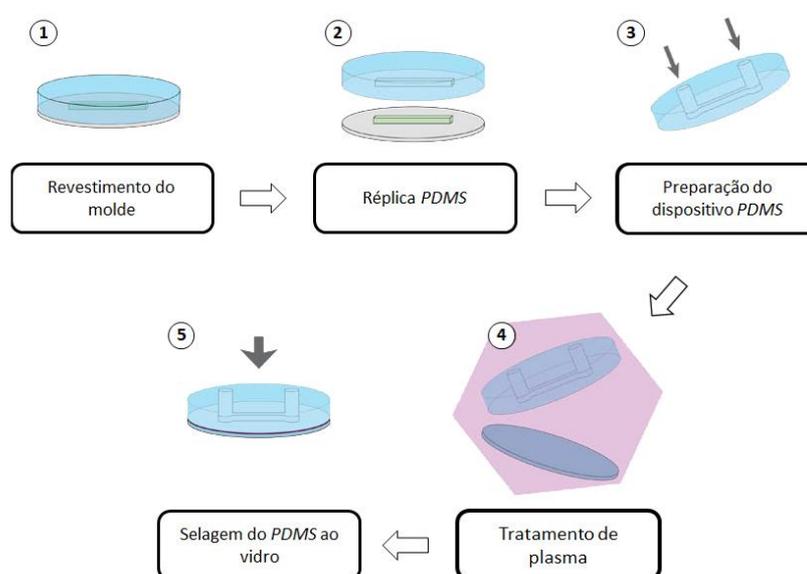


Figura 6.8 – Esquema dos 5 passos para a fabricação da réplica PDMS. Adaptado de [24].

- **Revestimento do molde**

Inicialmente, colocou-se o molde SU-8 numa caixa de *Petri* revestida com papel de alumínio, de modo a prevenir a adesão do PDMS ao vidro da caixa. De seguida, depositou-se sobre o molde o PDMS líquido resultante da mistura de uma base e um agente de reticulação numa razão de 10:1. Note-se que antes da deposição deve-se colocar a mistura líquida no exsiccador, durante aproximadamente 60 min, para remover as bolhas de ar existentes na mesma.

- **Réplica PDMS**

Logo após o revestimento, é necessário submeter o PDMS a um processo de cura, através do qual este passa do estado líquido para o estado sólido e fica com um aspeto

semelhante a borracha. Assim, colocou-se a caixa de *Petri* com o conjunto molde-PDMS no forno a 80 °C durante aproximadamente 120 min.

- **Preparação do dispositivo PDMS**

Depois do conjunto molde-PDMS arrefecer até à temperatura ambiente, retirou-se da caixa de *Petri* o PDMS sólido resultante e procedeu-se com a preparação dos *chips* individuais (note-se que foram produzidos dois *chips* de cada um dos sistemas). Assim, cortou-se a réplica no tamanho desejado para cada um dos *chips* e de modo a permitir a injeção de fluidos em testes futuros, as entradas e saídas dos canais de cada sistema válvula-câmara-válvula foram perfuradas com um perfurador específico com uma largura igual à dos tubos de conexão (tubos de *Tygon*), posteriormente, usados.

- **Tratamento de plasma**

Após concluído o processo anterior, é necessário submeter os *chips* individuais e os vidros que possuem as resistências de aquecimento (ver seção 4) a um tratamento de plasma de oxigénio (*Plasma Eletronic Buck Technologien*, Alemanha) para permitir a selagem entre estes dois materiais. Assim, ambos os materiais foram colocados na câmara de oxidação a uma pressão de 0.8 mbar durante aproximadamente 20 min (note-se que antes do processo de oxidação, os vidros são limpos com IPA e água e secos com azoto).

- **Selagem do PDMS ao vidro**

A selagem dos *chips* PDMS aos vidros deve ser realizada o mais rapidamente possível após o tratamento de plasma. Deste modo, as superfícies oxidadas dos dois materiais são colocadas em contacto e formam uma ligação irreversível entre elas, que garante a estanquicidade ideal para prevenir qualquer tipo de fuga em testes futuros.

6.3. Ensaios Experimentais e Resultados

A fim de testar uma vez mais as resistências de aquecimento e verificar o princípio de funcionamento dos sistemas TV1-CAM e TV3-CAM, desenvolveu-se a montagem experimental da figura 6.9. Esta é constituída por um conjunto vidro-*chip* que se encontra conectado através de tubos a dois reservatórios (gobelés) com água. O reservatório de entrada contém água com corante alimentar (de modo a facilitar a visualização do deslocamento do fluido nos canais das válvulas), enquanto o reservatório de saída contém água normal e, ambos, estão conectados às válvulas de entrada (sendo esta representada na figura 6.9 como a válvula de cima) e saída (sendo esta representada na figura 6.9 como a válvula de baixo), respetivamente. O objetivo

desta montagem, à semelhança da montagem experimental apresentada anteriormente (ver subsecção 4.4), é testar se é possível transferir água com corante do reservatório de entrada para o reservatório de saída.

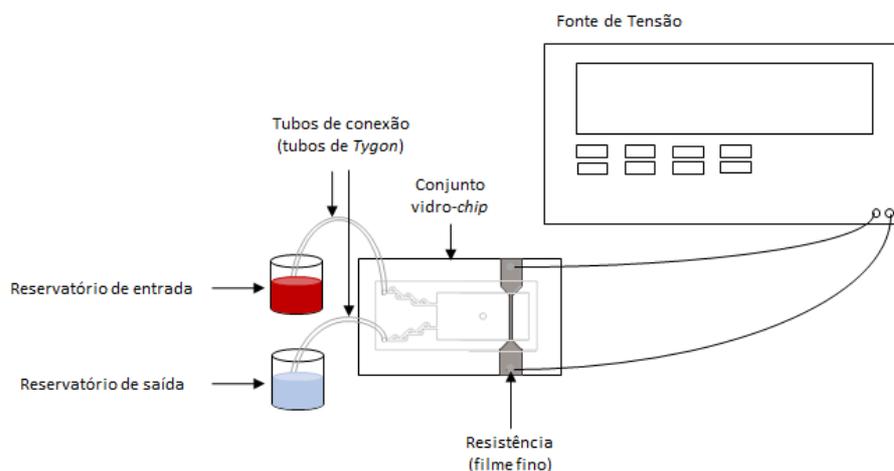


Figura 6.9 – Esquema da montagem experimental desenvolvida para testar as resistências de aquecimento e verificar o princípio de funcionamento dos sistemas TV1-CAM e TV3-CAM. Conjunto vidro-*chip* conectado aos reservatórios de entrada e saída de água. Adicionou-se corante alimentar à água presente no reservatório de entrada, de modo a facilitar a visualização do deslocamento do fluido nos canais das válvulas.

Como procedimento, inicialmente, é necessário encher o sistema (válvulas e câmara) e os tubos com água (sem corante) e, de seguida, colocar os reservatórios à entrada e saída do sistema. Ao ligar-se a fonte de tensão que alimenta a resistência de aquecimento, esta aquece e permite que parte da água presente na câmara evapore. Uma vez que a pressão no interior da câmara aumenta, a restante água é “empurrada” através dos canais das válvulas para a saída (fase de aquecimento). Ao desligar-se a fonte de tensão, a pressão na câmara diminui e permite o reenchimento da mesma com água através dos canais das válvulas desde a entrada (fase de arrefecimento).

Sistema TV1-CAM

Aos *chips* com o sistema TV1-CAM foram selados os vidros com os filmes DF3 e DF4 (ver subsecção 4.3). A partir dos testes realizados, verificou-se que ambas as resistências demonstraram provas de funcionamento, tendo sido possível a evaporação/condensação de parte da água presente na câmara aquando os ciclos de aquecimento/arrefecimento, respetivamente. Contudo, no geral, não foi possível obter resultados concretos relativamente ao sistema em questão, uma vez que as válvulas de ambos os *chips* não funcionaram de acordo com o princípio de funcionamento das mesmas, nomeadamente a válvula de saída na qual não se verificou qualquer circulação de água por razões desconhecidas.

Sistema TV3-CAM

Aos *chips* com o sistema TV3-CAM foram selados os vidros com os filmes DF1 e DF2 (ver subsecção 4.3). A partir dos testes realizados, não foi possível obter resultados concretos relativamente ao sistema associado ao filme DF1, uma vez que este apresentou o mesmo tipo de anomalia que o sistema TV1-CAM.

Já o sistema associado ao filme DF2, no geral, demonstrou provas de funcionamento. Nas fases de aquecimento, a resistência foi capaz de evaporar parte da água presente na câmara e, assim, a restante água foi “empurrada” através dos canais das válvulas para a saída, tendo sido expulsa com maior facilidade pela válvula de saída, uma vez que o sentido do fluxo corresponde ao sentido direto desta válvula. Nas fases de arrefecimento, a água reentrou na câmara através dos canais das válvulas desde a entrada, tendo reentrado com maior facilidade pela válvula de entrada, de acordo com o mesmo raciocínio. Através de um vídeo gravado durante o funcionamento do sistema, foi possível calcular as variações de volume da água que circulou nas válvulas de entrada e saída durante o processo de aquecimento/arrefecimento da mesma, sabendo em cada um dos ciclos as respetivas distâncias percorridas pela água nos tubos de conexão. Por exemplo, na primeira fase de aquecimento ocorreu uma variação de volume de água nas válvulas de entrada e saída aproximadamente igual a 3.2 mm^3 e 4.9 mm^3 (correspondente a uma distância de cerca de 11 mm e 17 mm, respetivamente), como ilustrado na sequência de imagens da figura 6.10 para a figura 6.11 (note-se que a seta desenhada nesta última figura representa o sentido em que ocorre o deslocamento do fluido). Por sua vez, na primeira fase de arrefecimento ocorreu uma variação de volume de água nas válvulas de entrada e saída aproximadamente igual a 5.7 mm^3 e 1.3 mm^3 (correspondente a uma distância de cerca de 20 mm e 5 mm, respetivamente), como ilustrado na sequência de imagens da figura 6.11 para a figura 6.12. As variações calculadas comprovam o princípio de funcionamento descrito anteriormente, uma vez que na fase de aquecimento, a água no estado líquido foi expulsa da câmara com maior facilidade pela válvula de saída do que pela válvula de entrada e na fase de arrefecimento, a água no estado líquido reentrou na câmara com maior facilidade pela válvula de entrada do que pela válvula de saída. Desta forma, ao fim de alguns ciclos de evaporação-condensação (cerca de 3), foi possível transferir um volume de água com corante vermelho aproximadamente igual a 10 mm^3 do reservatório de entrada para o reservatório de saída (Figura 6.13). Através do vídeo, foi igualmente possível calcular as velocidades correspondentes ao processo de aquecimento/arrefecimento da água, sabendo o tempo decorrido em cada uma das fases e as respetivas distâncias percorridas pela água nos tubos de conexão. Ora, a velocidade média foi de aproximadamente 2.9 mm/s para o processo de aquecimento e 4.5 mm/s para o processo de arrefecimento, sendo que a razão entre estas é de aproximadamente 1.6. Para estas velocidades obteve-se um número de Reynolds de 1.4 e 2.2 (ambos os valores correspondem ao regime laminar) e um caudal de $0.7 \text{ mm}^3/\text{s}$ e $1.1 \text{ mm}^3/\text{s}$, respetivamente. Além disso, tendo em conta o filme utilizado (DF2) e os valores de tensão e corrente atingidos (9.6 V e 166 mA), obteve-se um fluxo aproximadamente igual a $0.3 \text{ W}/\text{mm}^2$.

Com estes resultados, é possível afirmar que o princípio de funcionamento do sistema TV3-CAM foi alcançado. Para este modelo de válvulas foram obtidos valores experimentais de diodicidade entre 2 e 17. O valor mais alto foi alcançado no processo de arrefecimento, no qual houve inicialmente um deslocamento muito rápido do fluido na válvula de entrada, correspondente a um número de Reynolds de cerca de 2.6, comparativamente ao deslocamento quase

nulo na válvula de saída. Foi também no processo de arrefecimento que foram atingidas velocidades superiores, reforçando a ideia de que o aquecimento utilizado ainda é bastante lento. Da mesma forma, à semelhança do que foi verificado a partir dos testes anteriormente realizados (ver subsecção 4.4), no processo de aquecimento da água, a água evaporada não foi capaz de preencher e, posteriormente, esvaziar todo o volume da câmara. Logo, apesar de todo o sucesso alcançado, o sistema precisa de ser melhorado, nomeadamente, no que diz respeito ao tipo de aquecimento utilizado, uma vez que os processos de evaporação-condensação foram realizados com uma dinâmica mais lenta do que a desejada, obrigando a um gasto de energia ainda muito elevado.

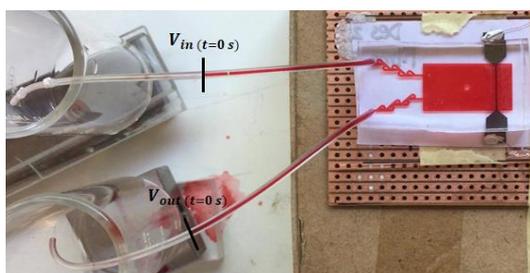


Figura 6.10 – Sistema TV3-CAM associado ao filme DF2: processo de evaporação-condensação da água (t=0 s).

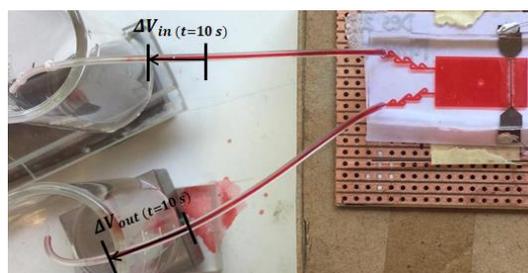


Figura 6.11 – Sistema TV3-CAM associado ao filme DF2: deslocamento do fluido após a primeira fase de aquecimento (t=10 s).

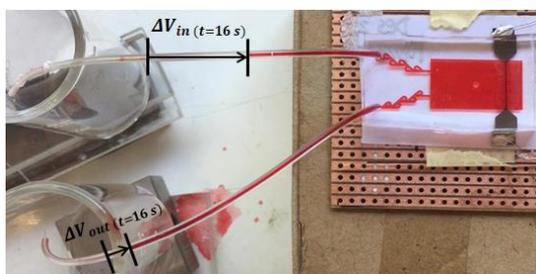


Figura 6.12 – Sistema TV3-CAM associado ao filme DF2: deslocamento do fluido após a primeira fase de arrefecimento (t=16 s).



Figura 6.13 – Sistema TV3-CAM associado ao filme DF2: após 3 ciclos de evaporação-condensação da água (t=28 s).



Conclusão

Neste trabalho, desenvolveu-se uma montagem experimental, um sistema de aquisição e uma interface gráfica para permitir a medição e apresentação simultânea e em tempo real dos parâmetros mais importantes para o este estudo, nomeadamente, a característica Pressão-Caudal de uma válvula e a quantidade de massa de água transferida pelo sistema. Válvulas *Tesla* foram construídas através da impressão 3D. Para o aquecimento foram produzidas resistências de filmes finos. Foram também produzidos sistemas válvula-câmara-válvula com configurações *a priori* mais favoráveis ao bombeamento do fluido no estado líquido através de ciclos de evaporação-condensação.

O desenvolvimento da montagem experimental exigiu, inicialmente, a escolha dos sensores mais adequados para integrar no sistema e, assim, efetuar a calibração para medir a quantidade de massa de água transferida pelo mesmo. Desta forma, para a medição da pressão usou-se o sensor de pressão MPX5100DP. Para a medição do nível de água num reservatório, inicialmente, testou-se dois sensores de nível: o sensor de nível de água e o sensor de humidade de solo. Embora estes dois sensores sejam específicos para esta tarefa, a partir dos testes realizados, verificou-se que ambos demonstraram possuir uma inconstante reprodutibilidade em medir variações de nível muito pequenas, o que nos impossibilita de obter as medidas precisas desejadas. Como tal, optou-se por utilizar um sensor de pressão adaptado à medição de nível. A partir dos testes realizados, verificou-se que o princípio de funcionamento do sensor como medidor de nível foi alcançado, demonstrando uma boa e constante reprodutibilidade entre medidas, o que nos possibilita de obter as medidas com a precisão desejada. Uma vez escolhidos os sensores, desenvolveu-se a montagem experimental. A calibração do sistema realizou-se tendo em conta os 3 modos independentes através dos quais é possível calcular a massa de água transferida pelo sistema. As medidas efetuadas reforçam a boa reprodutibilidade e precisão do sensor de pressão como medidor de nível. Ora, tendo em conta que futuramente o objetivo é transferir água de um reservatório de entrada para um reservatório de saída através do sistema válvula-câmara-válvula, este sensor é o único viável para a medida desta grandeza. No entanto, uma outra solução a considerar é a construção de uma mini balança digital através do uso, por exemplo,

de um sensor de força que possa ser associado à placa com o microcontrolador Arduino. A interface gráfica desenvolvida em LabView funciona como uma plataforma de comunicação com o utilizador, através da qual este tem acesso direto aos dados lidos pelos sensores.

A produção de válvulas *Tesla* através da impressão 3D, teve como objetivo principal encontrar um método de fabricação com uma boa reprodutibilidade aliada a uma rápida prototipagem para obter produtos com alta resolução num intervalo de tempo reduzido. Foram produzidas 3 peças com o conjunto de válvulas de entrada/saída com o modelo TV1-5: duas peças “one side” (Peça 1 e 2) e uma peça “full 3D” (Peça 3). As Peças 1 e 2 correspondem a peças nas quais as válvulas são impressas apenas num dos lados das mesmas e a Peça 3 corresponde a uma peça na qual as válvulas são totalmente integradas na mesma. A partir dos testes realizados, verificou-se que as válvulas da Peça 1 não evidenciaram qualquer existência de diodicidade. Na Peça 2 foi evidente a existência de diodicidade, sendo a válvula de saída melhor que a válvula de entrada e, por isso, foi possível afirmar que a válvula de saída possui uma diodicidade superior a 2. Já na Peça 3 foi evidente a existência de diodicidade apenas na válvula de entrada, sendo possível afirmar que a mesma possui uma diodicidade superior a 2. No entanto, em todas as peças impressas, os valores de caudal volúmico obtidos foram muito pequenos correspondendo a números de Reynolds muito baixos, o que pode justificar a não evidência de diodicidade. Além disso, existe uma inconstante reprodutibilidade entre medidas das válvulas de entrada/saída. Desta forma, conclui-se que não foi alcançada a precisão ideal e essencial na produção deste tipo de válvulas e, por isso, é necessário continuar a explorar o uso desta técnica na produção de materiais de pequena escala, para que a mesma seja aprovada como método alternativo à microfluídica.

Para o aquecimento foram produzidas resistências de filmes finos através da evaporação assistida a vácuo por canhão de elétrons. Foram produzidos 4 tipos de filmes que diferem no comprimento e largura da pista. A partir dos testes realizados, verificou-se que todas as resistências demonstraram provas de funcionamento, tendo sido possível a evaporação/condensação de parte da água presente na câmara aquando os ciclos de aquecimento/arrefecimento, respetivamente. No entanto, verificou-se que no processo de aquecimento da água, a água evaporada não foi capaz de preencher e, posteriormente, esvaziar toda a câmara, estimando-se a olho nu que apenas foi possível esvaziar 1/10 do volume da mesma. Verificou-se também que as velocidades no processo de aquecimento/arrefecimento, foram sempre menores durante o aquecimento da água, o que indica que este ainda é bastante lento e, por isso, pouco eficaz. Logo, é necessário otimizar o tipo de aquecimento utilizado, uma vez que os processos de evaporação-condensação foram realizados com uma dinâmica mais lenta do que a desejada, obrigando a um gasto de energia ainda muito elevado.

Através da microfluídica, foram produzidos sistemas válvula-câmara-válvula com novas configurações relativamente às dimensões da câmara com os modelos TV1-CAM e TV3-CAM. Os *chips* PDMS produzidos foram selados aos vidros posteriormente a um tratamento de plasma de oxigénio. No geral, apenas o sistema TV3-CAM associado ao filme DF2 demonstrou provas de funcionamento. Através deste foi possível transferir um volume de água de aproximadamente 10 mm³ do reservatório de entrada para o reservatório de saída. As válvulas em questão funcionaram de acordo com o seu princípio, tendo sido alcançado valores de diodicidade entre 2 e 17.

Comparativamente aos resultados obtidos anteriormente, estes valores são bastante encorajadores.

Assim, as melhorias propostas a serem exploradas e desenvolvidas, de modo a permitir a continuidade deste trabalho, são as seguintes:

- Otimização da montagem experimental desenvolvida para permitir a medição da pressão e da temperatura no interior da câmara de trabalho, de modo a facilitar a análise de dados;
- Revalidação do uso do sensor de nível de água, considerando a margem de erro correspondente ao mesmo, para medir o nível de água num reservatório;
- Construção de uma mini balança digital através do uso, por exemplo, de um sensor de força que possa ser associado à placa com o microcontrolador Arduino;
- Otimização da interface gráfica desenvolvida;
- Continuação do uso da impressão 3D, a fim de melhorar a produção das válvulas e, posteriormente, proceder com a produção de sistemas válvula-câmara-válvula para que haja um termo de comparação com os sistemas produzidos através da microfluídica;
- Otimização do aquecimento utilizado para minimizar a ocorrência de perdas de calor acentuadas.

Posto isto, as implementações dos passos em cima mencionados permitirão novos avanços que, conseqüentemente, proporcionarão uma otimização geral de tudo o que já foi realizado. Desta forma, a adaptação do circulador às temperaturas criogénicas tornar-se-á o foco mais importante do estudo para que o primeiro e principal objetivo seja obtido com sucesso.



Referências Bibliográficas

- [1] S. D. S. Alves, “Desenvolvimento de um novo circulador de líquido milimétrico,” Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- [2] “maxresdefault.jpg (1280×720).” [Online]. Available: <https://i.ytimg.com/vi/fgFV6dw7pZ0/maxresdefault.jpg>. [Accessed: 30-Jan-2018].
- [3] A. Vorgelegt, I. Hauptberichter, G. Prof, and S. Tag, “Thermo-hydrodynamics of Closed Loop Pulsating Heat Pipes,” Von der Fakultat Maschinenbau der Universität Stuttgart, 2004.
- [4] “2003_May_A4_Figure1.jpg (600×314).” [Online]. Available: https://electronics-cooling.com/wp-content/uploads/2003/05/2003_May_A4_Figure1.jpg. [Accessed: 26-Jan-2018].
- [5] P. Gully *et al.*, “Thermal behavior of a cryogenic loop heat pipe for space application,” *Cryogenics (Guildf)*, vol. 51, no. 8, pp. 420–428, 2011.
- [6] M. J. Simon, V. M. Bright, R. Radebaugh, and Y. C. Lee, “An analytical model for a piezoelectric axially driven membrane microcompressor for optimum scaled down design,” *J. Mech. Des. Trans. ASME*, vol. 134, no. 1, 2012.
- [7] B. D. Iverson and S. V. Garimella, “Recent advances in microscale pumping technologies: A review and evaluation,” *Microfluid. Nanofluidics*, vol. 5, no. 2, pp. 145–174, 2008.
- [8] *Microfluidics and Nanofluidics - Theory and Selected Applications*. .
- [9] “Magneto Hydrodynamic Propulsion.” [Online]. Available: <https://www.brighthubengineering.com/naval-architecture/60576-how-can-a-ship-be-moved-by-magneto-hydrodynamic-propulsion/>. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [10] L. A. Magnetohidrodin and M. H. D. Cuando, “DI X X=a,” pp. 172–201.
- [11] K. W. Oh and C. H. Ahn, “A review of microvalves,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 16, no. 5, 2006.
- [12] S. Zhang, S. H. Winoto, and H. T. Low, “Performance Simulations of Tesla Microfluidic Valves,” *Asme*, pp. 1–5, 2007.
- [13] “Reynolds-Number.png (563×284).” [Online]. Available: <https://www.nuclear-power.net/wp-content/uploads/2016/05/Reynolds-Number.png?6dcd30>. [Accessed: 22-Jan-2018].

- [14] JONATHAN BEHRENS, NIWTON GABRIEL FELICIANI DOS SANTOS, GUILHERME SEBASTIÃO DA SILVA, and JUMAR LUIZ RUSSI, “Desenvolvimento De Um Sensor Resistivo Para Monitoramento Do Nível Da Lâmina De Água Em Lavouras De Arroz,” *Proc. XXII Congr. Bras. Automática*, 2018.
- [15] “How to Use the Water Level Sensor - Arduino Tutorial: 5 Steps.” [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/How-to-use-a-Water-Level-Sensor-Arduino-Tutorial/>. [Accessed: 10-Apr-2018].
- [16] “Sensor de umidade do solo: para que serve e como funciona | Blog Irrigat.” [Online]. Available: <https://www.irrigat.com.br/sensor-de-umidade-do-solo-para-que-serve-e-como-funciona/>. [Accessed: 02-Oct-2019].
- [17] F. P. Incropera, D. P. Dewit, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, “*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*,” 6th editio. 2007.
- [18] Formlabs Inc., “The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing,” no. March, pp. 1–23, 2017.
- [19] G. M. Whitesides, “The origins and the future of microfluidics,” *Nature*, vol. 442, no. 7101, pp. 368–373, 2006.
- [20] “File:Photoresist of Photolithography.png - Wikimedia Commons.” [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoresist_of_Photolithography.png. [Accessed: 23-Jan-2019].
- [21] “SU-8-photolithography-process-chart.png (776×684).” [Online]. Available: <https://www.elflow.com/wp-content/uploads/2014/11/SU-8-photolithography-process-chart.png>. [Accessed: 15-Feb-2019].
- [22] Microchem, “SU-8 2000 (100-150) Negative Photoresist Datasheet,” 2000.
- [23] “PDMS: A review - Elveflow.” [Online]. Available: <https://www.elflow.com/microfluidic-tutorials/microfluidic-reviews-and-tutorials/the-poly-di-methyl-siloxane-pdms-and-microfluidics/>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [24] “PROCESS-MOLDING-SINGLE-LAYER-PDMS-DEVICE-copie.png (500×536).” [Online]. Available: <https://www.elflow.com/wp-content/uploads/2012/04/PROCESS-MOLDING-SINGLE-LAYER-PDMS-DEVICE-copie.png>. [Accessed: 21-Feb-2019].
- [25] N. X. P. Semiconductors, D. Sheet, and T. Data, “Pressure Sensors,” 2018.
- [26] Hydro Spares, “Water Level Sensor,” 2017.
- [27] NXP and F. Semiconductors, “MP3V5050, 0 to 50 kPa, Differential, and Gauge Pressure Sensor,” *Datasheet, Tech. Data*, pp. 1–14, 2015.

9.1. Anexo A: Datasheet do Sensor MPX5100DP

Nas figuras 9.1 e 9.2 apresenta-se a descrição geral e a tabela de valores das propriedades mecânicas e elétricas para diferentes tipos de sensor pertencentes à gama MPX5100¹.

1 General Description

1.1 MPX5100AP/DP/GP Block diagram

Figure 1 shows a block diagram of the internal circuitry integrated on a pressure sensor chip in a unibody package.

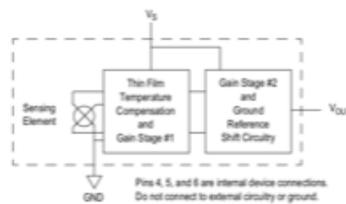


Figure 1. Integrated pressure sensor block diagram

1.2 MPX5100AP/DP/GP Pinout (Unibody)

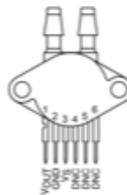


Figure 2. Device pinout (top view)

Table 1. Pin functions

Pin	Name	Function
1	V_{OUT}	Output voltage
2	GND	Ground
3	V_S	Voltage supply
4	DNC	Do not connect to external circuitry or ground.
5	DNC	Do not connect to external circuitry or ground.
6	DNC	Do not connect to external circuitry or ground.

MPX5100

Sensors
NXP Semiconductors, B.V.

3

Figura 9.1 – Descrição geral para diferentes tipos de sensor pertencentes à gama MPX5100.

¹ Para uma consulta mais pormenorizada ver Datasheet em [25].

2 Mechanical and Electrical Specifications

2.1 Maximum ratings

Table 3. Maximum ratings⁽¹⁾

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum pressure	P_{max}	400	kPa
Storage temperature	T_{stg}	-40 to +125	°C
Operating temperature	T_A	-40 to +125	°C

1. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

2.2 Operating characteristics

Table 4. Operating characteristics ($V_S = 5$ Vdc, $T_A = 25$ °C.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure range ⁽¹⁾	P_{OP}	0	—	100	kPa
Gauge, differential: MPX5100G/MPX5100G		15	—	115	
Absolute: MPX5100AP					
Supply voltage ⁽²⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	V _{DC}
Supply current	I_O	—	7.0	10	mA _{dc}
Minimum pressure offset ⁽³⁾ , (0 to 85 °C) @ $V_S = 5.0$ V	V_{OFF}	0.088	0.20	0.313	V _{DC}
Full-scale output ⁽⁴⁾ , differential and absolute (0 to 85 °C) @ $V_S = 5.0$ V	V_{FSO}	4.587	4.700	4.813	V _{DC}
Full-scale Span ⁽⁵⁾ , differential and absolute (0 to 85 °C) @ $V_S = 5.0$ V	V_{FSS}	—	4.500	—	V _{DC}
Accuracy ⁽⁶⁾	—	—	—	±2.5	% V_{FSS}
Sensitivity	V_{IP}	—	45	—	mV/kPa
Response time ⁽⁷⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Output source current at full-scale output	I_{O-}	—	0.1	—	mA _{dc}
Warm-up time ⁽⁸⁾	—	—	20	—	ms
Offset stability ⁽⁹⁾	—	—	±0.5	—	% V_{FSS}

1. 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.

2. Device is ratiometric within this specified excitation range.

3. Offset (V_{OFF}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.

4. Full-scale output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full-rated pressure.

5. Full-scale span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full-rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.

6. Accuracy (error budget) consists of the following:

Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.

Temperature hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.

Pressure hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from minimum or maximum rated pressure at 25 °C.

TcSpan: Output deviation over the temperature range of 0 to 85 °C, relative to 25 °C.

TcOffset: Output deviation with minimum pressure applied over the temperature range of 0 to 85 °C, relative to 25 °C.

Variation from nominal: The variation from nominal values, for offset or full-scale span, as a percent of V_{FSS} at 25 °C.

7. Response time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.

8. Warm-up time is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the pressure has been stabilized.

9. Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of pulsed pressure, temperature cycling with bias test.

MPX5100

Sensors
NXP Semiconductors, B.V.

5

Figura 9.2 – Tabela de valores das propriedades mecânicas e elétricas para diferentes tipos de sensor pertencentes à gama MPX5100.

7. Example

```
int GLED= 13; // Wet Indicator at Digital PIN D13
int RLED= 12; // Dry Indicator at Digital PIN D12
int SENSE= 0; // Soil Sensor input at Analog PIN A0
int value= 0;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(GLED, OUTPUT);
    pinMode(RLED, OUTPUT);
    Serial.println("SOIL MOISTURE SENSOR");
    Serial.println("-----");
}

void loop() {
    value= analogRead(SENSE);
    value= value/10;
    Serial.println(value);
    if(value<50)
    {
        digitalWrite(GLED, HIGH);
    }
    else
    {
        digitalWrite(RLED,HIGH);
    }
    delay(1000);
    digitalWrite(GLED,LOW);
    digitalWrite(RLED, LOW);
}
```

Figura 9.4 – Exemplo de código de programação necessário para o uso de um Sensor de Nível.

9.3. Anexo C: Datasheet do Sensor MPXV5004DP

Nas figuras 9.5 e 9.6 apresenta-se a descrição geral e a tabela de valores das propriedades mecânicas e elétricas para diferentes tipos de sensor pertencentes à gama MPXV5004³.



1 General Description

1.1 Block diagram

Figure 1 shows a block diagram of the internal circuitry integrated on a pressure sensor chip.

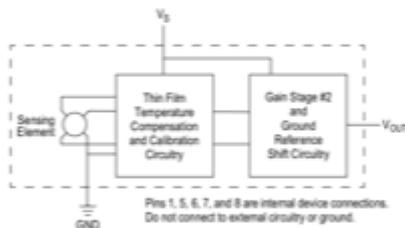


Figure 1. Integrated pressure sensor schematic

1.2 Pinout

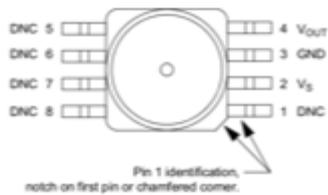


Figure 2. Device pinout (top view)

Table 1. Pin functions

Pin	Name	Function
1	DNC	Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is notated by the notch in the lead or chamfered corner.
2	V_S	Voltage supply
3	GND	Ground
4	V_{OUT}	Output voltage
5	DNC	Do not connect to external circuitry or ground.
6	DNC	Do not connect to external circuitry or ground.
7	DNC	Do not connect to external circuitry or ground.
8	DNC	Do not connect to external circuitry or ground.

MPxx5004

4

Sensors
Freescale Semiconductor, Inc.

Figura 9.5 - Descrição geral para diferentes tipos de sensor pertencentes à gama MPXV5004.

³ Para uma consulta mais pormenorizada ver Datasheet em [27].



2 Mechanical and Electrical Specifications

2.1 Maximum ratings

Table 2. Maximum ratings⁽¹⁾

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum pressure (P1 > P2)	P_{MAX}	16	kPa
Storage temperature	T_{STG}	-30 to +100	°C
Operating temperature	T_A	0 to +85	°C

1. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

2.2 Operating characteristics

Table 3. Operating characteristics ($V_S = 5.0 V_{DC}$, $T_A = 25 °C$ unless otherwise noted, P1 > P2)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Units	
Pressure range	P_{OP}	0	—	3.92 400	kPa mm H ₂ O	
Supply voltage ⁽¹⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	V_{DC}	
Supply current	I_S	—	—	10	mA _{DC}	
Span @ 306 mm H ₂ O (3 kPa) ⁽²⁾	V_{RSS}	—	3.0	—	V	
Full-scale span @ 400 mm H ₂ O (3.92 kPa) ⁽²⁾		—	3.92	—		
Offset ⁽³⁾	V_{OFF}	0.75	1.0	1.25	V	
Sensitivity	V/IP	—	1.0	—	V/kPa	
Accuracy ^{(4) (5)}	0 to 100 mm H ₂ O (10 °C to 60 °C)	—	—	—	±1.5	% V_{RSS} with autozero
	100 to 400 mm H ₂ O (10 °C to 60 °C)	—	—	—	±2.5	% V_{RSS} with autozero
	0 to 400 mm H ₂ O (10 °C to 60 °C)	—	—	—	±6.25	% V_{RSS} without autozero

1. Device is ratiometric within this specified excitation range.

2. Span is defined as the algebraic difference between the output voltage at specified pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.

3. Offset (V_{OFF}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.

4. Accuracy (error budget) consists of the following:

- Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure, using endpoint method, over the specified pressure range.
- Temperature hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
- Pressure hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25 °C.
- TcSpan: Output deviation over the temperature range of 10 °C to 60 °C, relative to 25 °C.
- TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 10 °C to 60 °C, relative to 25 °C.
- Variation from nominal: The variation from nominal values, for offset or full-scale span, as a percent of V_{RSS} , at 25 °C.

5. Autozero at factory installation: Due to the sensitivity of the MPxx5004G, external mechanical stresses and mounting position can affect the zero pressure output reading. Autozeroing is defined as storing the zero pressure output reading and subtracting this from the device's output during normal operations. Reference AN1636 for specific information. The specified accuracy assumes a maximum temperature change of ±5 °C between autozero and measurement.

MPxx5004

Figura 9.6 - Tabela de valores das propriedades mecânicas e elétricas para diferentes tipos de sensor pertencentes à gama MPXV5004.