

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro



Alan de Oliveira Pinto Neves

**Caracterização de uma bomba piezoelétrica
pulsátil de baixa frequência**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro
Maio de 2025



Alan de Oliveira Pinto Neves

**Caracterização de uma bomba piezoelétrica
pulsátil de baixa frequência**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Igor Braga de Paula

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Rafael Menezes de Oliveira

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dra. Maria Helena Farias

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia –
INMETRO

Rio de Janeiro, 21 de maio de 2025

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Alan de Oliveira Pinto Neves

Graduado em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ficha Catalográfica

Neves, Alan de Oliveira Pinto

Caracterização de uma bomba piezoelétrica pulsátil de baixa frequência / Alan de Oliveira Pinto Neves; orientador: Igor Braga de Paula. – 2025.

109 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2025.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Bomba Piezoelétrica. 3. Válvula Tesla. 4. Bocal/Difusor. I. Paula, Igor Braga de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais, Rosangela e Marlon,
à minha futura esposa, Karol Cezar,
e à minha filha Lavinia Neves.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Igor Braga, expresso minha sincera gratidão pelo estímulo constante, pela parceria construtiva e pela confiança ao longo de toda a realização deste trabalho. Sou especialmente grato pela oportunidade de contar com sua orientação e por ter acolhido minha proposta de pesquisa na área de Engenharia Biomédica com abertura, interesse e comprometimento desde o início. Sua escuta atenta, orientação segura e apoio contínuo foram fundamentais para a concretização deste projeto.

Ao Dr. Omar Pinedo, agradeço sinceramente pelo constante incentivo, pela dedicação exemplar e pelos valiosos ensinamentos ao longo desta jornada. Sua generosidade em compartilhar conhecimento, inclusive em seu tempo livre, foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Sou especialmente grato pelo apoio na parte experimental, onde aprendi não apenas técnicas, mas também a importância do rigor e da curiosidade científica. Sua orientação atenta e comprometida teve um papel essencial na minha formação acadêmica.

Aos professores Rafael de Oliveira e Maria Farias, que participaram da Comissão Examinadora, agradeço pelas contribuições valiosas a este trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica pelos ensinamentos e pela ajuda, em especial à Carina Belini, Simone de Sousa, Márcia Magalhães e Leninaldo Severino pelo apoio acadêmico, e aos funcionários do LEF, Márcio Soares e Leonardo Pinhal, pelo suporte técnico durante as atividades de laboratório.

Ao CNPq e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado. Agradeço também ao FESP pelo apoio à minha formação, bem como aos programas de apoio da PUC-Rio PSICOM e CCESP, em especial às psicólogas Fernanda Capobianco e Cláudia Oliveira, pelo suporte ao longo da jornada.

Agradeço profundamente ao meu pai, Marlon Neves, pela sua dedicação incansável, pelos exemplos de força e perseverança que sempre me inspiraram. À minha mãe, Rosângela Neves, sou imensamente grato por seu amor constante, apoio incondicional e por sempre me incentivar a buscar o conhecimento e a excelência nos estudos. Sem o suporte de ambos, esta conquista não teria sido possível.

À minha esposa, Karol Cezar, pelo apoio e companheirismo durante esta jornada, e à minha filha que ainda está por chegar, Lavinia Neves, fonte de inspiração e motivação para mim.

À minha companheira silenciosa, Menina, pela presença tranquila nos momentos de estudo e escrita.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Aos meus amigos da PUC-Rio, Maurício Lobo, Omar Pinedo, Bruno Sohler, Edmo Gabriel, Philipe Siqueira, Samuel Cândido, Ivan Aguilar, Jerson Bequer, Lara Alvim, Isabel Camerin, Janderson Mazzine, Paulo de Oliveira, Matheus Gabrig, Lizia Viter, Rodrigo Huber, Diogo Fernandes, Ademir Medeiros e Edson Sabino — por todo apoio, paciência e compreensão.

À juventude da PIBRJ e ao grupo NOS 26+, agradeço pelas orações, pelo carinho e pelo apoio espiritual durante toda esta caminhada. Em especial, sou grato aos meus amigos Luis Felipe, Raysa Stone, Gisely Borges, Ana Carla de Oliveira, Caio Eyken e Cauã Felix, pelo encorajamento constante e pela amizade sincera.

Por fim, agradeço a Deus, cuja graça e fidelidade me sustentaram em cada etapa desta jornada. Em momentos de incerteza, encontrei força na fé, direção na oração e esperança na Sua Palavra. A Ele, toda honra e glória por esta conquista.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Neves, Alan de Oliveira Pinto; Paula, Igor Braga de (Orientador). **Caracterização de uma bomba piezoelétrica pulsátil de baixa frequência.** Rio de Janeiro, 2025. 109p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho buscou caracterizar experimentalmente uma micro bomba piezoelétrica com válvulas sem partes móveis. Essas bombas são tipicamente compactas, de baixa vazão (ml/min), de baixo consumo e tem aplicações em diversas áreas dentre as quais destaca-se a área biomédica para administração controlada de fármacos. O objetivo neste trabalho foi caracterizar o escoamento no interior do dispositivo e para isso foram selecionadas três configurações: uma com válvulas do tipo Tesla de dois canais, outra com válvulas do tipo Tesla de quatro canais e uma com válvula do tipo cônica. Cada uma das configurações foi avaliada sob condições de fluxo pulsátil e contínuo. A caracterização do escoamento no interior de bombas e das válvulas, através de medições dos campos de velocidade ainda não é reportada na literatura. Portanto, o presente trabalho buscou contribuir neste tópico. Os resultados obtidos com os dispositivos testados indicaram que existe uma frequência ótima de operação da bomba e que confere a maior vazão. Nos dispositivos avaliados essa frequência foi de 10Hz. A maior diferença entre o fluxo direto e reverso para o modo contínuo foi encontrado na configuração bocal/difusor. Por fim, os campos de velocidade internos das válvulas foram analisados por meio da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Espera-se que a caracterização detalhada dessas bombas, aliada às medições de PIV, contribua para o desenvolvimento das bombas piezoelétricas.

Palavras-chave

Bomba Piezoelétrica; Válvula Tesla; Bocal/Difusor.

Abstract

Neves, Alan de Oliveira Pinto; Paula, Igor Braga de (Advisor). **Characterization of a Low-Frequency Pulsatile Piezoelectric Pump**. Rio de Janeiro, 2025. 109p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study aimed to experimentally characterize a piezoelectric micropump with valves that have no moving parts. These pumps are typically compact, have low flow rates (ml/min), low power consumption, and are used in various fields, particularly in the biomedical area for controlled drug delivery. The objective of this work was to characterize the flow inside the device, and for this purpose, three configurations were selected: one with two-channel Tesla-type valves, another with four-channel Tesla-type valves, and one with conical-type valves. Each configuration was evaluated under pulsatile and continuous flow conditions. The characterization of the flow within pumps and valves through velocity field measurements has not yet been reported in the literature. Therefore, this work aimed to contribute to this topic. The results obtained from the tested devices indicated the existence of an optimal operating frequency for the pump, which yields the highest flow rate. For the evaluated devices, this frequency was 10 Hz. The greatest difference between forward and reverse flow in continuous mode was found in the nozzle/diffuser configuration. Finally, the internal velocity fields of the valves were analyzed using Particle Image Velocimetry (PIV). It is expected that the detailed characterization of these pumps, together with the PIV measurements, will contribute to the development of such devices.

Keywords

Piezoelectric pump; Tesla Valve; Diffuser/Nozzle.

Sumário

1	Introdução	17
2	Revisão bibliográfica	21
3	Objetivos	27
4	Construção do aparato experimental	28
4.1	Projeto das válvulas	28
4.1.1	Válvulas Tesla	28
4.1.2	Válvulas bocal/difusor	32
4.2	Fabricação das bombas	35
4.2.1	Sensor piezoelétrico	36
4.2.2	Processo de fabricação das bombas	37
4.3	Construção da Bancada	41
4.3.1	Sistema hidráulico	42
4.3.2	Sistema de aquisição de imagens	44
5	Metodologia experimental	46
5.1	Medidas de vazão	46
5.2	Velocimetria por imagem de partículas (PIV)	50
5.2.1	Partículas	50
5.2.2	Fluido	51
5.2.3	Sistema de Iluminação	52
5.2.3.1	LED	52
5.2.3.2	Laser	53
5.2.4	Conjuntos de Lentes Formadoras de Plano de Luz	54
5.2.5	Filtros	54
5.2.6	Câmera	56
5.2.7	Aquisição das Imagens	57
5.2.8	Pré-Processamento das Imagens	61
5.2.9	Processamento	62
5.2.10	Pós-Processamento	63
6	Resultados	65
6.1	Determinação da frequência que gera a maior vazão	65
6.2	Análise da vazão no modo contínuo para distintas diferenças de pressão	68
6.3	Determinação dos Campos de Velocidade em Válvulas no Modo Pulsátil com Água	70
6.3.1	Válvulas Tesla quatro canais	70
6.3.2	Válvula Tesla dois canais	76
6.3.3	Válvula bocal/difusor	80
6.4	Determinação dos Campos de Velocidade em Válvulas no Modo Pulsátil com Óleo de Peroba	83
6.4.1	Válvula Tesla 2 canais	84

6.4.2	válvula bocal/difusor	87
6.5	Determinação dos Campos de Velocidade em Válvulas no Modo Pulsátil com Cinamato de Etila	91
6.5.1	Válvulas Tesla dois canais	91
6.5.2	Válvulas bocal/difusor	95
7	Conclusão e trabalhos futuros	102
8	Referências bibliográficas	105
A	Análise de Incerteza	108

Lista de figuras

Figura 1.1	Aplicações das bombas piezoelétricas. Baseado no trabalho de Li et al.[1].	18
Figura 4.1	(I) escoamento direto e (II) escoamento reverso. Adaptado de Qian et al.[2].	29
Figura 4.2	(I) válvula Tesla com 1 canal e (II) válvula Tesla com 2 canais e (III) válvula Tesla com 4 canais.	30
Figura 4.3	Relações geométricas de projeto das válvulas Tesla. Adaptado de Hu et al.[3].	31
Figura 4.4	(I) válvula Tesla T45-R de 2 canais e (II) válvula Tesla T45-R de 4 canais.	32
Figura 4.5	(I) modo sucção e (II) modo bombeamento.	33
Figura 4.6	mapa de estabilidade difusores. Adaptado White[4].	33
Figura 4.7	Dimensões do difusor/bocal.	34
Figura 4.8	(I) Bomba montada e (II) seus componentes.	35
Figura 4.9	(I) Bomba com válvulas T45-R 4 canais, (II) Bomba com válvulas T45-R 2 canais e (III) Bomba com válvulas bocal/difusor.	36
Figura 4.10	(I) Piezoelétrico e suas dimensões e (II) modo de funcionamento do piezoelétrico.	37
Figura 4.11	Processo de fotopolimerização por projeção de máscaras. Adaptado de Volpato[5]	38
Figura 4.12	(I) Impressora 3D, (II) resina, (III) lavadora e (IV) cura.	39
Figura 4.13	(I) modelo da tampa, (II) tampa impressa, (III) modelo do corpo da bomba e (IV) corpo da bomba impressa.	40
Figura 4.14	(I) aplicação do silicone, (II) colagem e lixamento da bomba, (III) lateral polida e (IV) superfície da bomba polida.	40
Figura 4.15	bancada e instrumentos de medições.	41
Figura 4.16	sistema hidráulico	42
Figura 4.17	bomba auxiliar. Fonte Vetor	43
Figura 4.18	Amplificador Wishcolor. Fonte wishcolor	44
Figura 4.19	Configuração utilizando o laser.	45
Figura 5.1	válvulas do sistema hidráulico	46
Figura 5.2	Esquema da montagem do experimento vazão	47
Figura 5.3	Balança GEHAKA AG200	48
Figura 5.4	diagrama de blocos do experimento para obtenção da frequência máxima de acionamento.	49
Figura 5.5	Desenho esquemático de sistema PIV bi-dimensional. Extraído de Abrantes et al.[6].	50
Figura 5.6	LED IL-105 HARDsoft (Fonte : HARDsoft)	52
Figura 5.7	módulo do laser (fonte: ZBAITU)	53
Figura 5.8	Espectro de absorção (luz verde) e emissão (luz vermelha). [7]	54
Figura 5.9	Espectro de absorção (luz azul) e emissão (luz verde). Fonte: thermofisher.com	55
Figura 5.10	Filtro passa-alta	55

Figura 5.11	Curva de transmissividade (fonte: newport.com)	56
Figura 5.12	Phantom Miro 340	56
Figura 5.13	Modo de operação PIV utilizado neste trabalho.	58
Figura 5.14	Sincronizador utilizado nos experimentos.	58
Figura 5.15	Diagrama do fabricante do LED	59
Figura 5.16	configurações da câmera no programa PCC Phantom para o experimento utilizando a rodamina.	59
Figura 5.17	Diagrama de tempo PIV experimento que utiliza o LED	60
Figura 5.18	configurações da câmera no programa PCC Phantom para o experimento utilizando a fluoresceína.	60
Figura 5.19	Diagrama de tempo PIV experimento que utiliza o laser.	61
Figura 5.20	(I) imagem aquistada e (II) imagem com a máscara	62
Figura 5.21	(I) Imagem das partículas em um instante t , (II) imagem média obtida a partir das aquisições e (III) imagem do instante t após a remoção da imagem média.	62
Figura 5.22	Janela de interrogação 64x64 pixels	63
Figura 5.23	(I) partícula em dois instantes de tempo distintos e (II) correlação cruzada	64
Figura 6.1	Gráfico da frequência de acionamento versus vazão volumétrica líquida para a bomba piezoelétrica com arranjo de válvulas do tipo T45-R (2 canais), incluindo as incertezas associadas com nível de confiança de 95%	66
Figura 6.2	Gráfico da frequência de acionamento versus vazão volumétrica líquida para a bomba piezoelétrica com arranjo de válvulas do tipo T45-R (4 canais), incluindo as incertezas associadas com nível de confiança de 95%.	66
Figura 6.3	Gráfico da frequência de acionamento versus vazão volumétrica líquida para a bomba piezoelétrica com arranjo de válvulas do tipo bocal/difusor, incluindo as incertezas associadas com nível de confiança de 95%.	67
Figura 6.4	gráfico altura vs vazão, T45-R 2 canais	68
Figura 6.5	gráfico altura vs vazão, T45-R 4 canais	69
Figura 6.6	gráfico altura vs vazão, bocal/difusor	69
Figura 6.7	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de entrada no instante $t = t_0$.	71
Figura 6.8	Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula de entrada T45-R com 4 canais durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 s$.	72
Figura 6.9	Perfis de velocidade da componente u na válvula de entrada com um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	73
Figura 6.10	Variação temporal da média da componente u com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na válvula de entrada.	73
Figura 6.11	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de saída no instante $t = t_0$.	74

Figura 6.12	Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula de saída durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 s$.	75
Figura 6.13	Perfis de velocidade da componente u na válvula de saída com um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	76
Figura 6.14	Variação temporal da média da componente u com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na válvula de saída.	76
Figura 6.15	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de entrada no instante $t = t_0$.	77
Figura 6.16	Perfis de velocidade da componente u na válvula de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	78
Figura 6.17	Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na da válvula T45-R 2 canais na entrada da bomba.	78
Figura 6.18	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de saída no instante $t = t_0$.	79
Figura 6.19	Perfis de velocidade da componente u na válvula de saída durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	80
Figura 6.20	Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na válvula T45-R 2 canais na saída da bomba.	80
Figura 6.21	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de entrada no instante $t = t_0$.	81
Figura 6.22	Perfis de velocidade da componente u na válvula de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	81
Figura 6.23	Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na válvula de entrada.	82
Figura 6.24	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de saída no instante $t = t_0$.	82
Figura 6.25	Perfis de velocidade da componente u na válvula de saída durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	83
Figura 6.26	Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na válvula de saída.	83
Figura 6.27	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de entrada no instante $t = t_0$.	84
Figura 6.28	Perfis de velocidade da componente u na válvula de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	85
Figura 6.29	Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na válvula de entrada.	85
Figura 6.30	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de saída no instante $t = t_0$.	86
Figura 6.31	Perfis de velocidade da componente u na válvula de saída durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	87

Figura 6.32	Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na válvula de saída.	87
Figura 6.33	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula bolca/difusor de entrada no instante $t = t_0$.	88
Figura 6.34	Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	88
Figura 6.35	Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na válvula bolca/difusor de entrada.	89
Figura 6.36	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula bocal/difusor de saída no instante $t = t_0$.	89
Figura 6.37	Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	90
Figura 6.38	Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ na válvula bocal/difusor de saída.	90
Figura 6.39	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula T45-R 2 canais de entrada no instante $t = t_0$.	92
Figura 6.40	Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula T45-R 2 canais de entrada durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 s$.	93
Figura 6.41	Perfis de velocidade da componente u na válvula T45-R 2 canais de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	94
Figura 6.42	Variação da velocidade no tempo	95
Figura 6.43	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula bocal/difusor de entrada no instante $t = t_0$.	95
Figura 6.44	Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 s$.	96
Figura 6.45	Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	97
Figura 6.46	variação da velocidade ao longo do tempo	98
Figura 6.47	O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula bocal/difusor de saída no instante $t = t_0$.	98
Figura 6.48	Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula bocal/difusor de saída durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 s$.	99
Figura 6.49	Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de saída durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	100
Figura 6.50	Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.	101
Figura 6.51	Variação da velocidade ao longo do tempo	101

Lista de tabelas

Tabela 4.1	Especificações da Bomba de auxiliar. Fonte: vetor	43
Tabela 4.2	Especificações técnicas do amplificador Wishcolor utilizado no acionamento do piezoelétrico. Fonte: Wishcolor	43
Tabela 5.1	Configurações das válvulas.	46
Tabela 5.2	Dados da balança	48
Tabela 5.3	Dados da rodamina	51
Tabela 5.4	Dados da fluoresceína	51
Tabela 5.5	Dados do sistema de iluminação por LED	53
Tabela 5.6	dados do sistema de iluminação por laser	53
Tabela 5.7	Parâmetros da captura de dados	57
Tabela 5.8	Acessórios da câmera	57
Tabela 5.9	Parâmetros do sincronizador para o experimento utilizando o LED.	58
Tabela 5.10	Parâmetros do sincronizador para o experimento utilizando o laser	60
Tabela 6.1	Médias das vazões líquidas obtidas a partir de seis medições, acompanhadas de suas respectivas incertezas.	67
Tabela 6.2	comparação do Reynolds no regime pulsátil	67
Tabela 6.3	Diferença entre as vazões para uma mesma altura de recalque	70
Tabela 6.4	Comparação da diodicidade	70

*Portanto, não fiquem preocupados com o dia
de amanhã, pois o amanhã trará suas
próprias preocupações.
Para cada dia bastam as suas próprias
dificuldades.*

Mateus 6:34, *Bíblia Sagrada (NTLH)*.

1

Introdução

As bombas piezoelétricas são dispositivos que utilizam atuadores piezoelétricos para movimentar fluidos em escalas muito pequenas, destacando-se por sua estabilidade e capacidade de operar em baixos volumes [1]. Elas têm uma ampla gama de aplicações, incluindo: biomédica, onde são utilizadas na administração de medicamentos [8], como insulina; energia [9], especialmente em células de combustível de metanol direto (DMFC); refrigeração [10], onde podem ser utilizadas no resfriamento de componentes eletrônicos.

Na área biomédica [1], as bombas piezoelétricas são fundamentais para aplicações de fármacos. Essas bombas fornecem pequenas doses com alta confiabilidade, permitindo o desenvolvimento de sistemas implantáveis que requerem a entrega direta de medicamentos ao corpo, como em tratamentos para diabetes ou doenças crônicas.

Na área de energia, as bombas piezoelétricas podem ser usadas nas células de combustível de metanol direto (DMFC) [11]. Essas bombas ajudam a melhorar o desempenho das células ao possibilitarem um controle da vazão de metanol, operando de forma contínua e estável mesmo em baixas frequências, garantindo um fornecimento contínuo e controlado do combustível necessário para a geração de energia.

Os sistemas de resfriamento são outra aplicação importante das bombas piezoelétricas. Nesse caso, as bombas são utilizadas em sistemas de resfriamento líquido para componentes eletrônicos [12], como CPUs, onde ajudam a dissipar o calor gerado durante o funcionamento. Isso é especialmente relevante à medida que os dispositivos eletrônicos se tornam mais compactos e potentes, aumentando a necessidade de soluções eficazes para gerenciamento térmico.

A pesquisa contínua e o desenvolvimento dessas bombas prometem expandir ainda mais suas aplicações, possibilitando inovações que podem levar a novos dispositivos biomédicos e melhorias na eficiência energética de várias tecnologias. A figura 1.1 ilustra esquematicamente algumas das principais aplicações das bombas piezoelétricas.

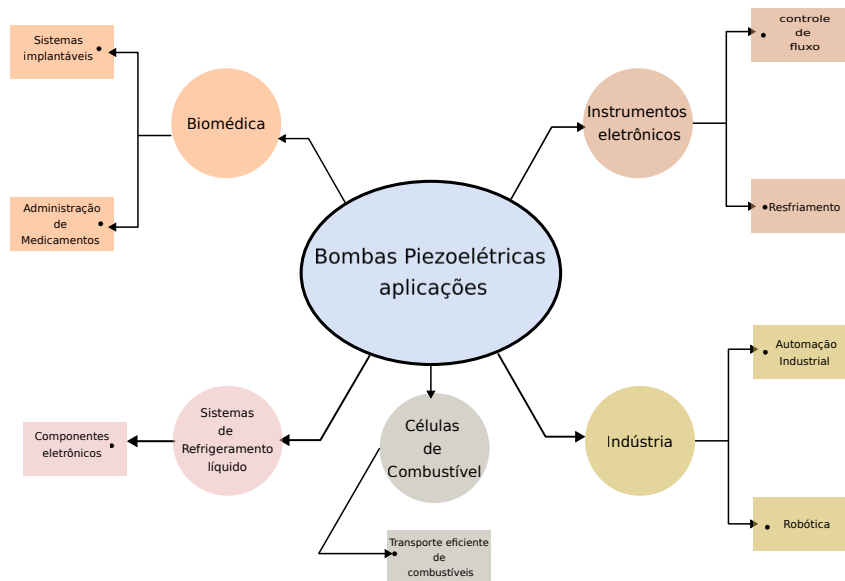


Figura 1.1: Aplicações das bombas piezoelétricas. Baseado no trabalho de Li et al.[1].

De acordo com Li et al.[1], as bombas piezoelétricas podem ser classificadas de acordo com diferentes critérios, refletindo suas características de configuração, modos de operação e arranjos das válvulas direcionais.

Em relação, a configuração das bombas piezoelétricas, elas podem ser divididas em dispositivos com válvulas com partes móveis e válvula sem partes móveis (VSPM) [1]. As bombas com válvula podem operar com válvulas passivas, que operam sem necessidade de energia externa, ou com válvulas ativas, que dependem de algum mecanismo para o controle da abertura e fechamento. Por outro lado, as bombas com válvula sem partes móveis (VSPM) possuem mecanismo para direcionamento do escoamento somente usando a geometria do conduto. Neste estudo, será investigado o segundo tipo de configuração.

Outra classificação que permite diferenciar as bombas piezoelétricas é a configuração da câmara[1], que pode ser única ou múltipla. A configuração de câmara única contém um único compartimento para a movimentação do fluido, enquanto a configuração de múltiplas câmaras possui várias câmaras que podem operar em conjunto ou separadamente. Neste trabalho foram empregadas somente bombas de câmara única.

Outra característica relevante é a configuração do atuador[1], que pode ser do tipo filme ou empilhado. As bombas do tipo filme utilizam um único piezoelétrico para gerar movimento, enquanto as bombas empilhadas utilizam elementos piezoelétricos combinados para aumentar a força de atuação. Neste trabalho foi usada uma bomba tipo filme.

Além disso, as bombas piezoelétricas operam em dois modos principais: o modo não ressonante e o modo ressonante [1]. O modo não ressonante permite o controle em aplicações que requerem variações rápidas na vazão, enquanto o modo ressonante aumenta a eficiência e a capacidade de bombeamento ao operar na frequência natural do sistema. Normalmente, este último tipo de bomba é projetada para operar na frequência máxima de eficiência. As bombas ressonantes operam em frequências na ordem de kHz . Optou-se neste trabalho por bombas não ressonantes de baixa frequência e baixo cisalhamento.

A otimização das bombas piezoelétricas é crucial para melhorar sua eficiência [1]. Isso porque a eficiência das bombas depende de vários parâmetros, dentre os quais destacam as válvulas [13]. A medição detalhada do escoamento nestes dispositivos é importante para avaliação de desempenho e na identificação das causas para perda de eficiência. Os estudos de Sheen et al.[14] e Saffar et al.[15] realizaram medições por velocimetria por imagem de partículas (PIV) em regiões próximas aos canais das válvulas, mas não investigaram detalhadamente o escoamento no interior dessa região. Dessa forma, este trabalho se propõe a preencher essa lacuna, por meio de uma análise mais aprofundada do escoamento interno as válvulas.

O objetivo deste trabalho é caracterizar um sistema de bombeamento piezoelétrico conjuntamente com a medição do escoamento no interior do dispositivo. A ideia é estudar uma bomba tipo filme, com válvula sem partes móveis (VSPM), com câmera única e acionamento não ressonante. Para a medição do escoamento no interior da bomba será empregada a técnica de velocimetria por imagem de partícula (PIV). Algumas metas específicas são estabelecidas para o trabalho. Em primeiro lugar, buscou-se avaliar a frequência de acionamento que gera maior vazão. Em seguida, buscou-se avaliar a vazão para uma diferença de pressão diferente de zero; por fim, buscou-se medir os campos de velocidade no interior do dispositivo.

A relevância deste estudo está na combinação de diferentes métodos para caracterização detalhada das bombas piezoelétricas. A caracterização do escoamento e a análise da eficiência do bombeamento podem contribuir para o projeto e para funcionalidade desses dispositivos. Isso, a longo prazo, pode viabilizar a construção de sistemas mais eficazes e confiáveis.

Em resumo, espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para o avanço do conhecimento no campo das bombas piezoelétricas, fornecendo informações valiosas para o projeto e otimização destes dispositivos de bombeamento.

A organização desta dissertação segue a sequência descrita neste parágrafo. O capítulo 2 apresenta uma revisão dos principais estudos relacionados

ao desenvolvimento de bombas piezoelétricas com válvulas sem partes móveis, com foco em geometrias do tipo bocal/difusor e válvulas Tesla, abordando seus aspectos geométricos, regimes de operação e desempenho em termos de diodicidade. No capítulo 3, são definidos os objetivos gerais e específicos da pesquisa. O capítulo 4 descreve a construção do aparato experimental, incluindo o projeto das válvulas, a fabricação das bombas piezoelétricas e a configuração da bancada experimental. O capítulo 5 detalha a metodologia experimental adotada para a medição da vazão e a aquisição dos campos de velocidade por meio da técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV). Os resultados experimentais são apresentados e discutidos no capítulo 6, com destaque para o desempenho comparativo entre os diferentes tipos de válvulas utilizadas. Por fim, o capítulo 7 encerra a dissertação com as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2

Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão dos principais estudos relacionados ao desenvolvimento bombas piezoelétricas com elementos bocal/difusor e válvulas Tesla. São discutidas as abordagens adotadas por diferentes autores quanto à geometria, condições de operação e desempenho desses dispositivos em relação à eficiência e diodicidade. A análise considera tanto estudos experimentais quanto simulações numéricas, buscando identificar os fatores que influenciam o comportamento do escoamento e a eficiência de bombeamento.

Stemme e Stemme[16] propuseram uma bomba com válvulas sem partes móveis baseadas em elementos bocal/difusor e um atuador pulsátil com frequência de operação entre $110Hz$ e $310Hz$. A variação de volume na câmara da bomba, combinada com a assimetria das perdas de carga entre um difusor e um bocal, favoreceu um escoamento direcional de fluido sem a necessidade de válvulas móveis. Isso aumentou a confiabilidade do sistema, pois reduziu qualquer desgaste mecânico. A eficiência do sistema foi diretamente relacionada ao projeto geométrico dos difusores e bocais, especialmente com relação ao ângulo de abertura e ao diâmetro da garganta. Naquele trabalho foram testados dois modelos de difusores e bocais com ângulos entre 5.3° e 10.7° . Os autores demonstraram a viabilidade do sistema.

O trabalho de Forster et al.[17] estudou a aplicação de válvulas alternativas. Foram avaliadas válvulas bocal/difusor e as válvulas Teslas (TR-45) por meio de simulações numéricas. O trabalho utilizou um atuador pulsátil com frequência de $114 Hz$ com duas formas de onda: senoidal e quadrada. As simulações numéricas evidenciaram que o escoamento permanecia em regime laminar. A válvula tipo Tesla demonstrou maior diodicidade alcançando valores de até 1.3, indicando uma eficiência volumétrica superior em comparação aos difusores — Forster et al. definiram a diodicidade como a razão da perda de carga no sentido reverso sobre a perda de carga no sentido direto, conforme a equação (4-1). Além disso, observou-se que a forma de onda de atuação influenciava significativamente a vazão gerada, com a onda quadrada proporcionando desempenho até seis vezes superior ao da excitação senoidal.

Olsson et al.[18] desenvolveram uma bomba com difusores planos, e investigaram como os parâmetros geométricos e operacionais influenciam o desempenho do dispositivo. Para otimizar a vazão, foram utilizados dois atuadores na mesma câmara operando em antifase com frequência entre 3 a $4 kHz$. O estudo evidenciou que o ângulo do difusor afeta diretamente a

vazão e a pressão de bombeamento. Foi observado que os difusores com ângulos maiores favorecem a vazão para líquidos de baixa viscosidade, como o metanol, enquanto ângulos menores aumentam a pressão para líquidos mais viscosos. Foram testados especificamente os ângulos de 7° , 9.8° e 13° permitindo observar a sensibilidade do desempenho em relação a pequenas variações na geometria.

Olsson et al.[19] realizaram uma análise experimental e numérica detalhada de difusores de paredes planas. Eles também observaram que um dos parâmetros mais relevantes para a eficiência do difusor é o ângulo de abertura dos bocais/difusores. Resultados experimentais demonstraram que ângulos menores, na faixa de 7° a 10° , proporcionam melhor desempenho, com maior recuperação de pressão e menor divisão do escoamento na direção divergente. Outro aspecto analisado foi o número de Reynolds na região da garganta, definido como $Re = \frac{d_h \cdot \bar{u}}{\nu}$, em que d_h é o diâmetro hidráulico, $\bar{u}$ é a velocidade média nessa seção e ν é a viscosidade cinemática do fluido. Foi observada boa concordância entre simulações e medições para Re abaixo de 300, onde o escoamento se mantém predominantemente laminar. Quanto à atuação, as microbombas avaliadas operavam em regime pulsado com atuadores piezoelétricos, em frequências de 3 a 4 kHz . A diodicidade foi quantificada, sendo observados valores médios entre 1.32 e 1.59.

Forster e Williams[20] compararam três tipos de válvulas: bocal/difusor, Tesla e a Tesser, proposta pelos autores, que combina características das válvulas anteriores. O acionamento utilizado foi pulsátil. O trabalho demonstrou, por meio de simulações em CFD 2D, que a eficiência das válvulas, avaliada pela diodicidade, varia significativamente com o número de Reynolds na região da seção mínima das válvulas. Para baixos Reynolds ($10 \leq Re \leq 100$), a válvula Tesser apresentou desempenho superior ao bocal/difusor, com diodicidade variando de 1.25 a 1.35, enquanto o bocal/difusor atingiu, no máximo, 1.25 nessa faixa. Em contrapartida, para Reynolds elevados ($Re \approx 2000$), a válvula do tipo Tesla, modelo TR-45, atingiu uma diodicidade de aproximadamente 1.9, superando tanto a bocal/difusor (≈ 1.2) quanto a própria Tesser (≈ 1.7).

Sun e Yang[21] investigaram experimentalmente os efeitos de parâmetros geométricos e operacionais no desempenho de microdifusores, operando em modo contínuo com água sob pressões constantes entre 290 e 550 Pa , o que resultou em números de Reynolds entre 2 e 22 na região da garganta ($Re = \frac{\rho \cdot \bar{u} \cdot D_h}{\mu}$, onde $\bar{u}$ é a velocidade média na região da garganta e D_h , diâmetro hidráulico na garganta). O meio ângulo do difusor (θ) foi sistematicamente variado de 5° a 55° , em incrementos de 5° , para identificar a geometria que proporciona a maior diodicidade. Os resultados demonstraram que, para $\theta < 30^\circ$, o escoamento permanece junto às paredes internas do canal, aumentando

progressivamente a vazão à medida que o ângulo cresce. No entanto, a partir de $\theta > 30^\circ$, observou-se a formação de regiões de recirculação simétricas logo após a garganta, que bloqueiam parcialmente o escoamento principal e comprometem a eficiência do dispositivo. A diodicidade máxima do difusor foi 1.45 alcançada com o meio $\theta = 30^\circ$ para uma pressão de 340 Pa.

Mohammadzadeh et al.[13] realizaram uma investigação numérica abrangente sobre válvulas tipo Tesla, com foco na influência da geometria, número de canais, número de Reynolds (Re), e modo de operação (estacionário ou transiente) sobre a eficiência da válvula, mensurada por meio da diodicidade (Di). Foram simuladas configurações para as válvulas Teslas com um a quatro canais. Como base de comparação, foi considerada uma válvula do tipo bocal/difusor com ângulo de difusor de 9.5° . O autor utilizou tanto simulações em modo contínuo quanto em modo pulsátil, este representando a atuação de um diafragma oscilante com frequência de 100 Hz . Os resultados indicaram que a diodicidade aumenta com o número de Reynolds no regime $Re > 100$, onde as válvulas tipo Tesla superam em desempenho do bocal/difusor. Em relação à geometria, observou-se que a válvula Tesla com dois canais oferece o melhor equilíbrio entre desempenho (até 1.45 vezes mais eficiente que a de um canal) e complexidade construtiva. Foi observado que o acréscimo de mais canais eleva a diodicidade, porém com ganhos pequenos e aumento expressivo da complexidade do projeto, dos custos de fabricação e da perda de carga total. Ao comparar as válvulas Tesla com as de bocal/difusor no modo contínuo, verificou-se que a eficiência do bocal/difusor é superior na faixa de $Re < 130$, com valor máximo de diodicidade em $Re \approx 130$ ($Di \approx 1,65$), enquanto a Tesla se mostra mais eficaz para $Re > 200$, onde Di continua aumentando sem apresentar um ponto de máximo. No ponto de cruzamento em $Re \approx 200$, ambas as válvulas exibem desempenho semelhante ($Di \approx 1,55$), sendo a escolha entre elas dependente do regime de operação do escoamento.

Yuan et al.[22] apresentaram o desenvolvimento de um novo elemento bocal/difusor de três vias para bombas piezoelétricas com válvulas sem partes móveis, destacando-se pela melhoria na diodicidade. Por meio de simulações numéricas e testes experimentais, foram otimizados parâmetros geométricos como os ângulos dos difusores ($\theta_1 = 7^\circ$) ($\theta_2 = 8^\circ$). A eficiência atingiu valores de 1.69 ($\Delta P = 10\text{kPa}$) e 1.96 ($\Delta P = 50\text{kPa}$). A bomba operou de forma pulsátil, acionada por um sinal senoidal com frequência variando entre 50 e 500 Hz , alcançando desempenho máximo a 225 Hz , com vazão de 0.451ml/min .

Singh et al.[23] realizaram uma análise teórica, numérica e experimental de uma bomba com válvulas bocal/difusor, acionada por atuador pulsátil. Um dos principais fatores analisados foi o ângulo do difusor, sendo identificado que

um valor de 10° maximiza a eficiência, enquanto ângulos muito pequenos ou grandes reduzem o desempenho devido, respectivamente, à baixa diferença de pressão e à divisão do escoamento. A bomba opera em modo pulsátil, com ciclos periódicos de sucção e ejeção induzidos por um sinal senoidal aplicado ao atuador. O melhor desempenho foi obtido quando a bomba opera próximo à frequência natural, estimada em 200 Hz , onde a deflexão da membrana e a vazão líquida atingem valores máximos. O escoamento no interior da microbomba foi laminar, confirmado por um número de Reynolds em torno de $Re = 70$, validando o uso de modelagens baseadas nesse regime. Além disso, modificações geométricas na câmara da bomba resultaram em ganhos significativos de desempenho, com aumento de até 28% na eficiência de bombeamento, demonstrando a importância de ajustes estruturais para otimizar a vazão líquida gerada.

Derakhshan et al.[24] investigaram o desempenho de microbombas piezoelétricas equipadas com válvulas passivas do tipo Tesla. O estudo avaliou a eficiência dessas válvulas operando sob uma pressão máxima de 220 Pa , com atuação pulsátil a uma frequência de 200 Hz . Por meio de simulações numéricas, os autores analisaram variações nos ângulos de junção e na geometria do canal de retorno da válvula Tesla. Os resultados indicaram que um ângulo de 133° proporcionou a maior diodicidade, a qual foi ainda incrementada em 9.97% com a introdução de elementos inspirados em válvulas bocal/difusor. Embora válvulas Tesla apresentem maior eficácia em regimes de número de Reynolds elevado ($Re > 100$), os autores demonstraram que, com otimização geométrica, é possível obter um bom desempenho também em regimes de baixo Reynolds, tornando-as adequadas para aplicações microfluídicas de baixa vazão.

Sheen et al.[14] realizaram um estudo detalhado do comportamento do escoamento pulsátil em uma microbomba piezoelétrica com válvulas sem partes móveis, utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas em microescala (micro-PIV) com disparo externo sincronizado. A região de análise contemplava as regiões anteriores à entrada e posteriores à saída das válvulas, onde foi possível observar o comportamento do escoamento pulsátil. A bomba analisada utilizava elementos bocal/difusor com ângulo de abertura de 7° , projetados para gerar uma resistência hidráulica dependente da direção do escoamento, promovendo um escoamento preferencial na direção divergente e, portanto, permitindo o escoamento mesmo na ausência de componentes móveis. Foram utilizadas partículas fluorescentes de 700 nm de diâmetro, com pico de emissão em 612 nm . A excitação foi feita por um laser Nd:YAG de comprimento de onda 532 nm , e a emissão foi filtrada por um filtro passa-

alta de 605 nm, reduzindo o ruído de fundo. As imagens foram capturadas por uma câmera CCD com resolução de 1600×1200 pixels. Para viabilizar a aquisição sincronizada das imagens com o ciclo de excitação, foi empregado um sistema de sincronização com disparo externo e trava de fase. Um gerador de funções fornecia simultaneamente o sinal quadrado amplificado para excitação da pastilha piezelétrica e o sinal de gatilho, com atraso fixo em relação ao sinal de excitação. Esse sinal era então enviado a um sincronizador com resolução temporal de 10^{-9} s, responsável por acionar os pulsos do laser e coordenar a captura das imagens. Cem pares de imagens eram adquiridos em cada fase do ciclo, permitindo a reconstrução dos campos de velocidade médios no interior da cavidade. A faixa de frequência analisada variou entre 0.1 e 5 kHz, sendo identificada uma condição de ressonância em 1.9 kHz, na qual se observou a maior vazão volumétrica, com $28.4 \mu L/min$, e uma diodicidade de $Di = 1.12$, indicando maior volume transportado na fase de bombeamento em relação à fase de retorno. A bomba operou sob regime laminar, com números de Reynolds inferiores a $Re < 115$.

Saffar et al.[15] utilizaram o PIV para investigar o escoamento interno de uma válvula Tesla de dois canais de 2 mm de largura, fabricada por impressão 3D em resina transparente. O escoamento foi analisado em regime contínuo, em ambas as direções (direta e reversa), para números de Reynolds variando entre $100 < Re < 600$. Para a captura das imagens, foi utilizada uma câmera CCD de alta velocidade, operando a 2000 fps com resolução de 1536×768 pixels para $Re \leq 300$ e a 4000 fps com 1280×512 pixels para $Re \geq 400$. O canal foi iluminado por baixo com um LED verde e utilizou partículas de esferas de vidro de $10 \mu m$ a $20 \mu m$ de diâmetro, suspensas em água. O PIV padrão foi essencial para mapear o campo de velocidade médio e identificar regiões de separação e formação de vórtices, especialmente nas zonas de bifurcação da válvula. No entanto, os autores apontam limitações do PIV na resolução do escoamento próximo às paredes.

Hu et al.[3] utilizaram a válvula Tesla TR-45 como modelo de referência para investigar numericamente o desempenho de válvulas Tesla sob escoamento contínuo e regime laminar, com número de Reynolds variando entre $0.001 \leq Re \leq 300$ ($Re = \frac{\rho \bar{V} \cdot D_h}{\mu}$, onde $\bar{V}$ é a velocidade média na região da garganta e D_h , diâmetro hidráulico). A simulação tridimensional realizada com ANSYS Fluent, considerou escoamento incompressível de água em microcanais com seção quadrada de 0,1 mm, adotando condições de contorno fixas e malha refinada nas regiões críticas. Os resultados demonstraram que, para ($Re < 10$), o escoamento na TR-45 é essencialmente linear, sem formação de bolhas de separação, resultando em uma diodicidade praticamente constante e próxima

de 1. A partir de $Re \approx 10$, observou-se a formação de bolhas de separação nas junções da válvula, especialmente no escoamento reverso, aumentando a resistência e eleva a diodicidade, que atinge aproximadamente $Di = 1.2$ em $Re = 300$. Embora o estudo tenha identificado um desempenho ótimo para válvulas com ângulos entre 70° e 80° , a TR-45 apresentou boa eficiência em baixos Reynolds, além de menores perdas de carga no escoamento direto.

A partir desta breve revisão, é possível observar que as bombas piezoelétricas ainda são uma tecnologia em desenvolvimento. Muitos aspectos de desempenho dependem das características geométricas e de operação. Em geral, essas bombas operam em regimes de baixo número de Reynolds, apresentam baixa eficiência e suas válvulas costumam possuir baixa diodicidade, limitando o desempenho. O campo de velocidades do escoamento nas válvulas é um parâmetro chave para entender o funcionamento do dispositivo. Este trabalho pretende ajudar a preencher essa lacuna.

3

Objetivos

Este trabalho procura caracterizar três bombas piezoelétricas com diferentes configurações de válvulas, avaliando seu desempenho e comportamento em distintas condições de operação. Duas dessas bombas utilizam válvulas Tesla tanto na entrada quanto na saída. A primeira é equipada com válvulas Tesla de dois canais, enquanto a segunda apresenta válvulas Tesla de quatro canais, possibilitando uma análise comparativa entre as configurações. A terceira bomba adota uma abordagem distinta, empregando uma configuração de válvulas do tipo bocal/difusor, onde o bocal está localizado na entrada e o difusor na saída.

Para cumprir o objetivo geral, foram definidos quatro objetivos específicos:

1. **Determinar a frequência de pulsação do piezoelétrico que proporciona a maior vazão:** Identificar a frequência de acionamento do piezoelétrico resultante na maior vazão em uma condição de saída com extremo livre.
2. **Analisar a vazão no modo contínuo para distintas diferenças de pressão:** Avaliar e interpretar o desempenho das bombas em operação contínua, considerando o impacto das diferenças de pressão sobre a vazão.
3. **Determinar a eficiência das válvulas:** Identificar e analisar a diodidade das válvulas em operação contínua, avaliando a eficiência na condução unidirecional do escoamento.
4. **Mapear os campos de velocidade das válvulas no modo pulsátil:** Obter dados detalhados sobre a distribuição e a dinâmica das velocidades no interior das válvulas durante a operação pulsátil, utilizando a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV).

4

Construção do aparato experimental

Neste capítulo, inicialmente, são apresentados os procedimentos adotados no projeto das bombas piezoelétricas. São descritas as metodologias utilizadas para o dimensionamento das válvulas Tesla e das válvulas do tipo bocal/difusor, com destaque para os critérios empregados em sua concepção e construção.

Na sequência, aborda-se o processo de fabricação das bombas piezoelétricas, detalhando os métodos utilizados, os materiais escolhidos e os acabamentos aplicados para assegurar a qualidade e funcionalidade necessárias aos procedimentos experimentais.

Por fim, são descritas as especificações da bancada experimental, incluindo sua configuração detalhada e os equipamentos empregados para a realização dos testes e a coleta de dados.

4.1

Projeto das válvulas

Nesta seção, são apresentadas as metodologias empregadas nos projetos das válvulas, abrangendo os princípios de funcionamento, as formulações teóricas e os parâmetros técnicos utilizados nos processos de dimensionamento e análise.

4.1.1

Válvulas Tesla

As válvulas Tesla baseiam-se na criação de regiões de recirculação de escoamento que influenciam a resistência ao escoamento em determinada direção [3]. Esse comportamento permite que o fluido flua com maior facilidade em uma direção — denominada escoamento direto — enquanto enfrenta maior resistência na direção oposta, conhecida como escoamento reverso.

A válvula Tesla utilizada neste trabalho é composta por três partes principais: uma seção de entrada, uma seção bifurcada e uma seção de saída, conforme a figura 4.1. As seções de entrada e saída se alternam funcionalmente conforme ocorre a inversão da direção do escoamento. A seção bifurcada é constituída por dois canais [2]: um canal reto e um canal em arco. Quando um fluido adentra a válvula pelo canal alinhado com o canal reto da seção bifurcada, o escoamento é denominado escoamento direto. Por outro lado, quando o fluido ingressa pela extremidade oposta, o escoamento é classificado como escoamento reverso.

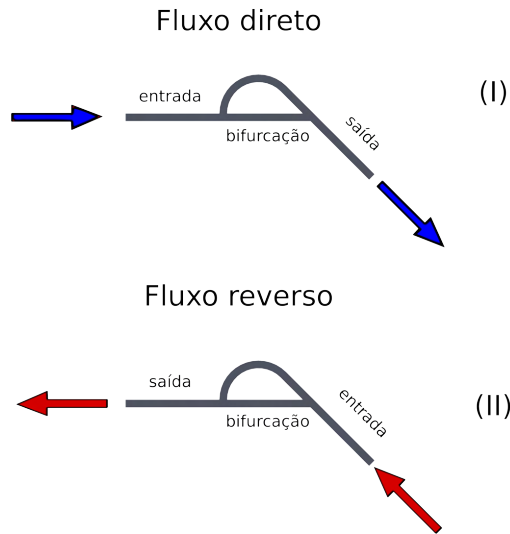


Figura 4.1: (I) escoamento direto e (II) escoamento reverso. Adaptado de Qian et al.[2].

Os principais aspectos que caracterizam as válvulas são: a diodicidade, número de Reynolds e a geometria.

A diodicidade é uma das características mais importantes para válvulas direcionais sem partes móveis, sendo definida como a razão entre as perdas de carga no escoamento reverso ($\Delta P_{reverso}$) e no escoamento direto (ΔP_{direto}), para uma vazão Q . Essa propriedade pode ser calculada pela equação (4-1) [13]:

$$D_i = \frac{\Delta P_{reverso}}{\Delta P_{direto}} \quad (4-1)$$

Lin et al.[25] e Goli et al.[26] apresentam uma forma alternativa para calcular a diodicidade, que é fixar a pressão de acionamento e tomar a razão entre as vazões nos dois sentidos, conforme a equação (4-2):

$$D_i = \frac{Q_{direto}}{Q_{reverso}} \quad (4-2)$$

Fisicamente, altos valores de D_i indicam que a válvula impõe maior resistência ao escoamento reverso do que ao escoamento direto.

Na condição de escoamento reverso há uma restrição ao escoamento devido à interação do escoamento na junção de saída da bifurcação. Logo, quando o fluido tenta se mover na direção oposta, as zonas de recirculação obstruem a saída da válvula e forçam o fluido a entrar nos canais curvos.

Outro fator determinante é a influência do número de Reynolds (Re), que define o regime do escoamento [13]. Para valores baixos de Reynolds, o escoamento permanece laminar, reduzindo a divisão do escoamento. À medida que o número de Reynolds aumenta, o escoamento torna-se mais instável, favorecendo a divisão do escoamento que aumenta a perda de carga no escoamento reverso.

Por fim, a geometria da válvula é outro elemento essencial que impacta diretamente sua eficiência. Parâmetros geométricos como o ângulo θ , o raio do arco R e o comprimento interno L_1 (detalhados na figura 4.3) tem relevância no comportamento das válvulas. Essas válvulas podem ser combinados em diferentes arranjos para aumento de diodicidade, conforme a figura 4.2.

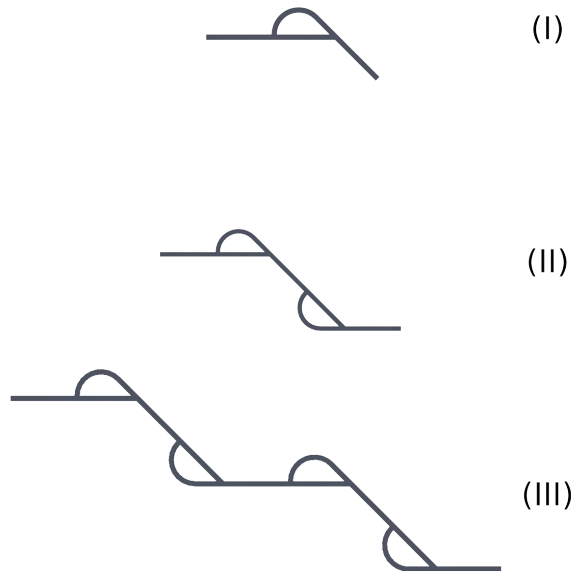


Figura 4.2: (I) válvula Tesla com 1 canal e (II) válvula Tesla com 2 canais e (III) válvula Tesla com 4 canais.

O projeto das válvulas Tesla baseia-se na manipulação dos parâmetros geométricos fundamentais, como os comprimentos L_1 e L_2 , o ângulo β , o ângulo θ e o raio R . Esses elementos são cuidadosamente ajustados para garantir o comportamento de diodicidade da válvula, ou seja, sua capacidade de permitir o escoamento em uma direção com menor resistência enquanto dificulta o escoamento na direção oposta [3].

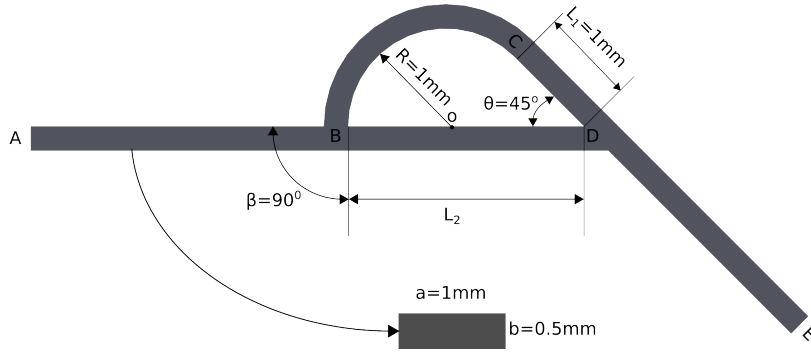


Figura 4.3: Relações geométricas de projeto das válvulas Tesla. Adaptado de Hu et al.[3].

O comprimento L_1 representa a extensão do segmento reto que conecta a entrada do arco ao ponto de tangência com a linha horizontal. Esse parâmetro influencia diretamente o raio do arco (R) [3]. O raio do arco pode ser calculado pela equação (4-3) :

$$R = L_1 \tan \theta \quad (4-3)$$

onde θ é o ângulo de inclinação do arco em relação à horizontal.

Já o comprimento total L_2 é obtido pela equação (4-4) sendo a soma do raio do arco R e da projeção ajustada de L_1 , sugerido em Hu et al.[3]:

$$L_2 = R + \frac{L_1}{\cos \theta} \quad (4-4)$$

Esse parâmetro define a extensão total da válvula, incluindo tanto a parte reta quanto a curvada. O ângulo β refere-se à transição entre o arco e o segmento reto da válvula, influenciando o comportamento do fluido nos pontos de junção. Por sua vez, o ângulo θ é um dos fatores mais críticos no projeto, já que alterações nesse ângulo modificam a resistência do escoamento.

A Figura 4.4 ilustra as geometrias das válvulas Tesla utilizada neste trabalho. A configuração T45-R com 4 canais mantém a mesma geometria básica dos canais presentes na configuração T45-R com 2 canais, diferenciando-se somente pelo número de canais adicionados.

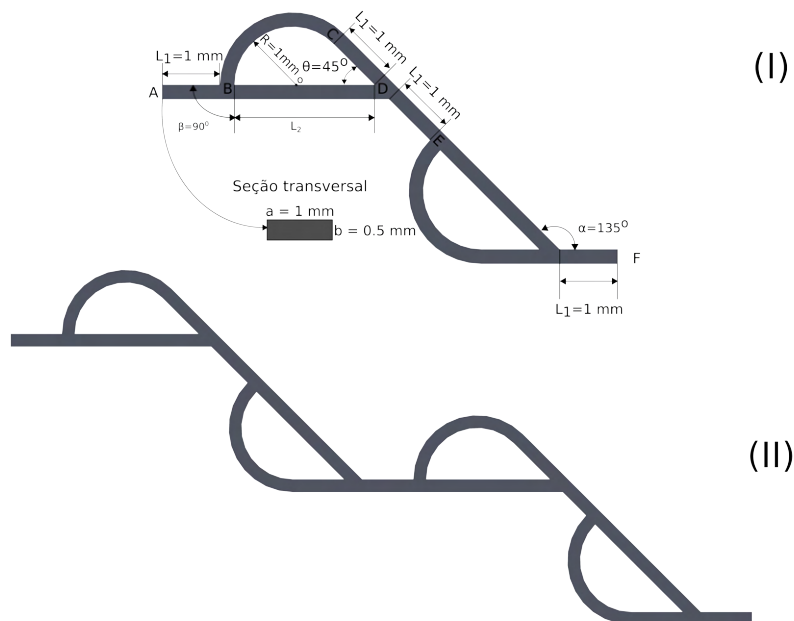


Figura 4.4: (I) válvula Tesla T45-R de 2 canais e (II) válvula Tesla T45-R de 4 canais.

4.1.2

Válvulas bocal/difusor

As válvulas bocal/difusor operam de maneira passiva [1], utilizando a geometria dos bocais e difusores para gerar diferenças de resistência ao escoamento, promovendo a movimentação direcional de fluido sem a necessidade de componentes mecânicos móveis.

O bocal é um duto convergente que acelera o fluido, criando maior resistência ao escoamento, enquanto o difusor é um duto divergente que desacelera o fluido, reduzindo a resistência [16]. Quando usados em pares, esses elementos geram uma assimetria nas perdas de pressão, resultando em uma diferença no volume de fluido transportado em cada ciclo.

As bombas que utilizam válvulas baseadas em geometrias de bocal e difusor operam em dois modos alternados: sucção e bombeamento. O difusor atua como entrada por apresentar menor perda de carga ao escoamento. No sentido das setas da figura 4.5 (I), há um aumento de volume na câmara, que reduz a pressão. Nessa condição, o escoamento no bocal de saída é mais restrito devido à maior perda de carga. Essa diferença de perda de carga pode ser explicada pelos perfis de velocidade. No caso do difusor os perfis tendem a exibir derivadas mais suaves próximo à parede devido ao aumento de área

e conseqüentemente o aumento de pressão, já no bocal os perfis tendem a exibir maiores velocidades devido à aceleração. Já no modo de bombeamento, a compressão da câmara aumenta. Assim, a válvula de saída se torna um difusor, enquanto a entrada vira um bocal, conforme ilustra a figura 4.5 (II). Essa inversão entre os modos favorece o deslocamento preferencial do fluido em uma das direções.

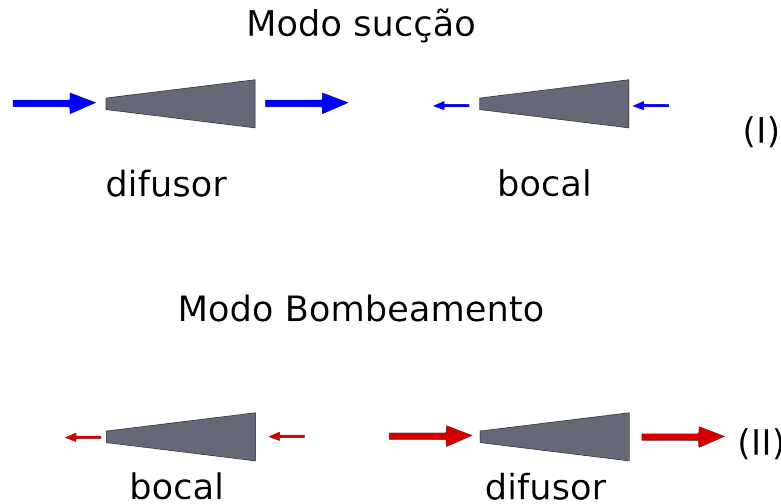


Figura 4.5: (I) modo sucção e (II) modo bombeamento.

Para o projeto do difusor utilizado neste trabalho, foram considerados parâmetros geométricos fundamentais, como a razão de esbeltez ($\frac{L}{W_1}$) e o ângulo de divergência (2ϕ), a fim de garantir que o dispositivo operasse em uma região eficiente do mapa de estabilidade de difusores, conforme ilustra a figura 4.6.

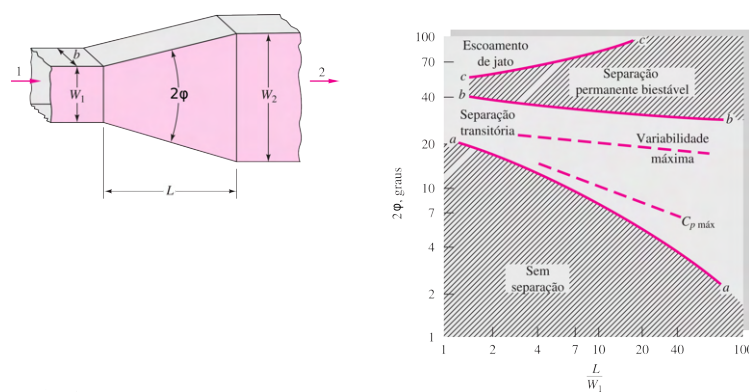


Figura 4.6: mapa de estabilidade difusores. Adaptado White[4].

O difusor foi projetado com as seguintes características:

1. Comprimento do difusor (L): 7.00 mm;
2. Ângulo de divergência (2ϕ): 10.6° ;

3. Seção transversal: entrada de $1.00 \text{ mm} \times 0.50 \text{ mm}$ e saída de $1.00 \text{ mm} \times 1.80 \text{ mm}$.

As dimensões do difusor/bocal utilizado neste trabalho é ilustrado na figura 4.7.

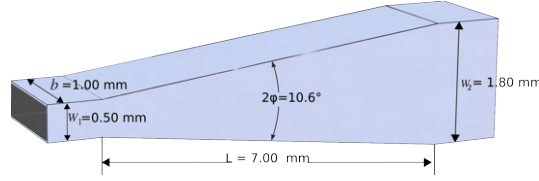


Figura 4.7: Dimensões do difusor/bocal.

Com essas dimensões, a razão de esbeltez é calculada pela equação (4-5):

$$\frac{L}{W_1} = \frac{7}{0.5} = 14 \quad (4-5)$$

De acordo com White[4], difusores operando com $\frac{L}{W_1}$ entre 10 e 20 e 2ϕ entre 8° e 12° estão geralmente na região de estol transicional no gráfico de estabilidade da figura 4.6. Essa região é caracterizada por separação mínima de escoamento, resultando em perdas de pressão reduzidas e maior eficiência. Mohammadzadeh et al.[13] e Singh et al.[23] corroboram que configurações semelhantes a essa são ideais para aplicações em bombas que utilizam difusores como válvulas passivas devido à maximização da diodicidade.

Esse parâmetro é crucial para o desempenho da bomba, pois para ocorrer a ação de bombeamento, a diodicidade deve ser maior que 1 ($Di > 1$). Quanto maior for a diodicidade, maior será a eficiência do ciclo de bombeamento, indicando menor perda de carga no sentido do difusor em comparação com o bocal. Trabalhos como os de Stemme e Stemme[16] e Singh et al.[23] reforçam que a geometria otimizada dos difusores contribui significativamente para alcançar altos valores de diodicidade Di . Os resultados dos trabalhos indicam que:

1. Para $2\phi = 10.6^\circ$, como no presente estudo, os difusores operam eficientemente.
2. A razão $\frac{L}{W_1} = 14$ posiciona o difusor firmemente na região de transição.

Neste trabalho, para o cálculo do número de Reynolds nas válvulas bocal/difusor, será considerado o diâmetro hidráulico na região da garganta, conforme adotado nos trabalhos de Olsson et al.[19] e Sun e Yang[21].

4.2

Fabricação das bombas

As bombas analisadas neste estudo são compostas por três componentes principais: o corpo da bomba, o sensor piezoelétrico e a tampa, conforme ilustrado na Figura 4.8.

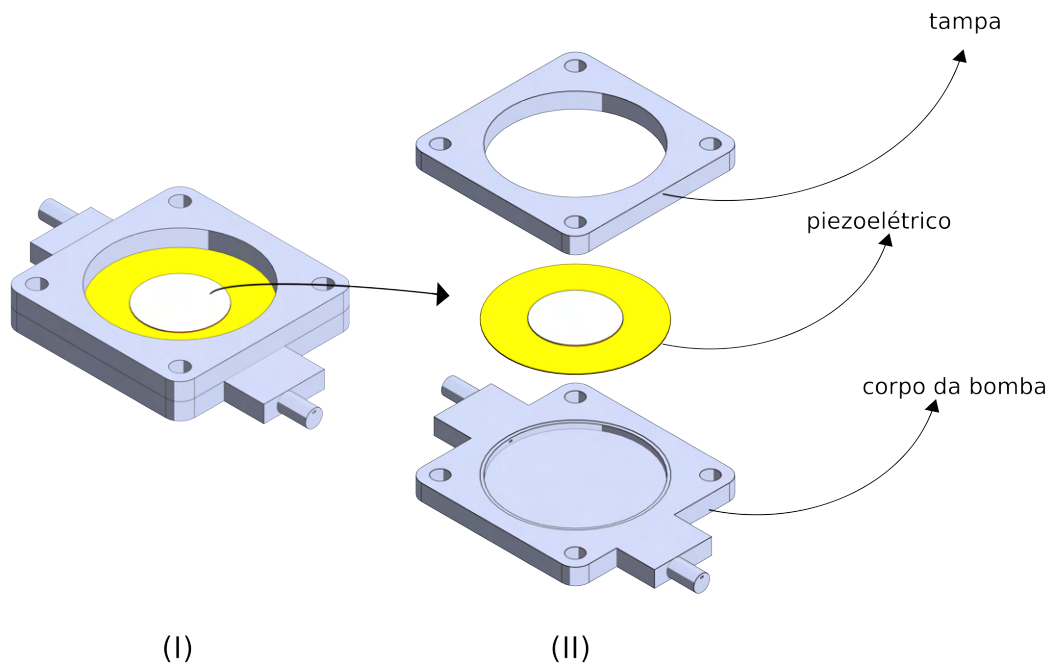


Figura 4.8: (I) Bomba montada e (II) seus componentes.

O corpo da bomba é constituído por duas partes principais: a câmara e as válvulas. Todas as bombas utilizadas neste trabalho possuem um diâmetro da câmara de $D_{cam} = 48\text{ mm}$ e altura de $h_{cam} = 2\text{ mm}$. As dimensões e a geometria das válvulas Tesla são apresentadas na Figura 4.4, localizada na Subseção 4.1.1. Já as dimensões do bocal/difusor estão detalhadas na Figura 4.7, na subseção 4.1.2. A Figura 4.9 ilustra as válvulas internas do corpo da bomba, bem como os diferentes tipos de válvulas utilizadas neste estudo.

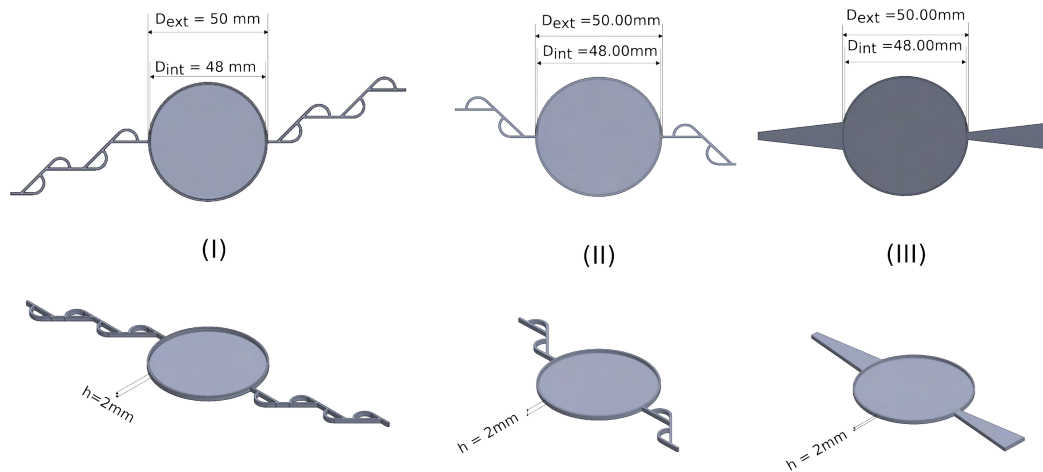


Figura 4.9: (I) Bomba com válvulas T45-R 4 canais, (II) Bomba com válvulas T45-R 2 canais e (III) Bomba com válvulas bocal/difusor.

Nas próximas seções, serão apresentados o princípio de funcionamento do sensor piezoelétrico, os processos de fabricação e acabamento aplicados às bombas, e, por fim, os detalhes sobre a montagem do sistema na bancada experimental.

4.2.1

Sensor piezoelétrico

A piezoelectricidade é a propriedade de certos materiais de gerar uma diferença de potencial elétrico quando sujeitos a uma deformação mecânica ou, de maneira inversa, de sofrer uma deformação mecânica quando expostos a um campo elétrico [27]. No caso das bombas piezoelétricas, o funcionamento é baseado no efeito piezoelétrico inverso, no qual a aplicação de um campo elétrico gera a deformação necessária para o acionamento do dispositivo. Neste trabalho, é utilizado um piezoelétrico com eletrodo de prata e base de latão, possuindo um diâmetro de 50.00mm . A figura 4.10 apresenta as dimensões do piezoelétrico e ilustra o modo de funcionamento do dispositivo.

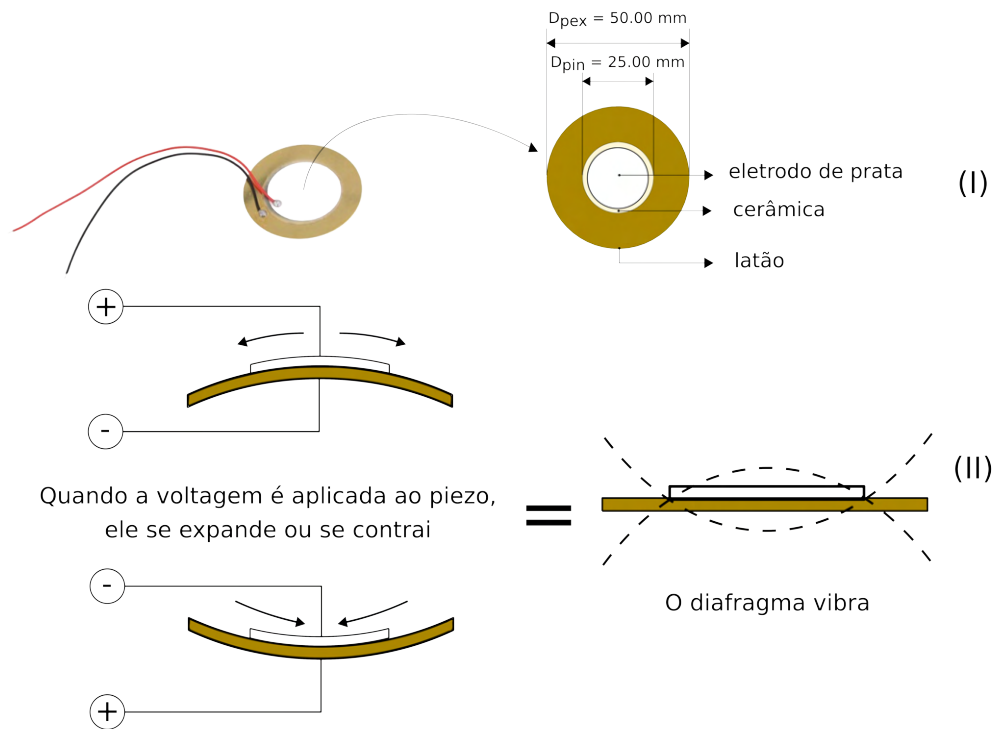


Figura 4.10: (I) Piezoeletrico e suas dimensões e (II) modo de funcionamento do piezoeletrico.

4.2.2

Processo de fabricação das bombas

A manufatura aditiva (AM) é um processo de fabricação que ocorre pela adição sucessiva de material em camadas, utilizando informações obtidas diretamente de um modelo geométrico tridimensional (3D) criado em um software CAD (projeto e desenho assistidos por computador). Esse processo permite a criação de componentes físicos a partir de diversos materiais e formatos, de maneira automatizada e com rapidez superior em comparação aos métodos de fabricação tradicionais. Graças a essa abordagem, a manufatura aditiva se consolidou como uma solução inovadora e eficiente para produção de peças com geometrias complexas [5].

O processo de manufatura aditiva pode ser descrito em cinco etapas principais. Primeiramente, realiza-se a modelagem tridimensional, na qual o modelo geométrico é criado com o uso de um software de modelagem 3D. Em seguida, ocorre a preparação do modelo, com a conversão para formatos específicos, como STL (*STereoLithography*), adequados ao processo. Posteriormente, é feito o planejamento do processo, que inclui o fatiamento do modelo em camadas bidimensionais, a definição de estruturas de suporte e a elaboração de estratégias de deposição de material. A quarta etapa corresponde à fabrica-

ção propriamente dita, na qual as camadas são adicionadas sucessivamente, conforme planejado. Por fim, realiza-se o pós-processamento, que pode envolver limpeza, tratamentos adicionais e acabamento, dependendo da tecnologia utilizada.

O processo de manufatura aditiva utilizado neste trabalho é fotopolimerização por projeção de máscaras. Nesse processo, utiliza-se uma fonte de luz UV para curar seletivamente uma resina fotossensível líquida em camadas. O processo se inicia por fatiar o modelo que foi previamente criado em CAD, gerando imagens bidimensionais (bitmaps) de cada camada. Essas imagens são projetadas sobre a superfície da resina líquida usando um dispositivo de microespelhos digitais (DMD), que controla a projeção da luz. A cura ocorre simultaneamente em toda a extensão da camada projetada. Em seguida, a plataforma de construção é movida, permitindo a adição de nova resina para a cura da próxima camada. Este método apresenta alta precisão dimensional [5], com resoluções que podem variar de 10 a 100 μm , e utiliza predominantemente resinas acrílicas ou epoxídicas adaptadas a diferentes aplicações. A figura 4.11 ilustra o processo de fotopolimerização por projeção de máscaras.

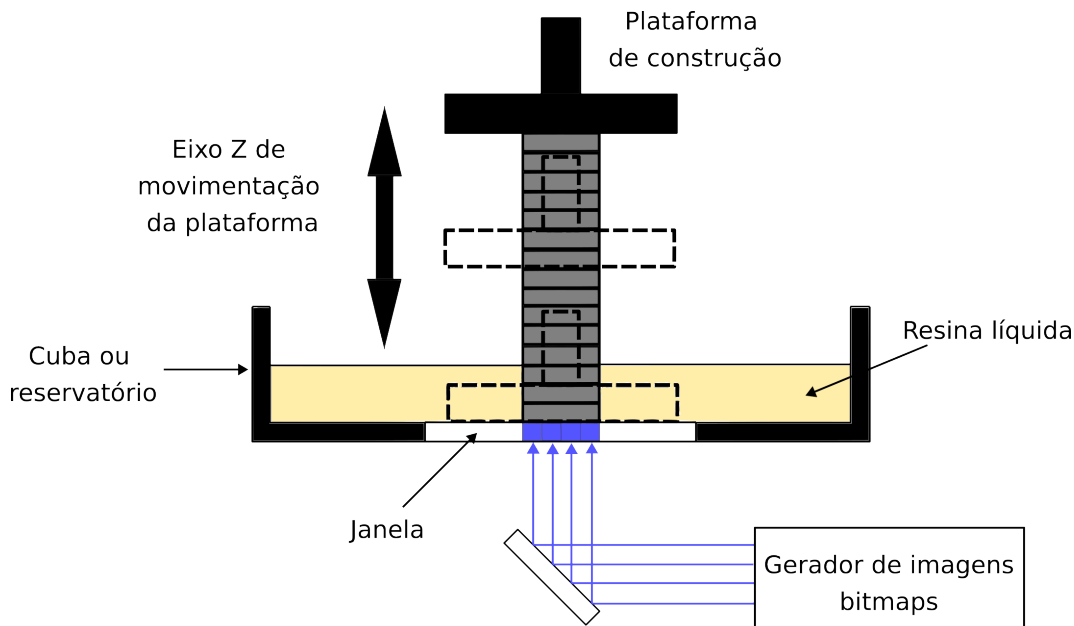


Figura 4.11: Processo de fotopolimerização por projeção de máscaras. Adaptado de Volpato[5]

O processo de fotopolimerização por projeção de máscaras possui diversas vantagens. Entre elas, destaca-se a elevada precisão dimensional e a capacidade de produzir geometrias complexas com rapidez, devido à cura simultânea de toda a camada projetada [5]. Além disso, é amplamente utilizado para criação de peças transparentes ou semitransparentes, ideais para visualização de detalhes internos.

Apesar das vantagens, esse processo também apresenta algumas desvantagens. Uma limitação importante é a restrição de materiais, já que apenas resinas sensíveis à luz UV podem ser utilizadas. Ademais, as peças necessitam geralmente de pós-cura em forno para alcançar suas propriedades mecânicas finais. Outro ponto negativo é a dependência de equipamentos especializados, cujo custo de aquisição e operação pode ser elevado.

A impressora 3D utilizada neste trabalho é a Phrozen Sonic Mighty 8K. O equipamento emprega uma tela LCD monocromática de 10 pol. com resolução 8K (7680×4320 pixel); isso faz com que cada pixel possua dimensões aproximadas de $28 \mu\text{m}$ no plano XY. A espessura das camadas (resolução no eixo Z) pode ser ajustada entre 0.01 e 0.30 mm [28]. Para este estudo, foi utilizada a resina transparente Anycubic 3D Printing UV Sensitive Resin.

Após a impressão, as peças são lavadas em uma máquina de lavagem da Phrozen, utilizando álcool isopropílico de teor 99.5% como solvente. O processo de cura é realizado em uma máquina de cura da mesma marca, garantindo a finalização adequada do material impresso. A figura 4.12 ilustra a resina e os equipamentos utilizados neste trabalho.



Figura 4.12: (I) Impressora 3D, (II) resina, (III) lavadora e (IV) cura.

A Figura 4.13 apresenta os modelos 3D das tampas e do corpo da bomba, juntamente com suas respectivas versões impressas.

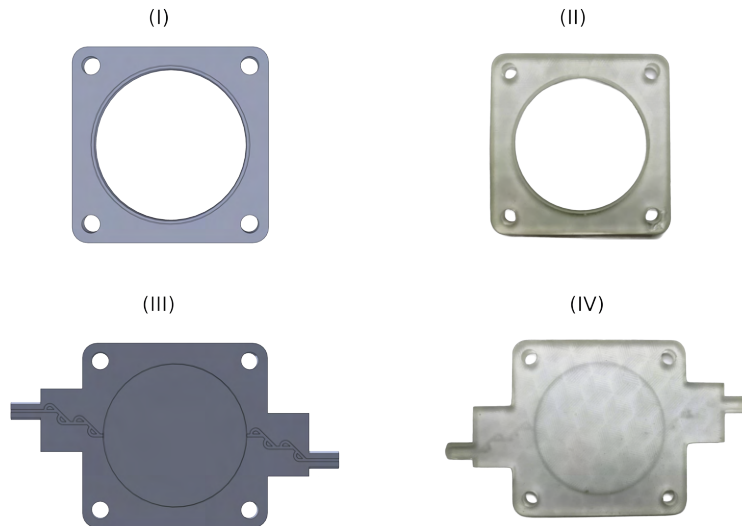


Figura 4.13: (I) modelo da tampa, (II) tampa impressa, (III) modelo do corpo da bomba e (IV) corpo da bomba impressa.

Após a impressão, o piezoelétrico é inserido na bomba, que então é vedada com um selante de silicone acético. Após a vedação, realiza-se um trabalho de acabamento para tornar a bomba transparente, permitindo sua utilização em ensaios de PIV. O processo de acabamento inclui um lixamento progressivo com lixa d'água de granulação n° 400 a n° 1200, seguido de um polimento com pasta de polir n° 2. Esse processo é ilustrado pela figura 4.14.

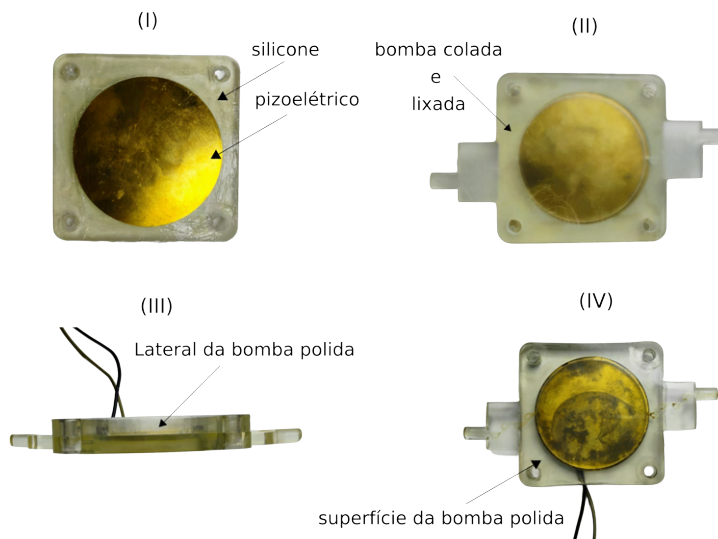


Figura 4.14: (I) aplicação do silicone, (II) colagem e lixamento da bomba, (III) lateral polida e (IV) superfície da bomba polida.

4.3

Construção da Bancada

A Figura 4.15 apresenta o esquema da bancada utilizada neste trabalho.

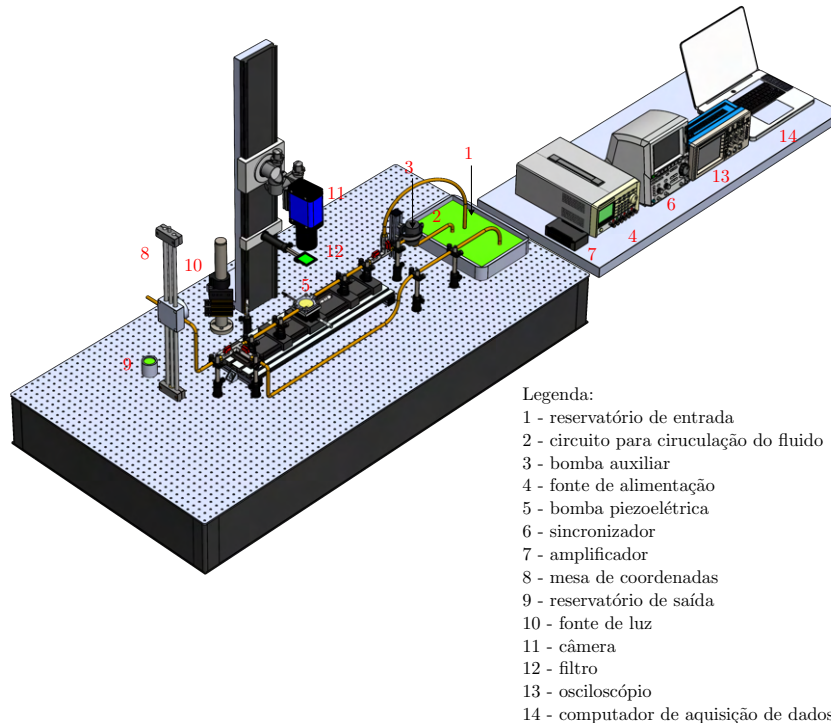


Figura 4.15: bancada e instrumentos de medições.

A bancada funciona da seguinte forma: o fluido sai do reservatório de entrada (1) e entra no circuito (2) com o auxílio da bomba auxiliar (3), que também contribui para a remoção de ar do sistema. Essa bomba é alimentada pela fonte de alimentação (4). Após a completa retirada do ar, a bomba auxiliar é desligada, e o escoamento passa a ser impulsionado pela bomba piezoelétrica (5), acionada por um dos canais do sincronizador (6), tendo seu sinal amplificado pelo amplificador (7). A mesa de coordenadas (8) é utilizada para ajustar a altura da mangueira na saída, onde está localizado o reservatório de saída (9). A fonte de luz (10) — que pode ser composta por um LED ou um laser — fornece a iluminação necessária para a captura das imagens pela câmera (11), equipada com um filtro passa-alta (12). A câmera, a fonte de iluminação e atuador piezoelétrico estão sincronizadas por meio do sincronizador. Os sinais gerados por cada canal do sincronizador podem ser visualizados no osciloscópio (13), e os dados adquiridos são processados no computador (14).

4.3.1

Sistema hidráulico

O sistema hidráulico é composto por um reservatório de entrada, válvulas esféricas, uma bomba auxiliar, uma bomba piezoelétrica e um reservatório de saída, conforme ilustrado na Figura 4.16. O reservatório de entrada tem a função de armazenar o fluido antes de sua entrada no circuito, enquanto o reservatório de saída é utilizado para coleta do fluido na mangueira no final do circuito. As válvulas esféricas controlam a direção do escoamento, permitindo que o fluido retorne ao reservatório de entrada ou siga para o reservatório de saída. A bomba auxiliar, cujas especificações estão detalhadas na Tabela 4.1 e ilustrada na figura 4.17, é utilizada na etapa inicial para preencher o circuito e remover o ar residual, assegurando que o sistema esteja devidamente preparado para operação. Após essa etapa, o escoamento passa a ser impulsionado pela bomba piezoelétrica, que promove o transporte do fluido por meio de vibrações geradas por um atuador piezoelétrico. Por fim, a mesa de coordenadas é empregada para ajustar a altura da saída do fluido, controlando a diferença de pressão de altura.

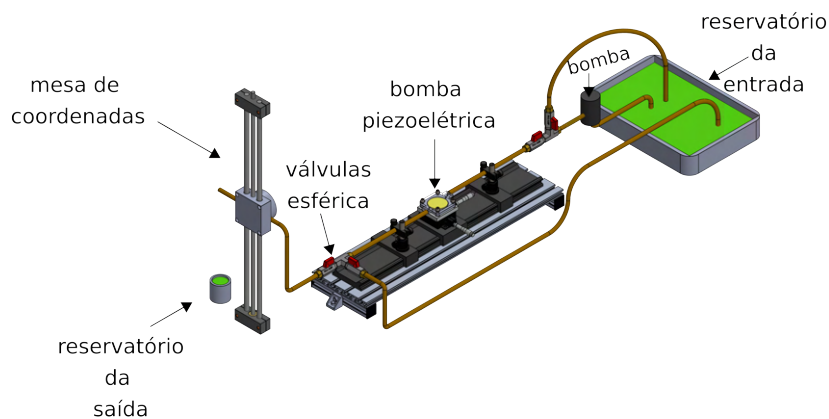


Figura 4.16: sistema hidráulico

Parâmetro da bomba	Valor
Marca	Vetor
Número de saídas	1
Voltagem da bomba	12 V
Corrente	4.1 A
Pressão	2.5 bar (250000 Pa)

Tabela 4.1: Especificações da Bomba de auxiliar. Fonte: vetor



Figura 4.17: bomba auxiliar. Fonte Vetor

Para o acionamento do piezoelétrico é utilizado um amplificador da marca Wishcolor, cujas especificações são detalhadas na tabela 4.2. O sinal de entrada fornecido pelo sincronizador é uma onda quadrada que varia de 0V a 5V e essa tensão é amplificada pela tensão máxima que o amplificador fornece que é 130V. A figura 4.18 ilustra o amplificador utilizado.

Parâmetros Técnicos do Amplificador Wishcolor	Valor
marca	Wishcolor
tensão de alimentação	9 v DC
tensão máxima de saída	130 V
amplificação	10 a 44 vezes

Tabela 4.2: Especificações técnicas do amplificador Wishcolor utilizado no acionamento do piezoelétrico. Fonte: Wishcolor



Figura 4.18: Amplificador Wishcolor. Fonte wishcolor

4.3.2

Sistema de aquisição de imagens

O sistema de aquisição de imagens é composto por uma câmera de alta velocidade Phantom Miro M340, um filtro passa-alta e uma fonte de iluminação, que pode variar conforme o teste realizado, sendo utilizadas duas opções: um laser de 5 W (modelo C40, marca ZBAITU) ou um LED verde pulsátil de alta potência (modelo LX-104, marca Hardsoft). A câmera é utilizada para capturar o movimento das partículas presentes nas válvulas do sistema, permitindo a análise do escoamento interno com alta resolução temporal. O filtro passa-alta é empregado para garantir a qualidade óptica da imagem ao bloquear comprimentos de onda indesejados.

A sincronização entre a câmera, a fonte de iluminação e o atuador piezelétrico é realizada por meio de um sincronizador da marca BNC, modelo 575, que gera os sinais de trigger necessários para coordenar o disparo da câmera e da fonte de luz com o sinal de excitação do atuador. O sistema conta ainda com uma fonte de alimentação, marca TENMA DC power supply 72 - 6615, dedicada para o laser e para a bomba auxiliar, além de um osciloscópio digital Minipa MO-2061, utilizado para monitorar os sinais de trigger emitidos pelo sincronizador, assegurando a correta temporização entre os componentes.

A aquisição e o armazenamento das imagens são realizados por um computador, que também é responsável pelo processamento e pós-processamento dos dados por meio de programas desenvolvidos em MATLAB, permitindo a análise quantitativa do comportamento do fluido e do desempenho das válvulas. O esquema da figura 4.19 ilustra o sistema de aquisição de imagens.

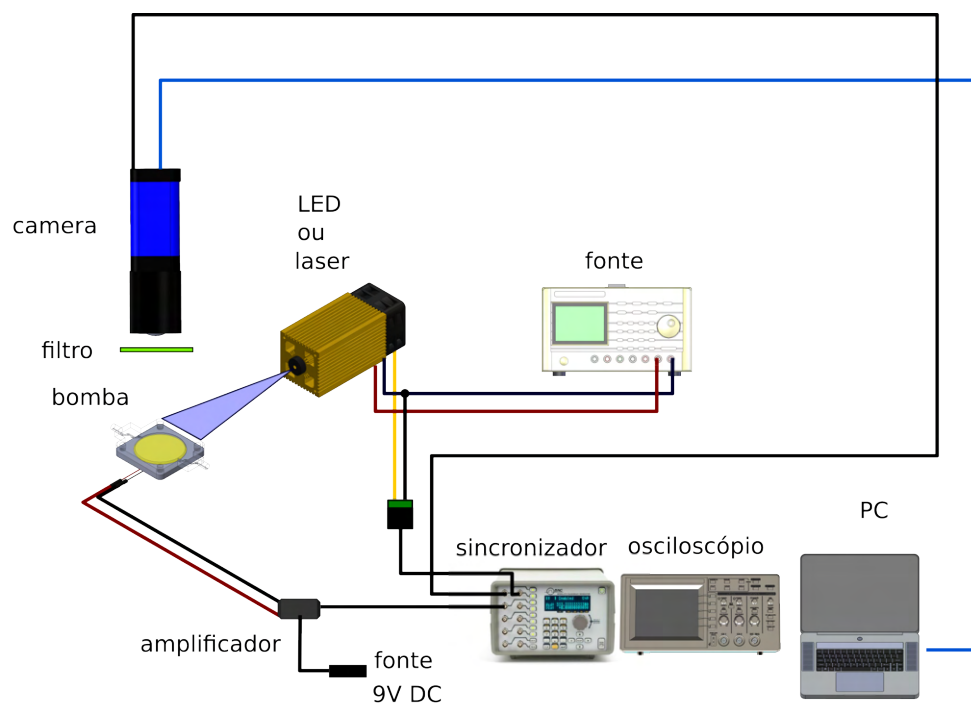


Figura 4.19: Configuração utilizando o laser.

5
Metodologia experimental

Nesta seção, descrevem-se as metodologias experimentais empregadas para determinar a vazão e os campos de velocidade.

5.1
Medidas de vazão

A Figura 5.1 apresenta a bancada utilizada para os testes de vazão. As válvulas, numeradas de 1 a 4, são acionadas de acordo com diferentes configurações operacionais, determinadas pelas combinações de abertura e fechamento.

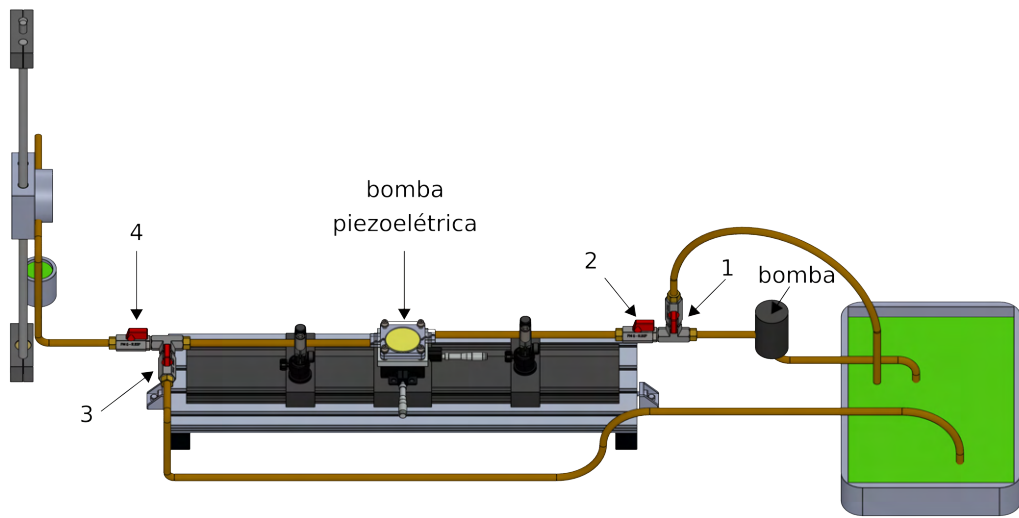


Figura 5.1: válvulas do sistema hidráulico

A tabela 5.1 apresenta as diferentes configurações das válvulas utilizadas durante os testes, bem como a função associada a cada arranjo.

Configuração	Válvula 1	Válvula 2	Válvula 3	Válvula 4
Enchimento da bomba auxiliar	Aberta	Fechada	—	—
Extremo livre	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta
modo contínuo	Fechada	Aberta	Aberta	Fechada

Tabela 5.1: Configurações das válvulas.

Para o acionamento do atuador piezoelétrico, utilizou-se um sinal pulsátil, variando de 0 a 5V, gerado e controlado por Arduino. Esse sinal é então amplificado pelo amplificador até atingir 130V, garantindo o acionamento eficiente do atuador. Além disso, a bomba auxiliar, alimentada por uma fonte

externa, é responsável por preencher o sistema com fluido e auxiliar na remoção de bolhas de ar, assegurando o funcionamento adequado dos testes. A Figura 5.2 ilustra o circuito utilizado na bancada experimental.

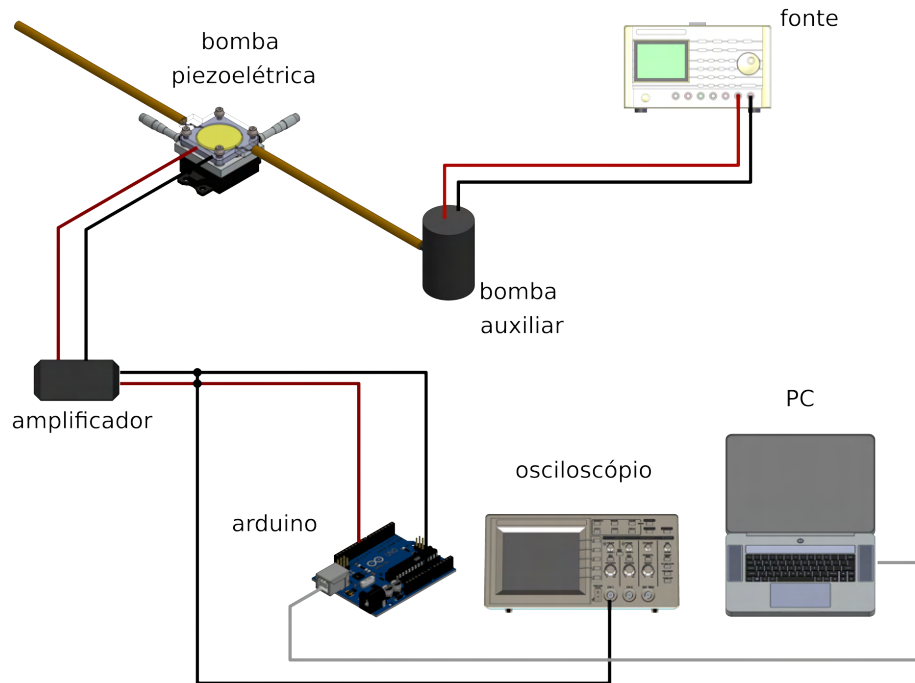


Figura 5.2: Esquema da montagem do experimento vazão

O objetivo do primeiro teste foi determinar a frequência de acionamento do piezoelétrico que proporciona a maior vazão líquida do sistema — ou seja, o volume efetivamente transportado em um dado intervalo de tempo, uma vez que, em razão do caráter pulsátil do sistema, a vazão medida já corresponde diretamente à vazão líquida. Para isso, as válvulas foram inicialmente ajustadas na configuração de extremo livre, conforme indicado na Tabela 5.1. Em seguida, a mesa de coordenadas foi posicionada de modo que a diferença de nível entre a entrada e a saída do sistema estivesse em equilíbrio, definindo-se essa posição como altura zero ($y = 0$).

Após esse ajuste, selecionou-se uma frequência e coletou-se uma massa durante um intervalo de tempo fixo $\Delta t = 20$ min, utilizado para todas as medições. Por fim, a massa coletada foi medida em uma balança de precisão. O processo foi repetido até que as medições apresentassem uma reprodutibilidade, o que foi alcançado com seis repetições. A análise de incerteza associada à determinação da vazão está descrita no Apêndice A. A partir desse ponto, o experimento foi reiniciado para uma nova frequência de acionamento do piezoelétrico. A Figura 5.3 apresenta a balança de precisão utilizada no experimento.



Figura 5.3: Balança GEHAKA AG200

A Tabela 5.2 apresenta as especificações técnicas da balança utilizada no experimento.

Especificação técnica da balança	
marca:	GEHAKA A200
resolução :	0.0001 <i>g</i>
Temperatura Oper.	15 a 20°C
Estabilização	15 <i>s</i>
Tempo de medida	3 a 10 <i>s</i>

Tabela 5.2: Dados da balança

Em resumo, o experimento é representado pelo diagrama de blocos mostrado na figura 5.4.

Outro experimento consistiu em determinar a vazão em modo contínuo, variando a altura de recalque, inicialmente no escoamento direto e, em seguida, no escoamento reverso, visando comparar o comportamento da vazão nos dois sentidos. A bomba auxiliar foi ajustada para fornecer uma vazão mínima, de modo que seu valor se aproximasse da vazão líquida obtida no modo pulsátil para a frequência de 10 *Hz*. Para isso, a bomba foi operada com uma tensão de 2.7 V e uma corrente de 0.37 A. Em seguida, a massa do fluido foi coletada durante um intervalo de tempo fixo de $\Delta t = 1$ min. Assim como no experimento anterior, o procedimento foi repetido até que os resultados apresentassem reprodutibilidade satisfatória, o que foi alcançado com três repetições. A análise de incerteza associada a esse experimento está apresentada no Apêndice A [29].

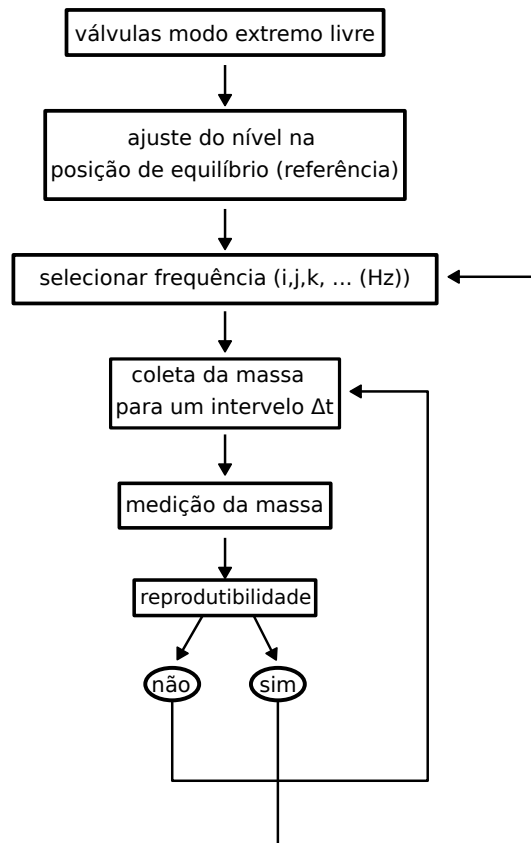


Figura 5.4: diagrama de blocos do experimento para obtenção da frequência máxima de acionamento.

Nos dois experimentos, a vazão mássica pode ser calculada pela equação (5-1).

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t} \quad (5-1)$$

onde:

- $\dot{m}$: vazão mássica;
- m : massa;
- Δt : intervalo de tempo;

E a vazão volumétrica pode ser determinada pela equação (5-2):

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (5-2)$$

onde:

- Q : vazão volumétrica;
- $\dot{m}$: vazão mássica;
- ρ : densidade do fluido;

5.2

Velocimetria por imagem de partículas (PIV)

A Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) é uma técnica de medição de velocidade de fluidos baseada na captura e análise do deslocamento de partículas traçadoras dispersas no escoamento. O método utiliza um sistema óptico composto por uma fonte de luz pulsada, geralmente um laser, e uma câmera de alta resolução para registrar imagens das partículas em dois instantes de tempo distintos. A partir dessas imagens, algoritmos de processamento determinam o deslocamento das partículas em pequenas regiões do fluido, permitindo a obtenção do campo de velocidade instantâneo [6]. A figura 5.5 apresenta de forma esquemática o funcionamento básico dessa técnica.

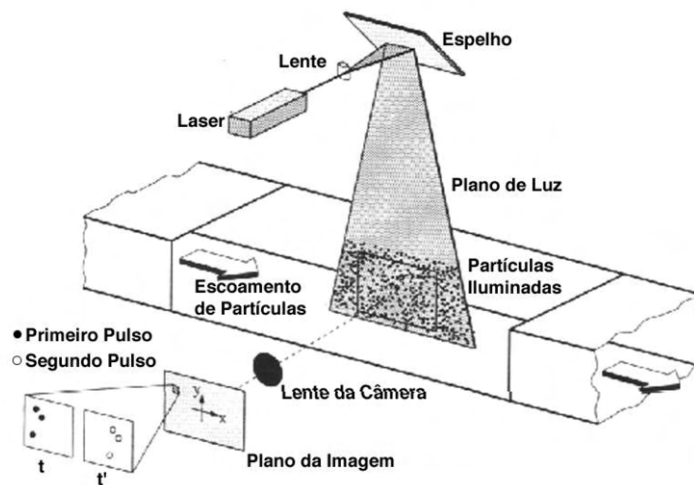


Figura 5.5: Desenho esquemático de sistema PIV bi-dimensional. Extraído de Abrantes et al.[6].

A seguir, serão apresentadas as etapas da técnica de PIV adotadas neste trabalho.

5.2.1

Partículas

Neste trabalho, utilizam-se partículas contendo tinta fluorescente, que convertem a luz incidente em outra cor para aumentar sua visibilidade. Sua utilização foi escolhida para minimizar o espalhamento da luz em interfaces e melhorar a detecção das partículas, especialmente devido ao uso de partículas de pequeno tamanho. São feitos experimentos com dois tipos de partículas fluorescentes: (I) rodamina e (II) fluoresceína. Cada uma exibe fluorescência em comprimento de ondas diferentes.

Os parâmetros da rodamina estão descritos na Tabela 5.3, enquanto os da fluoresceína estão na Tabela 5.4.

Partículas de rodamina	
marca:	DANTEC DYNAMICS
material:	Polimetilmetacrilato com RhB-10
densidade	25% (<i>peso/volume</i>)
diâmetro	1 – 20 μm
faixa de absorção	510 a 540 nm
faixa de emissão	520 a 570 nm

Tabela 5.3: Dados da rodamina

Partículas de fluoresceína	
marca:	Redelease
densidade	1.4 g/cm^3
diâmetro	5 – 6 μm
faixa de absorção	470 a 505 nm
faixa de emissão	500 a 540 nm
índice de refração	1.6

Tabela 5.4: Dados da fluoresceína

5.2.2 Fluido

Nos testes com rodamina, a substância é diluída em água, e a concentração utilizada foi definida com base em testes preliminares.

Para os testes com fluoresceína, foram utilizados dois tipos de fluidos: óleo de peroba e uma mistura composta por 85% de cinamato de etila e de 15% de álcool isopropílico. Eles foram escolhidos por apresentarem índices de refração próximo da resina. Esse ajuste permite que apenas as partículas fluorescentes sejam visíveis, minimizando interferências ópticas no experimento.

O motivo da mudança de fluido da água para o óleo de peroba e a mistura de cinamato de etila foi que a atenuação das reflexões com o filtro não foram suficientes para garantir boas imagens das partículas. Por isso, optou-se também por fazer um ajuste de índice de refração.

5.2.3

Sistema de Iluminação

O objetivo do sistema de iluminação é fornecer a luz, que serve como meio de transporte da informação para o sistema de medição de velocidades, e também definir a região do escoamento a ser analisada. Esse sistema deve assegurar que apenas a área na profundidade de campo do sistema ótico seja iluminada, evitando a iluminação de regiões fora dessa área. Além disso, a iluminação seja pulsada para permitir o uso da técnica PIV. Neste estudo, são empregadas duas fontes de iluminação: LED e laser.

5.2.3.1

LED

Devido à geometria compacta das bombas, é possível utilizar LEDs como fonte de iluminação [6]. Para os testes utilizando rodamina, é utilizado o LED verde IL-105G. Além do LED, o sistema de iluminação conta com uma fibra óptica, com a função de direcionar e colimar a luz emitida. A fibra óptica permite concentrar a luz em uma direção específica. Para otimizar ainda mais a colimação da luz, uma lente cilíndrica plano-convexa é utilizada para transformar a luz direcionada pela fibra em um plano de luz de pequena espessura e altura adequada às dimensões da região de observação, garantindo a eficiência e a qualidade das medições. A figura 5.6 demonstra a iluminação por LED.

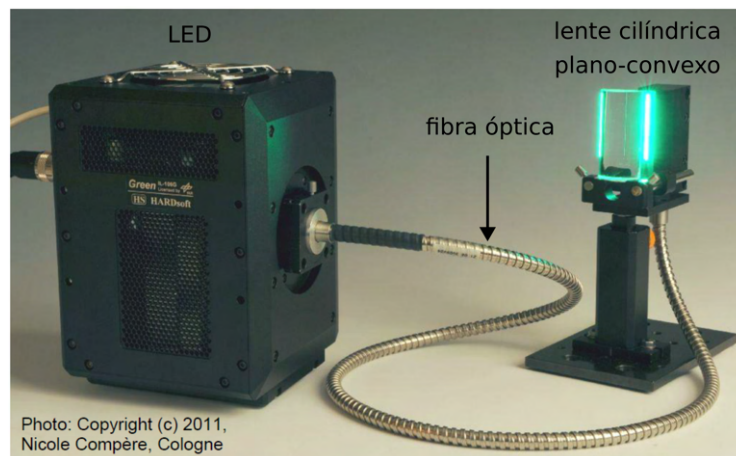


Figura 5.6: LED IL-105 HARDsoft (Fonte : HARDsoft)

A tabela 5.5 fornece os parâmetros do LED utilizado.

Sistema de Iluminação LED	
modelo	IL-105G HARDsoft
comprimento de onda	528 <i>nm</i>
potência óptica	30 <i>W</i>
potência elétrica	3 <i>kW</i>
Lente	cilíndrica

Tabela 5.5: Dados do sistema de iluminação por LED

5.2.3.2 Laser

Os lasers são amplamente empregados em sistemas PIV devido à sua capacidade de emitir luz monocromática com alta densidade de energia. Além disso, eles podem ser facilmente pulsados e configurados para formar planos de luz com diferentes dimensões, o que os torna ideais para a análise de escoamentos [30]. Nos experimentos com fluoresceína, a iluminação é fornecida por um laser, cuja especificação está detalhada na tabela 5.6.

Sistema de Iluminação laser	
modelo	ZBAITU C40
comprimento de onda	488 <i>nm</i>
potência	5 <i>W</i>
Lente	cilíndrica

Tabela 5.6: dados do sistema de iluminação por laser

A figura 5.7 ilustra o módulo do laser utilizado neste trabalho. Esse laser tem cor azul, sendo utilizado em máquinas de corte a laser.

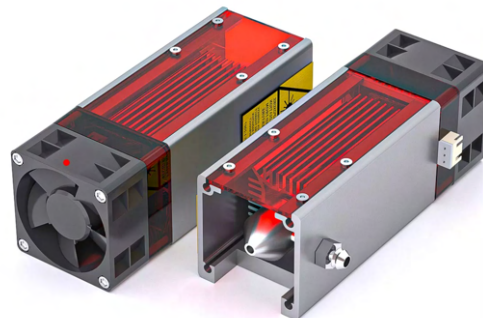


Figura 5.7: módulo do laser (fonte: ZBAITU)

5.2.4

Conjuntos de Lentes Formadoras de Plano de Luz

O uso de lentes é essencial para a formação de um plano de luz capaz de iluminar as partículas. Geralmente, esse arranjo envolve uma lente cilíndrica e uma esférica. A lente cilíndrica controla a divergência do feixe em uma direção, enquanto a esférica reduz sua espessura, garantindo um plano de luz mais uniforme e bem definido.

Neste estudo, a configuração com uma única lente cilíndrica foi suficiente para gerar o plano de luz necessário à iluminação das partículas de rodamina e fluoresceína.

5.2.5

Filtros

As partículas contendo tinta fluorescente são utilizadas em conjunto com um filtro óptico ajustado para um comprimento de onda específico. Esse filtro bloqueia a luz espalhada pelas superfícies, permitindo a passagem apenas da fluorescência emitida pelas partículas [6].

A figura 5.8 apresenta os espectros de excitação (região verde) emissão (região vermelha) da rodamina. Nota-se que o pico de excitação ocorre em 542 nm, enquanto o pico de emissão se encontra em 612 nm, caracterizando a diferença entre os comprimentos de onda absorvido e emitido.

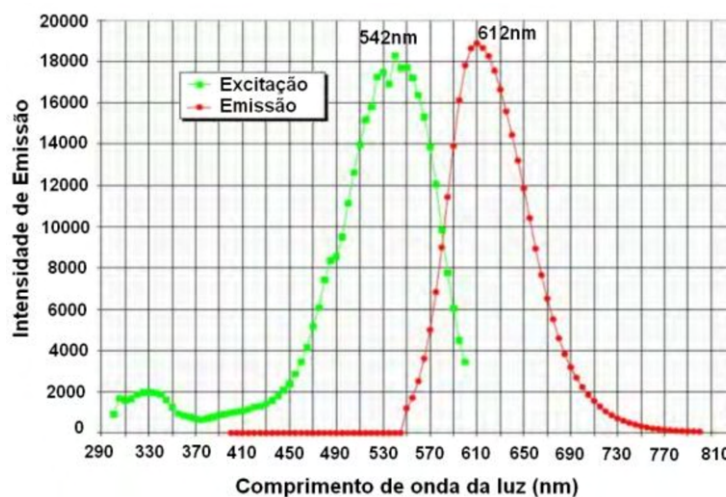


Figura 5.8: Espectro de absorção (luz verde) e emissão (luz vermelha). [7]

Já na figura 5.9 ilustra o comportamento da fluoresceína com a espectros de excitação (região azul) e emissão (região verde). O pico da excitação ocorre em 488 nm, enquanto o pico de emissão se encontra 542 nm.

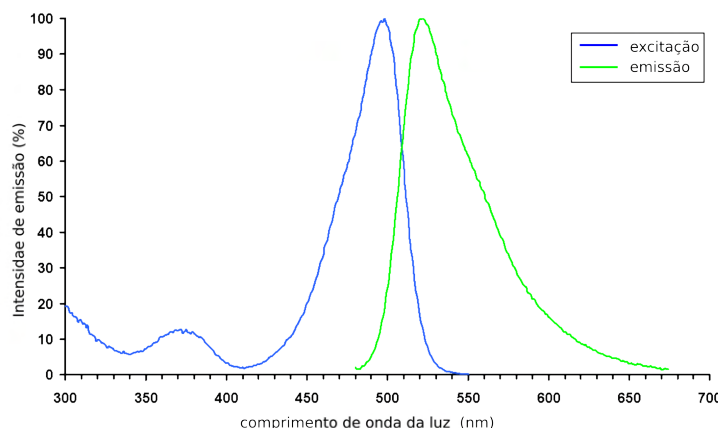


Figura 5.9: Espectro de absorção (luz azul) e emissão (luz verde). Fonte: thermofisher.com

O uso de filtros passa-alta é fundamental para eliminar o espalhamento das interfaces, bloquear a luz de excitação remanescente e captar exclusivamente a fluorescência. Isso garante medições mais precisas e minimiza interferências indesejadas. A Figura 5.10 ilustra esse princípio no experimento utilizando fluoresceína.

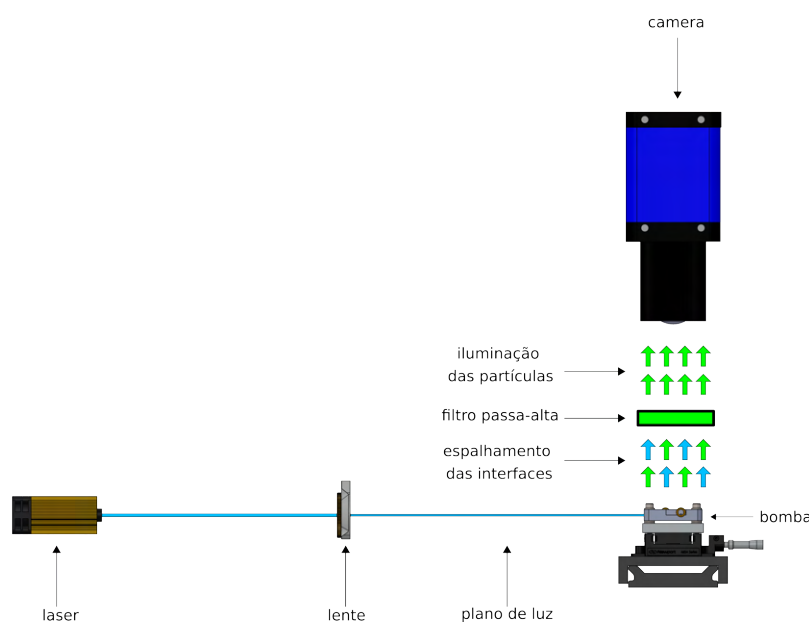


Figura 5.10: Filtro passa-alta

Conforme a Tabela 5.5, a rodamina é excitada pelo LED em um comprimento de onda de 528 nm , enquanto, conforme a Tabela 5.6, a fluoresceína é excitada pelo laser em 488 nm . Dessa forma, para os experimentos com roda-

mina, foi selecionado o filtro passa-alta FSQ-OG550, e para os experimentos com fluoresceína, o filtro passa-alta FSQ-OG515. A Figura 5.11 apresenta as características de transmissividade dos filtros, conforme especificações fornecidas pelo fabricante Newport.

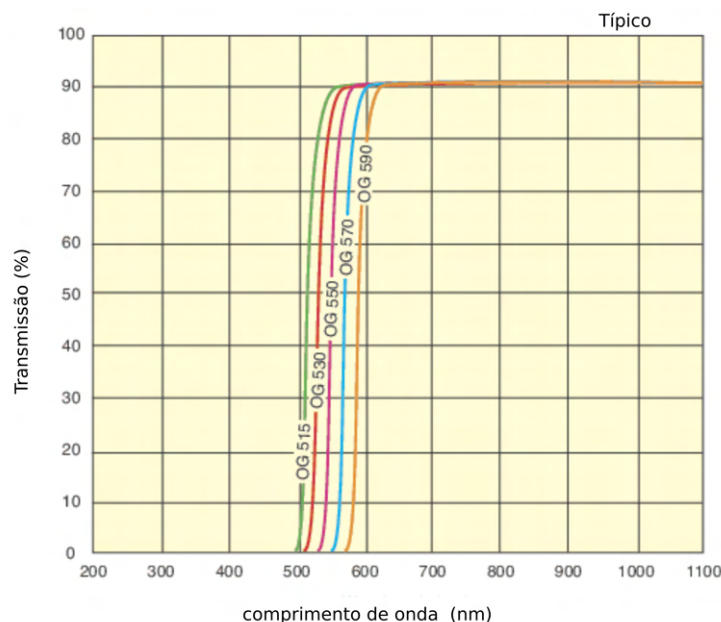


Figura 5.11: Curva de transmissividade (fonte: newport.com)

5.2.6 Câmera

Para o registro das imagens durante o experimento, foi utilizada a câmera Phantom Miro 340, um equipamento de alta performance desenvolvido para capturas em alta velocidade, conforme ilustra a figura 5.12. A tabela 5.7 apresenta as principais especificações da câmera utilizada nos experimentos.



Figura 5.12: Phantom Miro 340

Parâmetro	Especificação
Câmera	Phantom Miro 340
Sensor	CMOS 4Mpx com taxa de transferência de 3,2 Gpx/s
Resolução	2560 x 1600 pixels

Tabela 5.7: Parâmetros da captura de dados

A tabela 5.8 apresenta os acessórios utilizados com a câmera Phantom Miro 340. A lente Nikon AF Nikkor 50 mm $f/1.8D$ foi escolhida por sua boa qualidade e abertura ampla, permitindo captar imagens nítidas em diferentes condições de luz. O tubo de extensão Nikon PK-12 (14mm) possibilitou o foco em objetos muito próximos, enquanto o filtro Close-Up Nikon Close-Up No. 4T (52mm) ajudou a melhorar o foco em detalhes.

Acessórios da Câmera	
Lente	Nikon AF Nikkor 50 mm $f/1.8D$ (1 : 1.8D)
Tubo de Extensão	Nikon PK-12 14 mm
Filtro Close-Up	Nikon Close-UP NO.4T 52 mm

Tabela 5.8: Acessórios da câmera

5.2.7

Aquisição das Imagens

A configuração utilizada nos experimentos neste trabalho adota o modo de registro de imagens em pulso único/quadro duplo, conforme ilustrado na Figura 5.13. Nesse modo, cada imagem de partículas, correspondente a um pulso de luz, é registrada em um quadro distinto. A principal vantagem desse método é evitar ambiguidades quanto à direção do escoamento, pois o primeiro quadro corresponde ao primeiro pulso de luz, enquanto a imagem do segundo quadro é associada ao segundo pulso.

Nos experimentos, foi utilizado um sincronizador BNC-575, conforme ilustrado na Figura 5.14. Tanto no teste com rodamina quanto no teste com fluoresceína, os canais A e B são programados para operar a uma frequência de 200 Hz, sendo responsáveis pelo acionamento do trigger da câmera e do trigger da fonte de iluminação, respectivamente. O canal C, por sua vez, é configurado para operar a uma frequência de 10 Hz, controlando o acionamento do piezoelétrico.

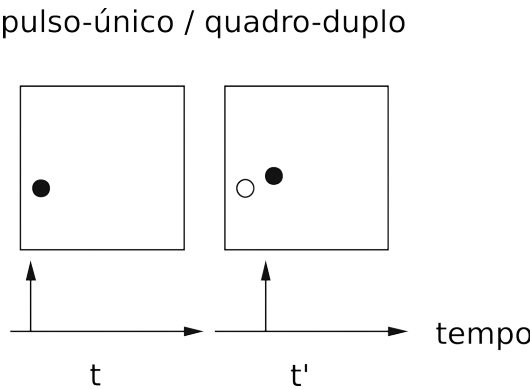


Figura 5.13: Modo de operação PIV utilizado neste trabalho.



Figura 5.14: Sincronizador utilizado nos experimentos.

A tabela 5.5 apresenta os parâmetros de atrasos e pulsos configurados no sincronizador para o experimento com o LED.

Canal	Função	Largura de Pulso (μs)	Atraso (μs)
canal A	Trigger Câmera	150	100
canal B	Trigger LED	150	100
canal C	Piezo	50 000	49 990

Tabela 5.9: Parâmetros do sincronizador para o experimento utilizando o LED.

O pulso do LED é configurado inteiramente pelo programa IL-105X. Ele é definido internamente com um atraso de 1000 μs e um pulso único, com duração de aproximadamente 298 μs , conforme ilustrado na Figura 5.15.

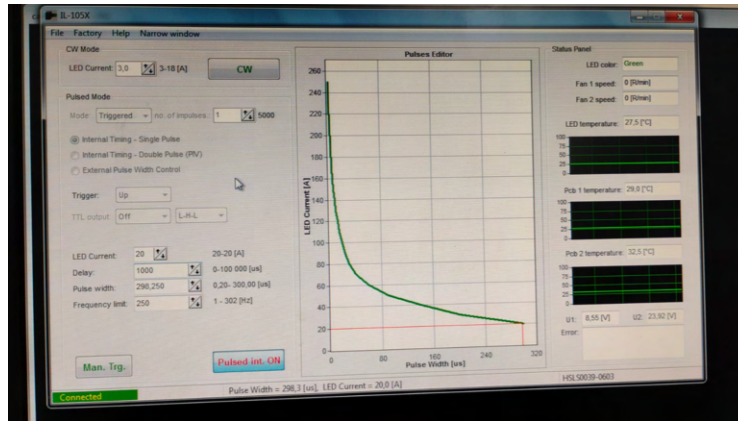


Figura 5.15: Diagrama do fabricante do LED

Já o tempo de exposição da câmera também é configurado internamente no programa PCC da Phantom, sendo ajustado para $4900 \mu s$, com uma resolução de imagem de $2560 \times 1600 \text{ pixels}$, conforme ilustra a figura 5.16.

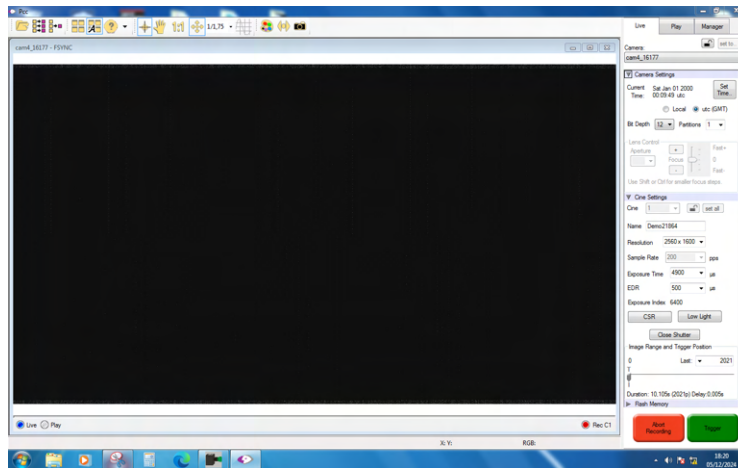


Figura 5.16: configurações da câmera no programa PCC Phantom para o experimento utilizando a rodamina.

A figura 5.17 apresenta o diagrama temporal do experimento PIV com rodamina. Como descrito, o canal A é responsável pelo acionamento da câmera, funcionando como o sinal de trigger. Quando ativado, a câmera fica aberta com um tempo de exposição $T_{exp_{rod}} = 4900 \mu s$. O canal B é o trigger do LED, sendo o pulso do LED gerado $1000 \mu s$ após o sinal do trigger do canal B, com duração de $298 \mu s$. Ambos os canais A e B possuem um período de $T = 5000 \mu s$. O canal C é destinado ao acionamento do piezoelétrico, que ocorre $50000 \mu s$ após o início do ciclo, com duração de $49990 \mu s$ e período de $T_{PZT} = 10000 \mu s$.

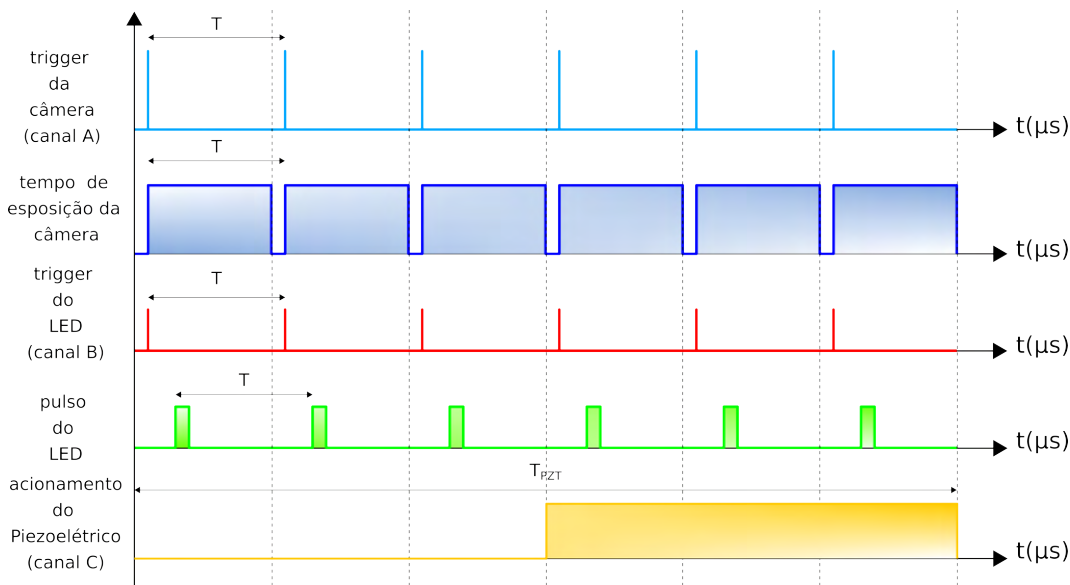


Figura 5.17: Diagrama de tempo PIV experimento que utiliza o LED

Para os experimentos utilizando a fluoresceína, a tabela 5.10 apresenta os parâmetros de atrasos e pulso no sincronizador para experimento com laser.

Canal	Função	Largura de Pulso (μs)	Atraso (μs)
canal A	Trigger Câmera	60	100
canal B	Trigger laser	250	100
canal C	Piezo	50 000	49 990

Tabela 5.10: Parâmetros do sincronizador para o experimento utilizando o laser

O tempo de exposição da câmera é reajustado para os experimentos de fluoresceína para um tempo de exposição de 3331 μs e a resolução de imagem 2048x1536 *pixels*, conforme ilustra a figura 5.18.

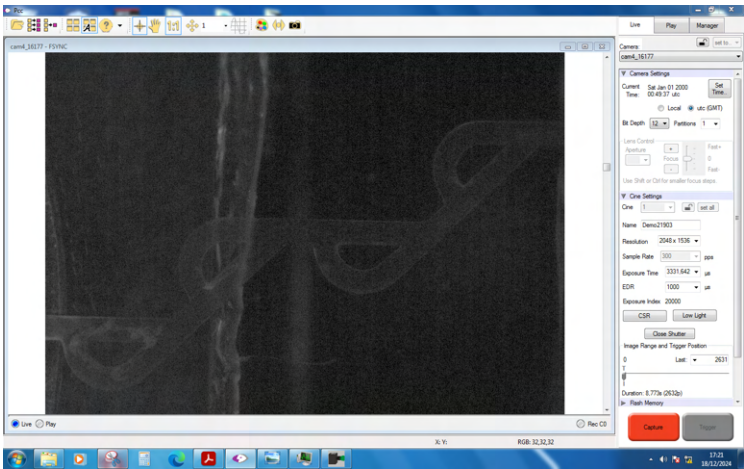


Figura 5.18: configurações da câmera no programa PCC Phantom para o experimento utilizando a fluoresceína.

A figura 5.19 apresenta o diagrama temporal do experimento com fluoresceína. Conforme mencionado anteriormente, o canal A emite o sinal de trigger para a câmera, que permanecerá aberta com um tempo de exposição aproximado de $T_{aprox_{fluo}} \approx 3331 \mu s$. O canal B aciona o pulso do laser, com duração de $250 \mu s$, estando em fase com o canal A. Ambos os canais possuem um período de $T = 5000 \mu s$. Por fim, o canal C aciona o piezoelétrico após o início do ciclo, com duração de $49990 \mu s$ e período de $T_{PZT} = 10000 \mu s$.

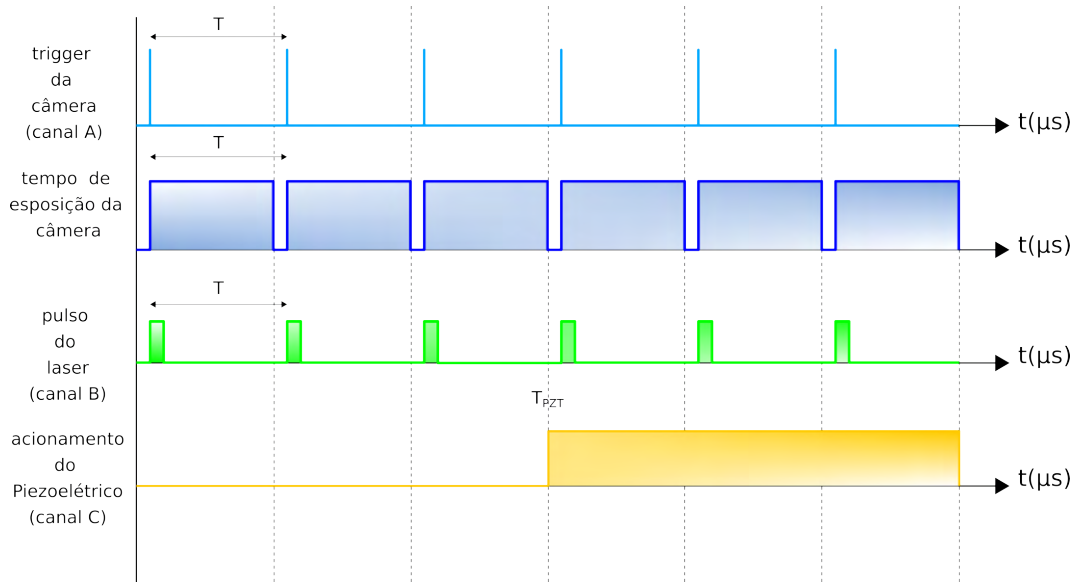


Figura 5.19: Diagrama de tempo PIV experimento que utiliza o laser.

Por fim, para a aquisição das imagens, a bancada foi configurada em modo contínuo, conforme descrito, na Seção 5.1.

5.2.8 Pré-Processamento das Imagens

Após a aquisição, as imagens passam por um pré-processamento realizado por um programa desenvolvido no MATLAB. Esse processo pretende melhorar a qualidade da visualização das partículas. Além disso, regiões que não serão analisadas podem ser removidas por meio de uma máscara, conforme ilustrado na Figura 5.20. Nessa figura, 5.20 (I) apresenta a imagem adquirida, enquanto 5.20 (II) exibe a máscara aplicada, onde as áreas em preto representam as regiões excluídas da análise.

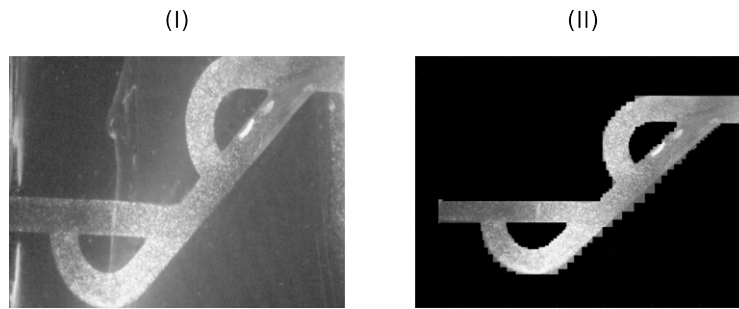


Figura 5.20: (I) imagem adquirida e (II) imagem com a máscara

Após a criação da máscara, calcula-se a imagem média a partir das imagens adquiridas e, em seguida, ela é subtraída de cada imagem original. Esse procedimento remove o fundo estático, preservando apenas as partículas em movimento. Como resultado, obtém-se uma imagem onde as partículas se destacam de forma mais nítida, facilitando sua detecção e análise, conforme ilustra a figura 5.21.

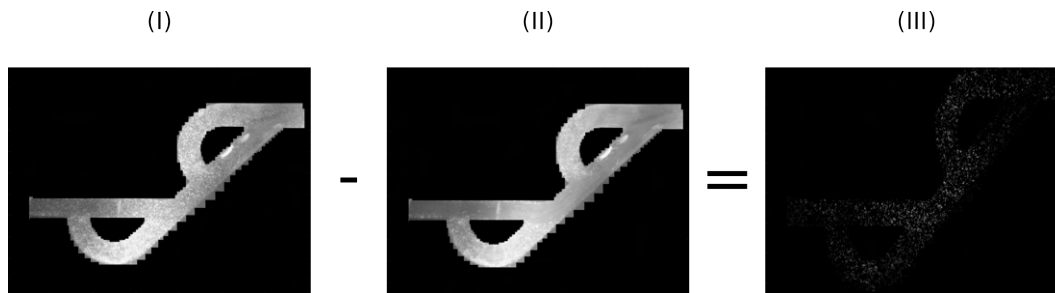


Figura 5.21: (I) Imagem das partículas em um instante t , (II) imagem média obtida a partir das aquisições e (III) imagem do instante t após a remoção da imagem média.

5.2.9 Processamento

O processamento visa extrair os deslocamentos das partículas a partir das imagens adquiridas. Devido à alta densidade de partículas nas imagens, divididas em sub-regiões denominadas janelas de interrogação. A Figura 5.22 (I) ilustra duas janelas de interrogação de 64×64 pixels em dois instantes distintos: t_0 e $t_0 + \Delta t$. Já a Figura 5.22 (II) apresenta o deslocamento das partículas nesse intervalo de tempo.

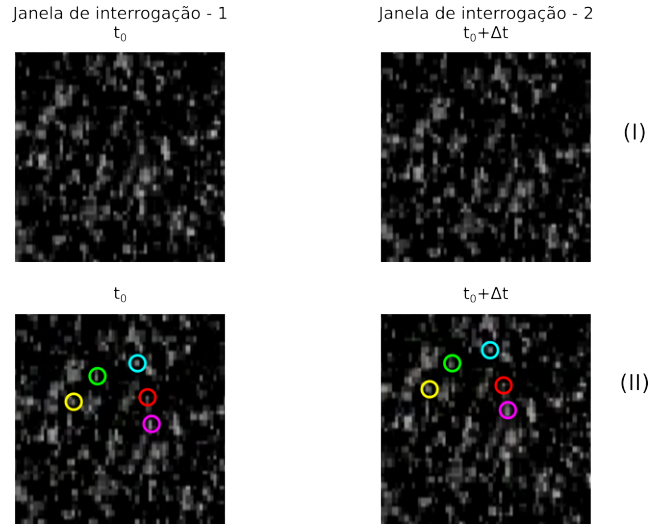


Figura 5.22: Janela de interrogação 64x64 pixels

Para determinar o módulo, a direção e o sentido de cada vetor de deslocamento, utiliza-se a correlação cruzada entre duas imagens capturadas nos instantes t_0 e $t_0 + \Delta t$. A correlação cruzada pode ser calculada por meio da equação (5-3) :

$$R_{I_1 I_2}(\Delta i, \Delta j) = \sum_i \sum_j I_1(i, j) I_2(i + \Delta i, j + \Delta j) \quad (5-3)$$

onde I_1 e I_2 são as intensidades nas janelas de interrogação, e i e j se referem aos índices dos *pixels* nestas janelas.

A figura 5.23 ilustra a determinação do deslocamento de um padrão por correlação cruzada entre duas imagens em instantes distintos. As imagens superiores mostram a região analisada, destacando as janelas de interrogação e um ponto de referência. Na parte inferior, o gráfico 3D e o mapa 2D da correlação revelam o pico máximo, indicando a posição de maior similaridade entre as imagens e determinando o deslocamento $\vec{u}_{ab}$.

5.2.10

Pós-Processamento

A análise de dados obtidos por Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) requer frequentemente o uso de técnicas de filtragem para reduzir ruídos e melhorar a interpretação dos resultados. No pós-processamento, é utilizado um filtro passa-baixa baseado em um critério de 3/4 da frequência de Nyquist é aplicado aos dados antes da reconstrução do sinal por meio da Transformada Inversa de Fourier (IFFT). Esse filtro tem a função de remover componentes de alta frequência que podem estar associadas a flutuações indesejadas ou ruído na aquisição dos dados.

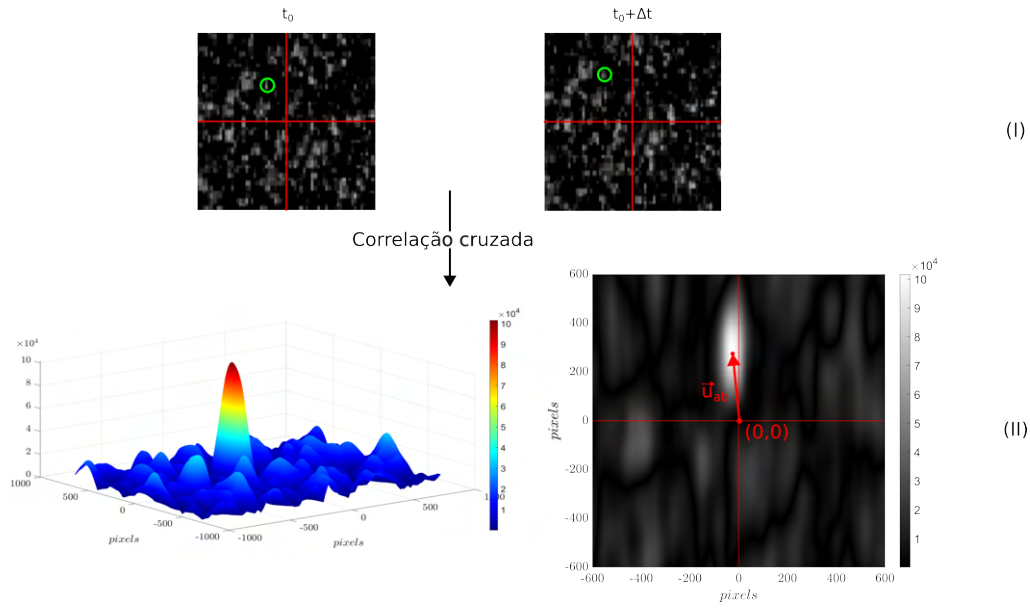


Figura 5.23: (I) partícula em dois instantes de tempo distintos e (II) correlação cruzada

Após a aplicação do filtro, a componente de velocidade u pode ser calculada a partir da equação (5-4) e a componente v é obtida de maneira análoga utilizando as posições y_1 e y_2 da partícula ao longo do eixo vertical. Já o período de aquisição de processamento corresponde ao dobro do período de aquisição de imagens.

$$u = FS \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \quad (5-4)$$

onde:

- FS : fator de escala que relaciona a dimensão na imagem com a dimensão no escoamento;
- x_1 : posição da partícula num instante t_0 ;
- x_2 : posição da partícula num instante $t_0 + \Delta t$;
- Δt_{aq} : o período de aquisição de processamento;

6

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho. Buscou-se inicialmente caracterizar bombas com diferentes arranjos de válvulas. Posteriormente, apresentam-se medições dos campos de velocidades no interior das válvulas.

6.1

Determinação da frequência que gera a maior vazão

O objetivo do primeiro teste, conforme descrito na Seção 5.1, foi determinar a frequência de pulsação do piezoelétrico resultante na maior vazão líquida. Neste contexto, considera-se a vazão líquida como volume efetivamente transportado ao longo de um intervalo de tempo, em função do modo pulsátil do sistema. O atuador foi acionado por um sinal do tipo onda quadrada, sendo realizadas seis medições em temperatura ambiente para as frequências de 5, 10, 15 e 20 Hz. Intervalos de frequência inferiores a 5 Hz não foram considerados, uma vez que não foi observada uma variação significativa na vazão líquida nessas condições.

A partir dos valores de massa obtidos, determinou-se a vazão mássica pela equação 5-1 e, em seguida, a vazão volumétrica pela equação 5-2, considerando a densidade da água igual a $\rho = 0.998 \text{ g/mL}$ para a temperatura ambiente de $T = 20^\circ\text{C}$.

Durante as medições, observaram-se flutuações e decaimentos das massas registradas pela balança de precisão, em decorrência da evaporação das amostras, o que acarretou incertezas nas medições de massa.

Com isso, foi possível plotar os gráficos de vazão volumétrica em função da frequência, apresentados nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3.

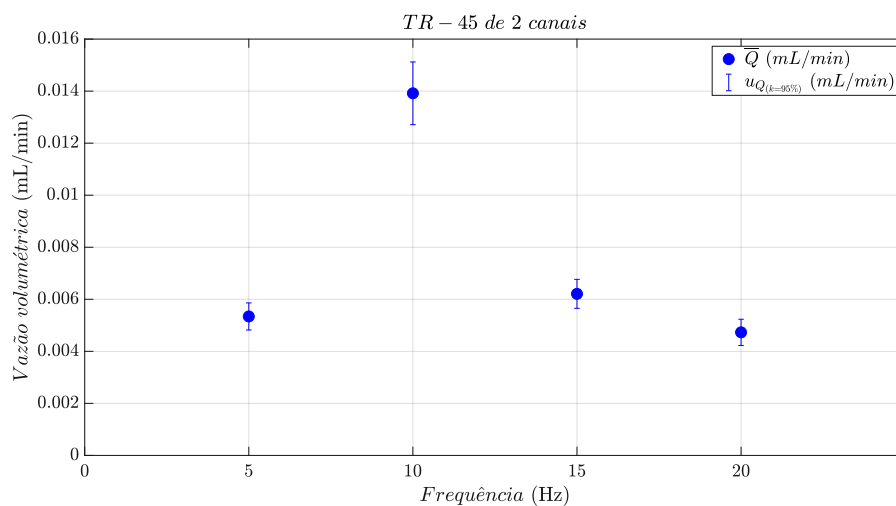


Figura 6.1: Gráfico da frequência de acionamento versus vazão volumétrica líquida para a bomba piezoelétrica com arranjo de válvulas do tipo T45-R (2 canais), incluindo as incertezas associadas com nível de confiança de 95%

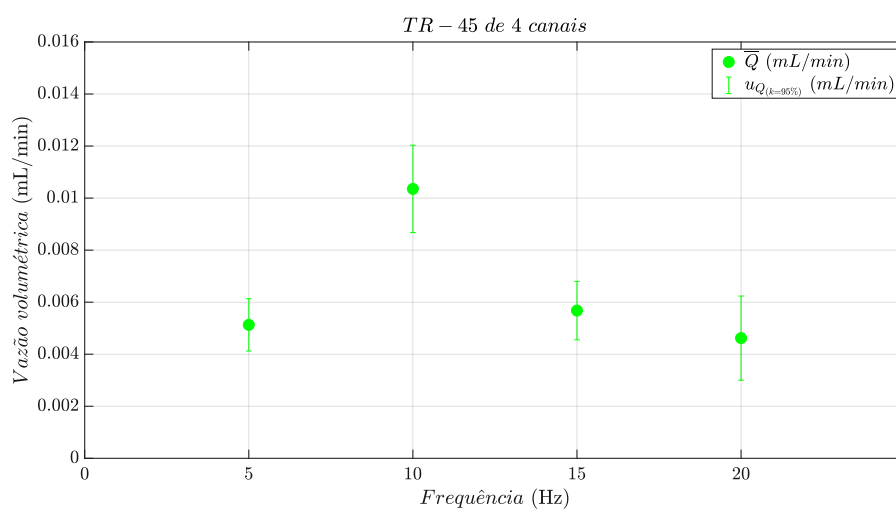


Figura 6.2: Gráfico da frequência de acionamento versus vazão volumétrica líquida para a bomba piezoelétrica com arranjo de válvulas do tipo T45-R (4 canais), incluindo as incertezas associadas com nível de confiança de 95%.

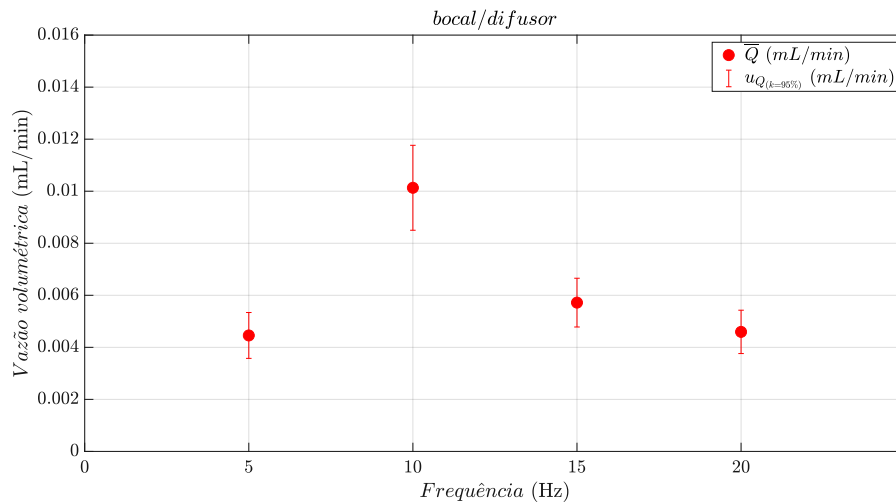


Figura 6.3: Gráfico da frequência de acionamento versus vazão volumétrica líquida para a bomba piezoelétrica com arranjo de válvulas do tipo bocal/difusor, incluindo as incertezas associadas com nível de confiança de 95%.

Todas as configurações apresentaram um comportamento semelhante: a vazão volumétrica líquida média ($\bar{Q}$), obtida a partir de seis medições, atingiu seu valor máximo na frequência de 10 Hz. Dessa forma, essa frequência foi adotada para os testes subsequentes em modo pulsátil. A Tabela 6.1 apresenta os valores médios da vazão volumétrica líquida ($\bar{Q}$) e suas respectivas incertezas, conforme descrito no Apêndice A.

bomba	frequência (Hz)	$\bar{Q}$ (mL/min)	u_Q ($k = 95\%$) (mL/min)	$u_{Q_{rel}}$ (%)
T45-R 2 canais	10	0.0139	± 0.0012	$\pm 8.6\%$
T45-R 4 canais	10	0.0104	± 0.0017	$\pm 16.3\%$
bocal/difusor	10	0.0101	± 0.0016	$\pm 15.8\%$

Tabela 6.1: Médias das vazões líquidas obtidas a partir de seis medições, acompanhadas de suas respectivas incertezas.

Válvula	Reynolds
T2	0.31
T4	0.23
Bocal/difusor	0.22

Tabela 6.2: comparação do Reynolds no regime pulsátil

Para o cálculo do número de Reynolds foi considerada a vazão líquida e o diâmetro hidráulico da seção transversal de cada válvula, para isto foi empregada a seguinte expressão: $Re = \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu}$. Onde $\bar{V}$ é a velocidade média

calculada a partir da vazão líquida e D_h é o diâmetro hidráulico. No caso da válvula do tipo bocal/difusor, o diâmetro hidráulico foi calculado na região da garganta, conforme os trabalhos de Olsson et al.[19] e Sun e Yang[21]. A tabela 6.2 fornece os valores de Reynolds para cada válvula.

6.2

Análise da vazão no modo contínuo para distintas diferenças de pressão

A próxima análise foi a avaliação da vazão para diferentes pressões de recalque impostas na saída do dispositivo. Os testes foram realizados conforme descrito na seção 5.1 onde a altura de recalque foi variada a partir de um referencial $h = 0 \text{ mm}$. A altura foi aumentada com um incremento de 50 mm para cada medição. Para cada uma dessas alturas, foi calculada a vazão a partir de seis medições com intervalo de tempo de $\Delta t = 1 \text{ min}$. Esse experimento foi realizado nos dois sentidos de escoamento: o direto e o reverso. Do mesmo modo apresentado na seção 6.1, a vazão mássica é calculada pela equação 5-1 e a vazão volumétrica pela equação 5-2. Então, pode-se obter um gráfico altura de recalque por vazão para cada válvula, conforme ilustrado pela figura 6.4.

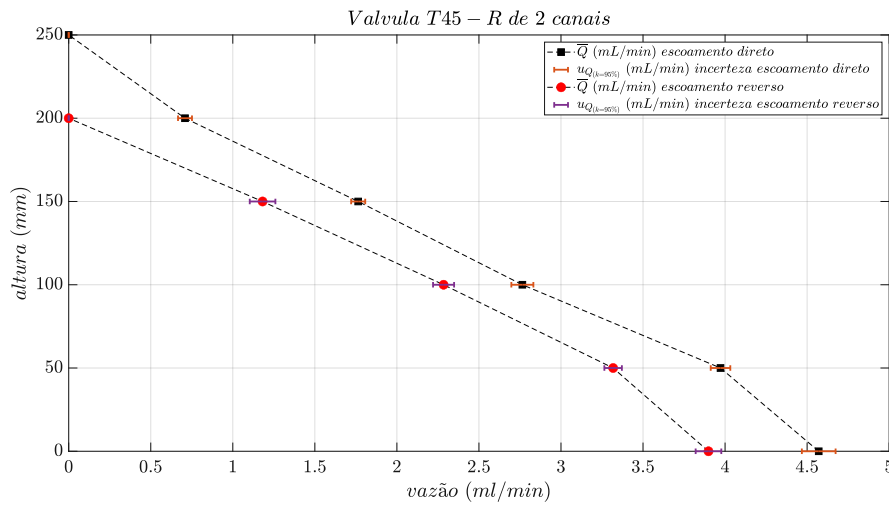


Figura 6.4: gráfico altura vs vazão, T45-R 2 canais

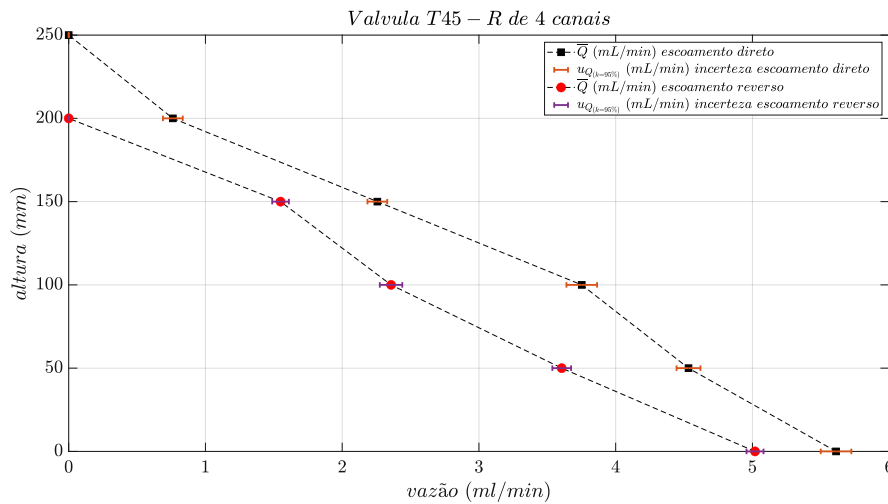


Figura 6.5: gráfico altura vs vazão, T45-R 4 canais

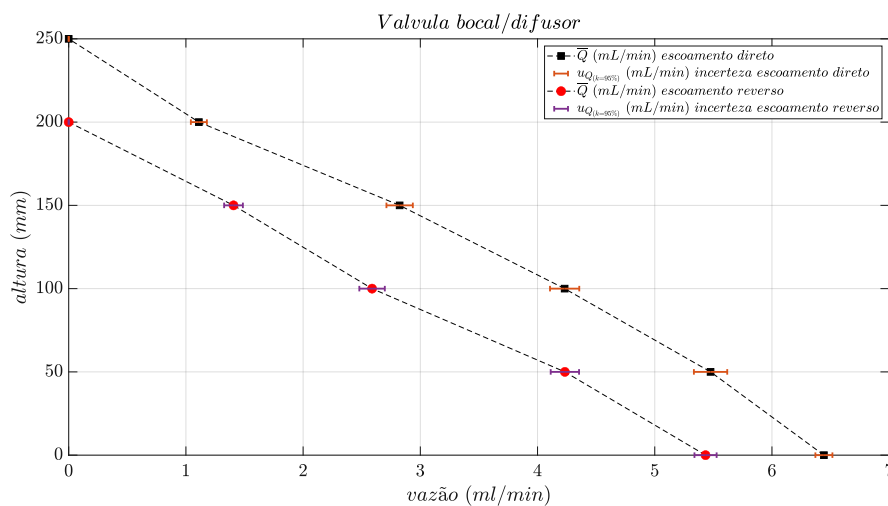


Figura 6.6: gráfico altura vs vazão, bocal/difusor

A análise comparativa mostra que a válvula TR-45 de 2 canais apresenta as menores vazões máximas $\approx 4.5 \text{ ml/min}$, enquanto a válvula TR-45 de 4 canais atinge cerca de 5.5 ml/min e a válvula bocal/difusor alcança valores próximos a 6.5 ml/min . Esses resultados indicam que a geometria das válvulas exerce influência direta sobre a capacidade de escoamento, sendo que a válvula bocal/difusor oferece menor resistência hidráulica no escoamento direto. É interessante notar que essa característica varia com a operação, pois no regime pulsado a válvula Tesla de dois canais foi o que ofereceu maior vazão. Já o número Reynolds para o escoamento direto na região da saída é da ordem de 100.

Além disso, observa-se que, em todos os modelos testados para a mesma altura da coluna de água, a vazão medida no escoamento reverso é menor do que a vazão no escoamento direto. Esse comportamento evidencia o efeito da

diodicidade. A tabela 6.3 resume os valores das diferenças de vazões entre o sentido direto e o sentido reverso para mesma altura de coluna de água.

altura (mm)	T45-R2 (mL/min)	T45-R4 (mL/min)	bocal/difusor (mL/min)
0	0.7088	0.7617	1.1105
50.00	0.5827	0.7080	1.4173
100.00	0.4801	1.3947	1.6429
150.00	0.6544	0.09272	1.2429
200.00	0.6719	0.5925	1.0098

Tabela 6.3: Diferença entre as vazões para uma mesma altura de recalque

Como a pressão de acionamento foi fixada, pode-se determinar a diodicidade pela equação 4-2. A tabela 6.4 mostra os valores da diodicidade para cada válvula.

Válvula	Diodicidade
T45-R2	1.17
T45-R4	1.11
Bocal/difusor	1.18

Tabela 6.4: Comparação da diodicidade

6.3

Determinação dos Campos de Velocidade em Válvulas no Modo Pulsátil com Água

O primeiro teste de velocimetria por imagem de partículas (PIV) foi realizado utilizando água com partículas de rodamina, iluminadas por um LED. Nessa configuração, as partículas foram excitadas por um comprimento de onda $\lambda_{\text{excLED}} = 542 \text{ nm}$ (espectro da luz verde), emitindo posteriormente em $\lambda_{\text{emirod}} = 612 \text{ nm}$ (espectro da luz vermelha). Para garantir a captação apenas da luz emitida pelas partículas, utilizou-se um filtro óptico passa-alta com comprimento de corte $\lambda_{\text{corte,rod}} = 550 \text{ nm}$. Essa configuração é comumente empregada em experimentos de PIV, especialmente em regiões onde há espalhamento nas interfaces.

6.3.1

Válvulas Tesla quatro canais

Os campos de velocidade na válvula T45-R de 4 canais, localizada na entrada da bomba, obtidos a partir da média de 25 eventos, estão mostrados

na Figura 6.7. Os dados foram obtidos em modo pulsátil com frequência do atuador de $f_{puls} = 10 \text{ Hz}$. O processamento dos pares de imagens foi feito a uma frequência de $f_{proc} = 100 \text{ Hz}$. Observa-se que nas regiões de junção dos canais o escoamento apresenta maiores velocidades. Em contraste, nas regiões curvas, onde se observa uma redução significativa da velocidade.

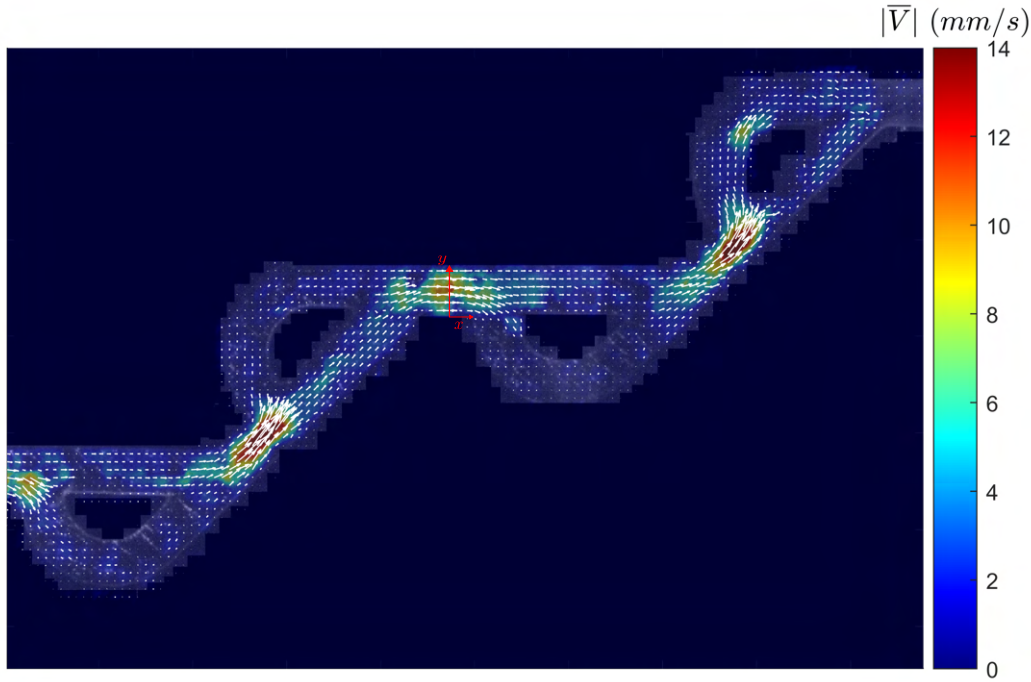


Figura 6.7: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de entrada no instante $t = t_0$.

A Figura 6.8 apresenta a evolução da velocidade média na válvula de entrada durante um ciclo do atuador piezoelétrico, com período $T = 0.1s$ e intervalo temporal $\Delta t = 0.01s$. No instante inicial t_0 , correspondente ao início do escoamento direto, observam-se regiões com velocidades moderadas nas junções dos canais. Em $t_0 + \Delta t$, verifica-se um aumento da velocidade nessas regiões, indicando a aceleração do escoamento. Esse comportamento se intensifica em $t_0 + 2\Delta t$, atingindo seu valor máximo em $t_0 + 3\Delta t$. No instante $t_0 + 4\Delta t$, observa-se uma redução da velocidade, caracterizando o início da desaceleração. A partir de $t_0 + 5\Delta t$, inicia-se o escoamento reverso. Nos instantes $t_0 + 6\Delta t$ e $t_0 + 7\Delta t$, observa-se um aumento progressivo da velocidade, que atinge seu valor máximo em $t_0 + 8\Delta t$. Em $t_0 + 9\Delta t$, inicia-se a desaceleração, e o ciclo se reinicia.

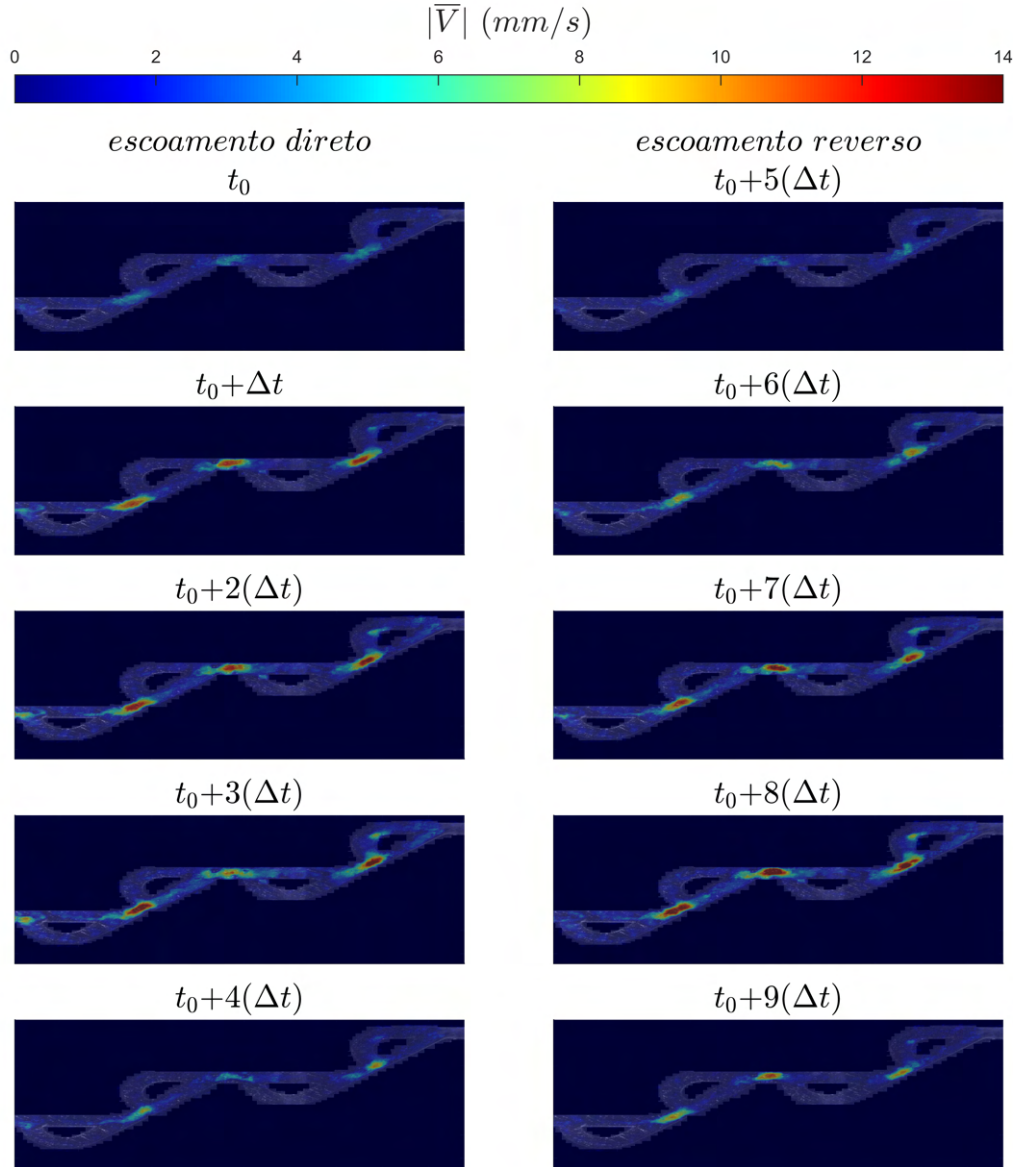


Figura 6.8: Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula de entrada T45-R com 4 canais durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 s$.

Os perfis de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na figura 6.7, são apresentados na Figura 6.9 durante um período de oscilação $T = 0.1 s$ e com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$. Observa-se o início do escoamento reverso no instante t_0 e atingindo o seu valor máximo o instante $t_0 + 3\Delta t$ na posição $y = 0.57 mm$. Já no instante $t_0 + 5\Delta t$ se inicia o escoamento direto, que atinge uma velocidade máxima no instante $t_0 + 6\Delta t$ na posição $y = 0.50 mm$.

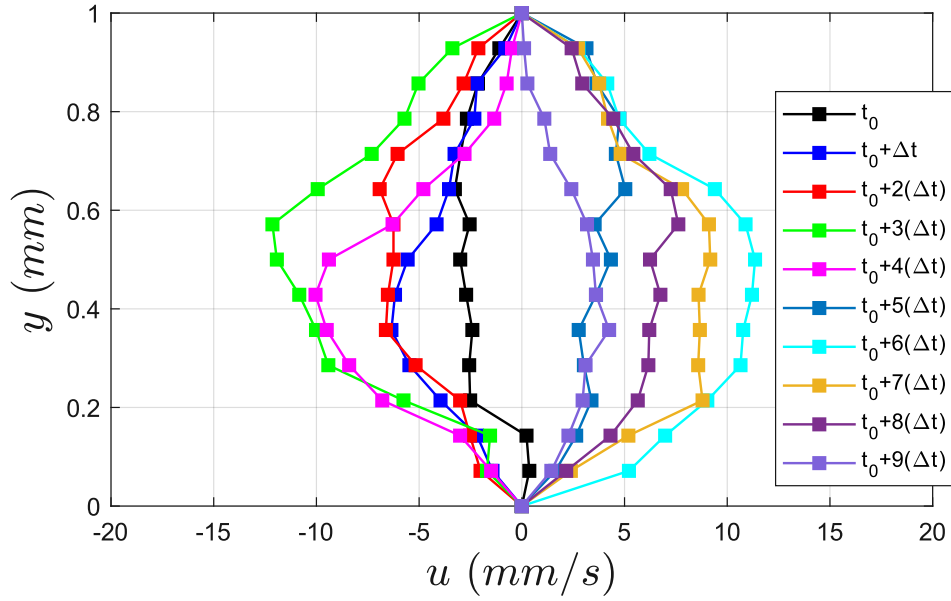


Figura 6.9: Perfis de velocidade da componente u na válvula de entrada com um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s.

A variação temporal da média da componente u , obtida a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s e intervalo amostral $\Delta t = 0.01$ s, é mostrada na Figura 6.7. É interessante observar que a oscilação da componente u se aproxima de uma senoide com frequência igual à do atuador, $f = 10$ Hz, apesar do sinal de excitação do piezoelétrico ser do tipo onda quadrada. Isso indica que o sistema apresenta um tempo de resposta lento em relação ao degrau de voltagem imposto pelo atuador.

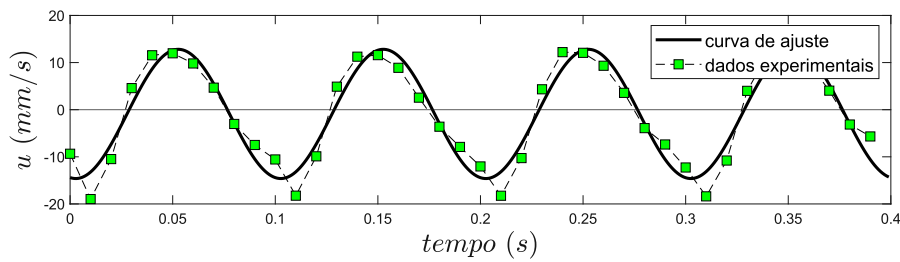


Figura 6.10: Variação temporal da média da componente u com duração de $T_{ev} = 0.4$ s na válvula de entrada.

Os campos de velocidades obtidos a partir da média de 25 eventos na válvula Tesla T45-R de 4 canais na saída estão mostrados na Figura 6.11. Os dados foram obtidos, com a mesma frequência de acionamento (f_{puls}) e com mesma frequência de processamento (f_{proc}), mostram que o escoamento apresenta maiores velocidades nas regiões retas próximas às saídas dos canais, assim como nas regiões de junção entre os canais. Em contraste, nas regiões

curvas ocorre uma redução significativa da velocidade. Comparando com o campo de velocidades na válvula de entrada (figura 6.7), nota-se que na saída aparecem alguns vetores espúrios devido à iluminação insuficiente em certas áreas e a sedimentação das partículas de rodamina.

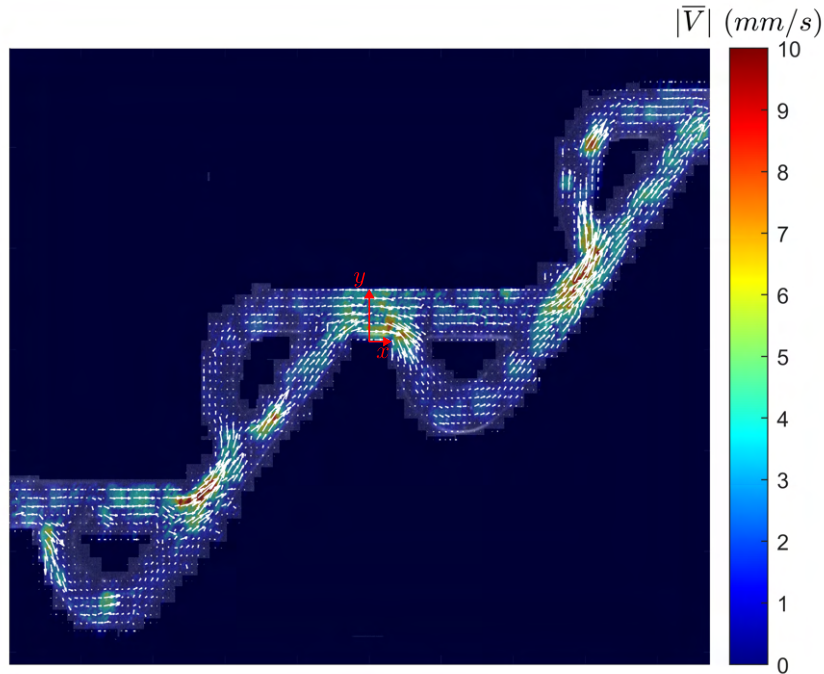


Figura 6.11: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de saída no instante $t = t_0$.

A Figura 6.12 apresenta a evolução da velocidade média na válvula de saída durante um ciclo do atuador piezoelétrico, com período $T = 0.1s$ e intervalo temporal $\Delta t = 0.01s$. No instante inicial t_0 , observam-se velocidades moderadas ao longo das junções dos canais. Em $t_0 + \Delta t$, as regiões de alta velocidade começam a se intensificar nas trajetórias principais. Esse padrão se reforça em $t_0 + 2\Delta t$ e $t_0 + 3\Delta t$, com aumento progressivo da velocidade nas regiões de junções dos canais. Em $t_0 + 4\Delta t$, há uma diminuição das regiões de alta velocidade. A partir de $t_0 + 5\Delta t$, inicia-se o escoamento reverso. Nos instantes seguintes, $t_0 + 6\Delta t$, $t_0 + 7\Delta t$ e $t_0 + 8\Delta t$, há um aumento progressivo da velocidade. Finalmente, em $t_0 + 9\Delta t$, inicia-se a desaceleração, e o ciclo se reinicia.

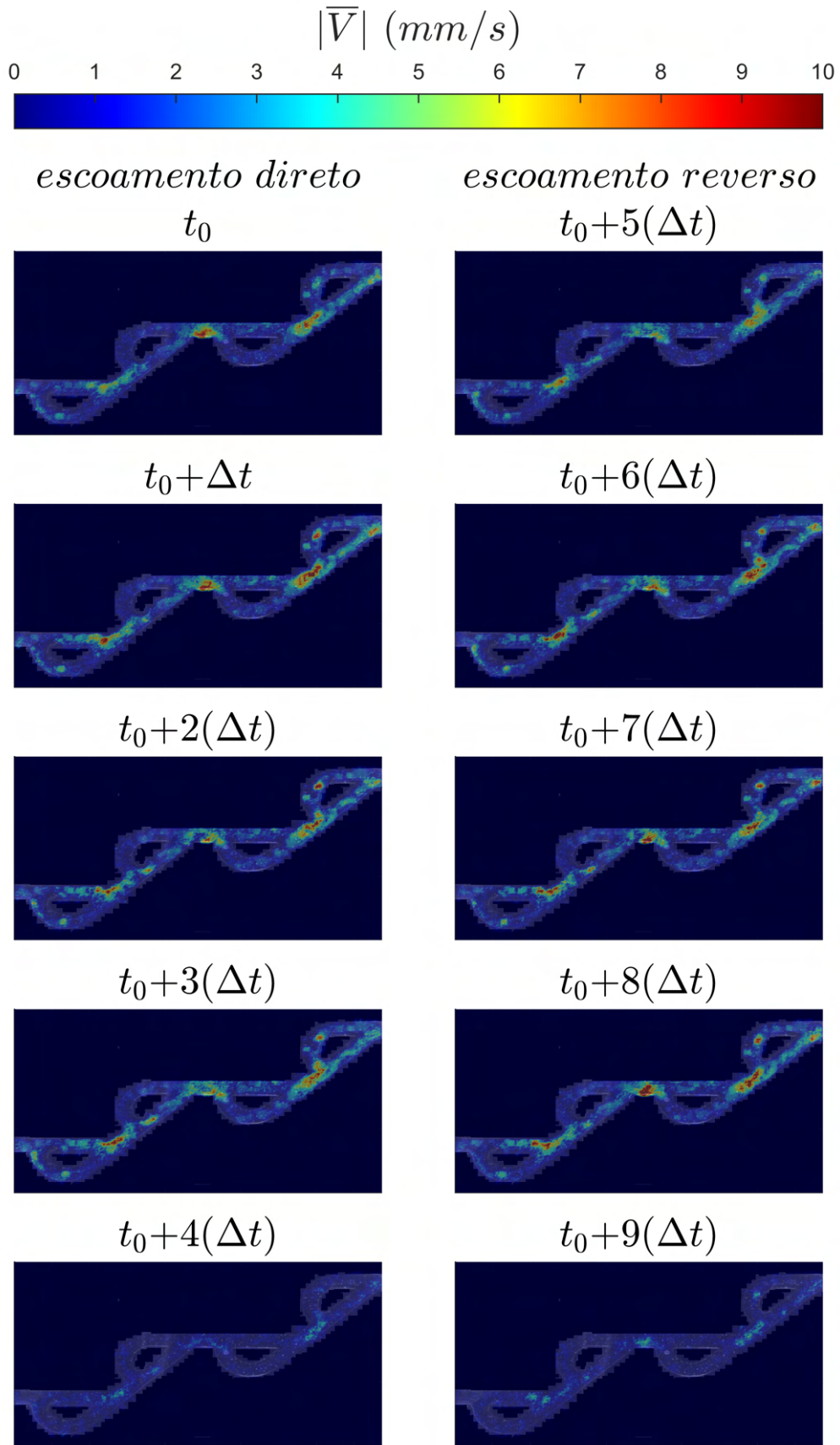


Figura 6.12: Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula de saída durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 \text{ s}$.

Os perfis de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na Figura 6.11, são apresentados na Figura 6.13 durante um período de oscilação $T = 0.1\text{ s}$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$. Observa-se que a qualidade dos perfis de velocidade é comprometida pela presença de vetores espúrios, resultando em um comportamento quase aleatório.

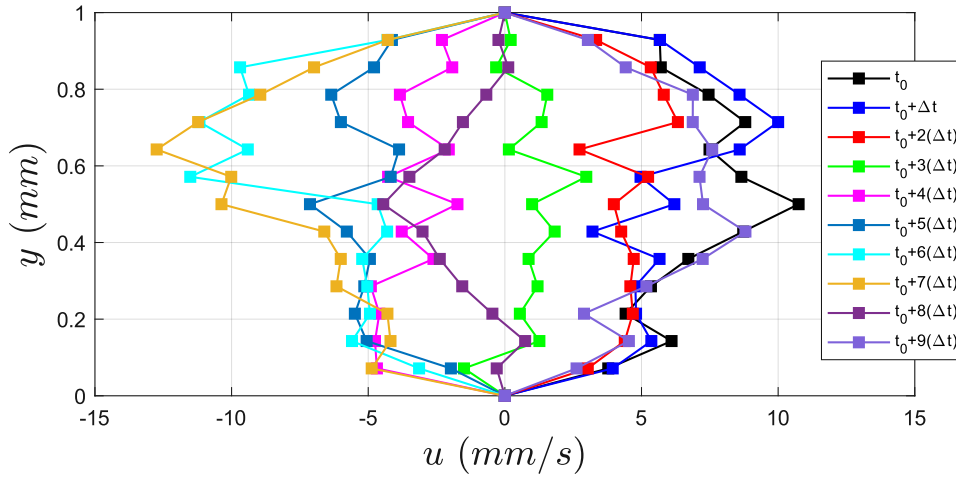


Figura 6.13: Perfis de velocidade da componente u na válvula de saída com um período de oscilação $T = 0.1\text{ s}$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$.

A variação temporal da média da componente u , obtida a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4\text{ s}$ e intervalo amostral $\Delta t = 0.01\text{ s}$, é mostrada na Figura 6.14. Observa-se que, embora a curva de ajuste represente um comportamento oscilatório dos dados experimentais, existem discrepâncias pontuais atribuídas à presença de vetores espúrios no campo de velocidade.

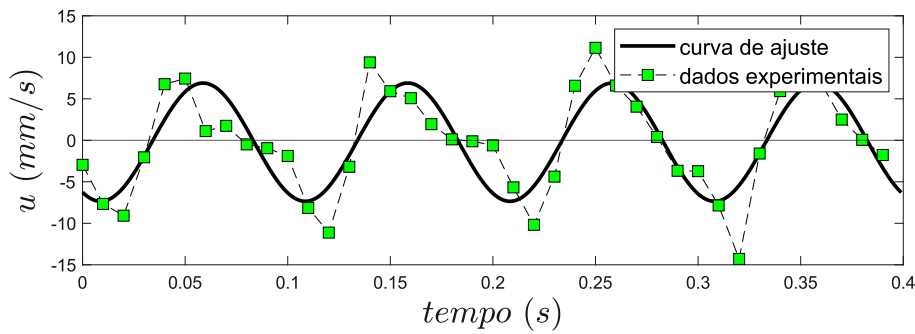


Figura 6.14: Variação temporal da média da componente u com duração de $T_{ev} = 0.4\text{ s}$ na válvula de saída.

6.3.2

Válvula Tesla dois canais

Os campos de velocidade na válvula T45-R de 2 canais, localizada na entrada da bomba, obtidos a partir da média de 25 eventos, estão mostrados

na Figura 6.15. Os dados foram obtidos em modo pulsátil com frequência do atuador de $f_{puls} = 10 \text{ Hz}$. O processamento dos pares de imagens foi feito a uma frequência de $f_{proc} = 100 \text{ Hz}$. Observa-se que os dados não apresentam vetores ou informação de velocidade, o que pode ser atribuído à reflexão excessiva de luz nas paredes e que apesar de serem atenuadas pelo filtro ainda puderam ser observadas nas imagens. Além disso, houve regiões de sombra e acúmulo de partículas devido à geometria da válvula, o que também dificultou a visualização das partículas traçadoras.

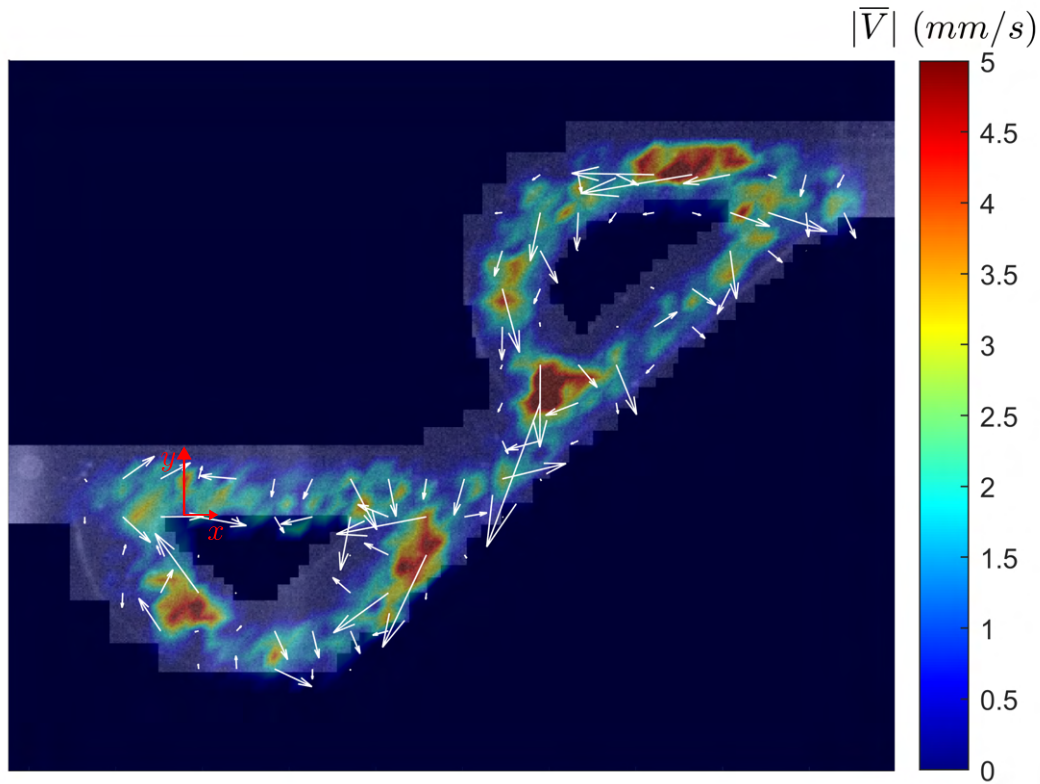


Figura 6.15: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de entrada no instante $t = t_0$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na figura 6.15, são mostrados na figura 6.16 durante um período de oscilação $T = 0.1 \text{ s}$ e com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 \text{ s}$. Observa-se que os perfis de velocidade apresentam um comportamento quase aleatório, refletindo a inviabilidade de medições do escoamento no interior do dispositivo.

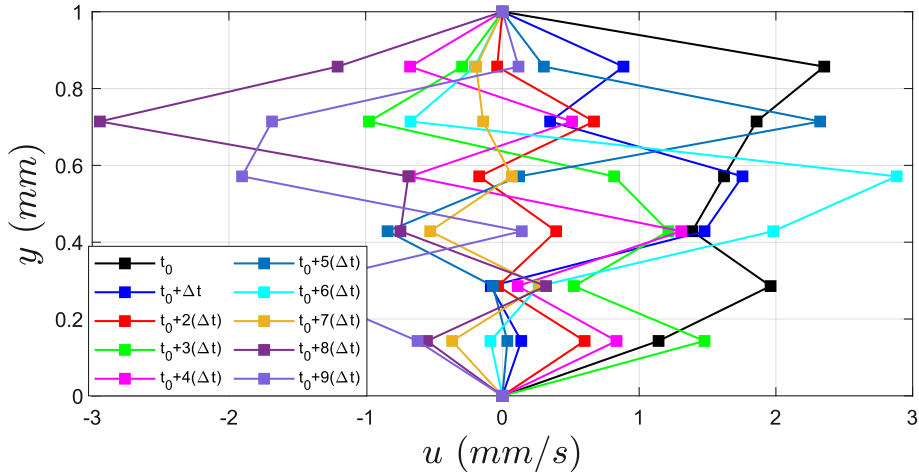


Figura 6.16: Perfis de velocidade da componente u na válvula de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s.

A variação temporal da média da componente u , obtida a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s e intervalo amostral $\Delta t = 0.01$ s, é mostrada na Figura 6.17. Observa-se também uma discrepância entre os pontos experimentais e o ajuste realizado, atribuída às causas previamente discutidas.

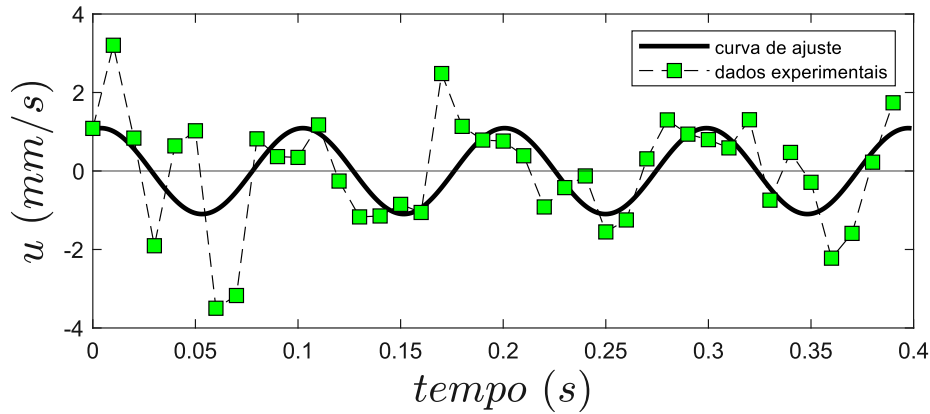


Figura 6.17: Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s na da válvula T45-R 2 canais na entrada da bomba.

O mesmo comportamento, sob as mesmas condições do experimento na válvula de entrada, é identificado válvula na saída devido à reflexão excessiva de luz nas paredes, às regiões de sombra e ao acúmulo de partículas. A baixa qualidade dos campos de velocidade é perceptível, conforme observado na Figura 6.18.

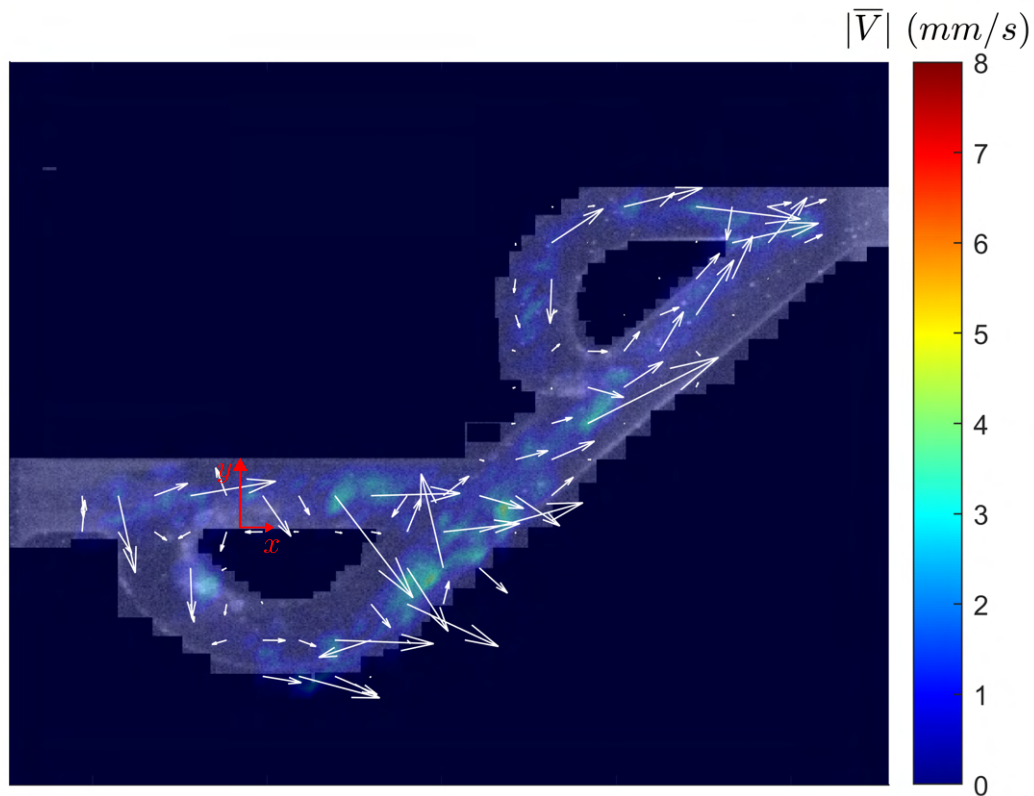


Figura 6.18: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de saída no instante $t = t_0$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na figura 6.18, são mostrados na figura 6.19 durante um período de oscilação $T = 0.1 \text{ s}$ e com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 \text{ s}$. Observa-se que as medições na saída também apresentaram um comportamento aleatório, refletindo a inviabilidade das medições do escoamento.

A variação temporal da média da componente u , obtida a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 \text{ s}$ e intervalo amostral $\Delta t = 0.01 \text{ s}$, é mostrada na Figura 6.20. Observa-se uma discrepância entre os pontos experimentais e o ajuste da curva, atribuída às causas discutidas anteriormente.

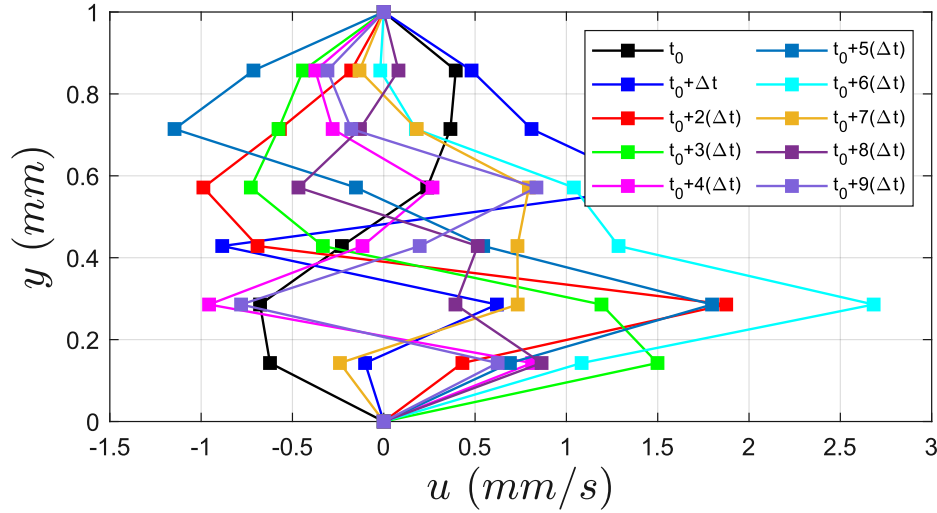


Figura 6.19: Perfis de velocidade da componente u na válvula de saída durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s.

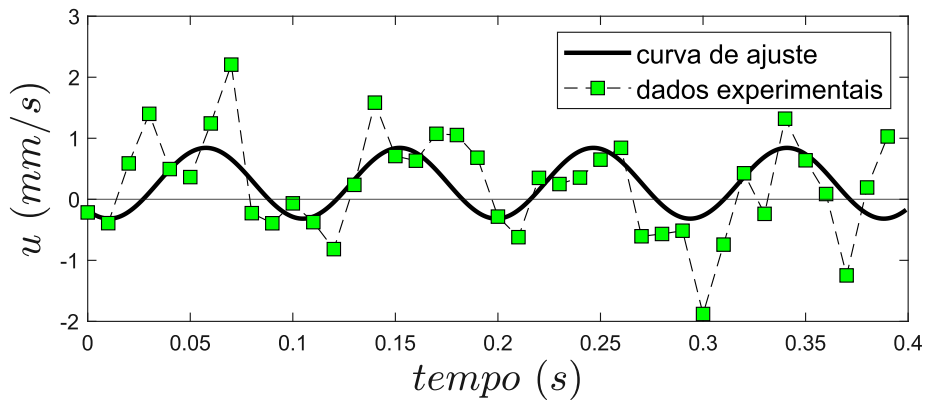


Figura 6.20: Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s na válvula T45-R 2 canais na saída da bomba.

6.3.3

Válvula bocal/difusor

Os campos de velocidade na válvula bocal/difusor, localizada na entrada da bomba, obtidos a partir da média de 25 eventos, estão mostrados na Figura 6.21. Os dados foram obtidos em modo pulsátil com frequência do atuador de $f_{puls} = 10$ Hz. O processamento dos pares de imagens foi feito a uma frequência de $f_{proc} = 100$ Hz. Observam-se vetores espúrios na entrada da válvula, que não refletem o comportamento do escoamento, representando uma limitação. A causa dessa limitação, assim como na seção anterior, deve-se aos problemas de reflexão excessiva, a falta de iluminação em alguns pontos e à sedimentação das partículas de rodamina.

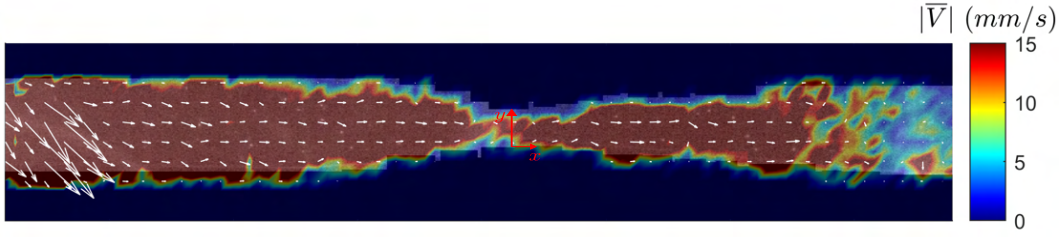


Figura 6.21: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de entrada no instante $t = t_0$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na Figura 6.21, na região da garganta, são mostrados na Figura 6.22, durante um período de oscilação $T = 0.1 s$ e com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$. Observa-se que os perfis de velocidade apresentam um comportamento quase aleatório, inviabilizando as medições no interior da válvula.

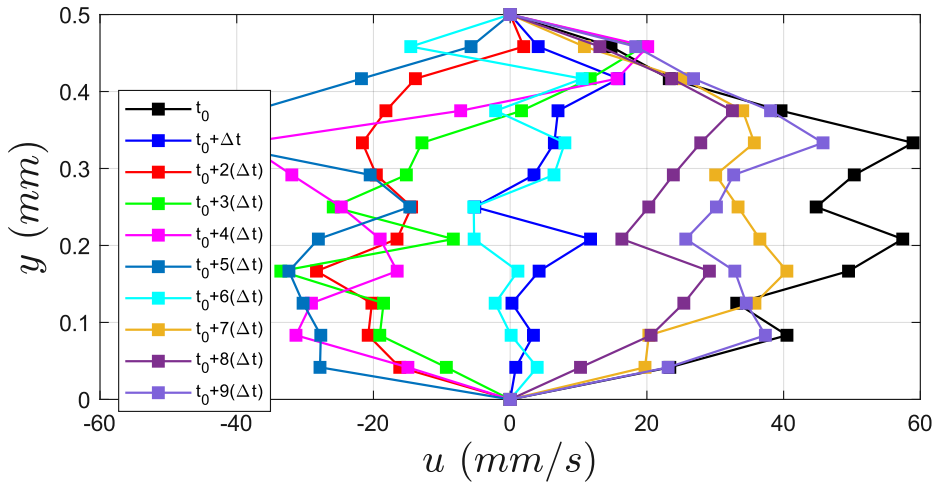


Figura 6.22: Perfis de velocidade da componente u na válvula de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1 s$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$.

A variação temporal da média da componente u , obtida a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4 s$ e intervalo amostral $\Delta t = 0.01 s$, é mostrada na Figura 6.23. Observa-se que, embora a curva de ajuste represente um comportamento oscilatório dos dados experimentais, existem discrepâncias pontuais atribuídas à presença de vetores espúrios no campo de velocidade.

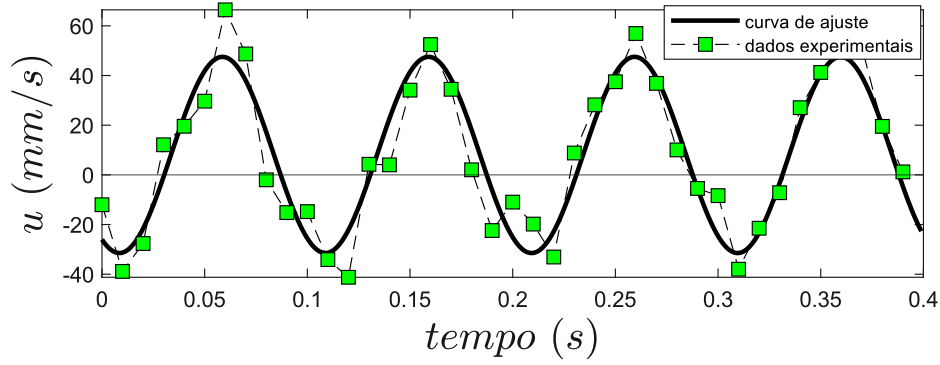


Figura 6.23: Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s na válvula de entrada.

Os campos de velocidade obtidos no bocal/difusor na saída, sob as mesmas condições do experimento na válvula de entrada, apresentam menos vetores espúrios, especialmente na região de saída da válvula. Ainda assim, os campos obtidos são insatisfatórios para serem tratados como medidas confiáveis, conforme ilustrado na Figura 6.24.

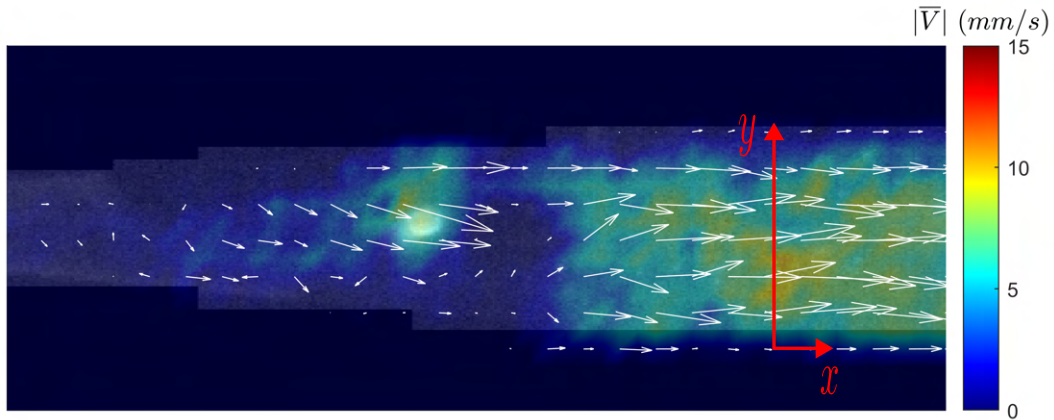


Figura 6.24: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de saída no instante $t = t_0$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na Figura 6.24, são mostrados na Figura 6.25, durante um período de oscilação $T = 0.1$ s e com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s. Observa-se que os perfis apresentam uma oscilação aleatória de moderada intensidade.

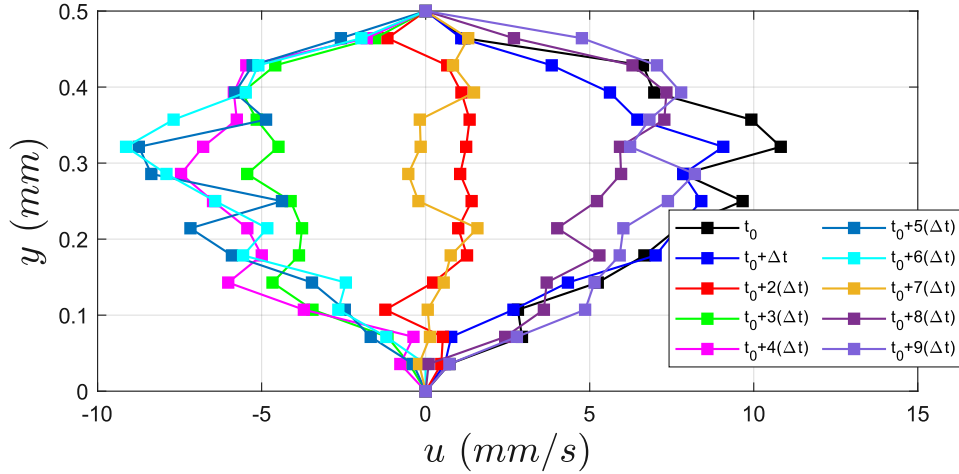


Figura 6.25: Perfis de velocidade da componente u na válvula de saída durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s.

A Figura 6.26 apresenta a variação temporal da média da componente de velocidade u , calculada a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s e intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s. Mesmo com os campos de velocidade sendo considerados insatisfatórios, nota-se que a oscilação da componente u tende a seguir um perfil senoidal com frequência correspondente à do atuador, $f = 10$ Hz, apesar do sinal de excitação aplicado ao piezoelétrico ser do tipo onda quadrada. Esse comportamento sugere que o sistema apresenta uma resposta dinâmica lenta frente ao degrau de tensão imposto pelo atuador.

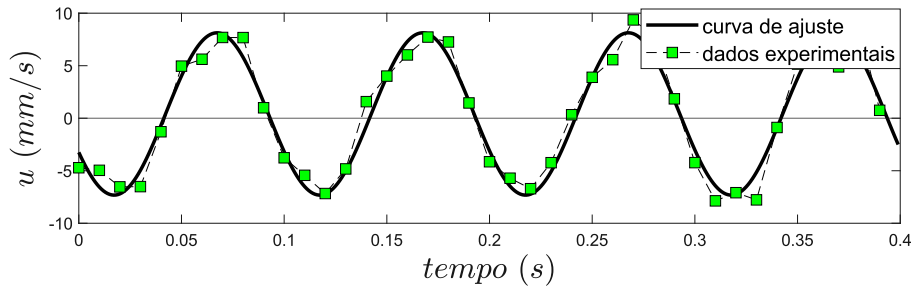


Figura 6.26: Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s na válvula de saída.

6.4

Determinação dos Campos de Velocidade em Válvulas no Modo Pulsátil com Óleo de Peroba

Visto que os dados obtidos com água e rodamina não foram satisfatórios para os testes com a válvula Tesla T45-R de 2 canais e a válvula bocal/difusor, optou-se por utilizar o óleo de peroba, que possui um índice de refração mais próximo ao da resina com que foi fabricada a bomba, com partículas de

fluoresceína, iluminadas por um laser. Nessa configuração, as partículas foram excitadas por um comprimento de onda $\lambda_{\text{exc laser}} = 488 \text{ nm}$ (espectro da luz azul), emitindo posteriormente em $\lambda_{\text{emi fluo}} = 542 \text{ nm}$ (espectro da luz verde). Para garantir a captação apenas da luz emitida pelas partículas, utilizou-se um filtro óptico passa-alta com comprimento de corte $\lambda_{\text{corte fluo}} = 515 \text{ nm}$.

6.4.1

Válvula Tesla 2 canais

Os campos de velocidade na válvula T45-R de dois canais, localizada na entrada da bomba, foram obtidos a partir da média de 25 eventos, sendo apresentados na Figura 6.27. Os dados foram adquiridos em modo pulsátil, com frequência do atuador de $f_{\text{puls}} = 10 \text{ Hz}$, e processados a uma taxa de $f_{\text{proc}} = 100 \text{ Hz}$. Observa-se que, na região de junção dos canais, o escoamento apresenta velocidades mais elevadas. Porém, tanto nas regiões de entrada quanto nas regiões de saída da válvula, são observados vetores espúrios, atribuídos à baixa iluminação nesses trechos.

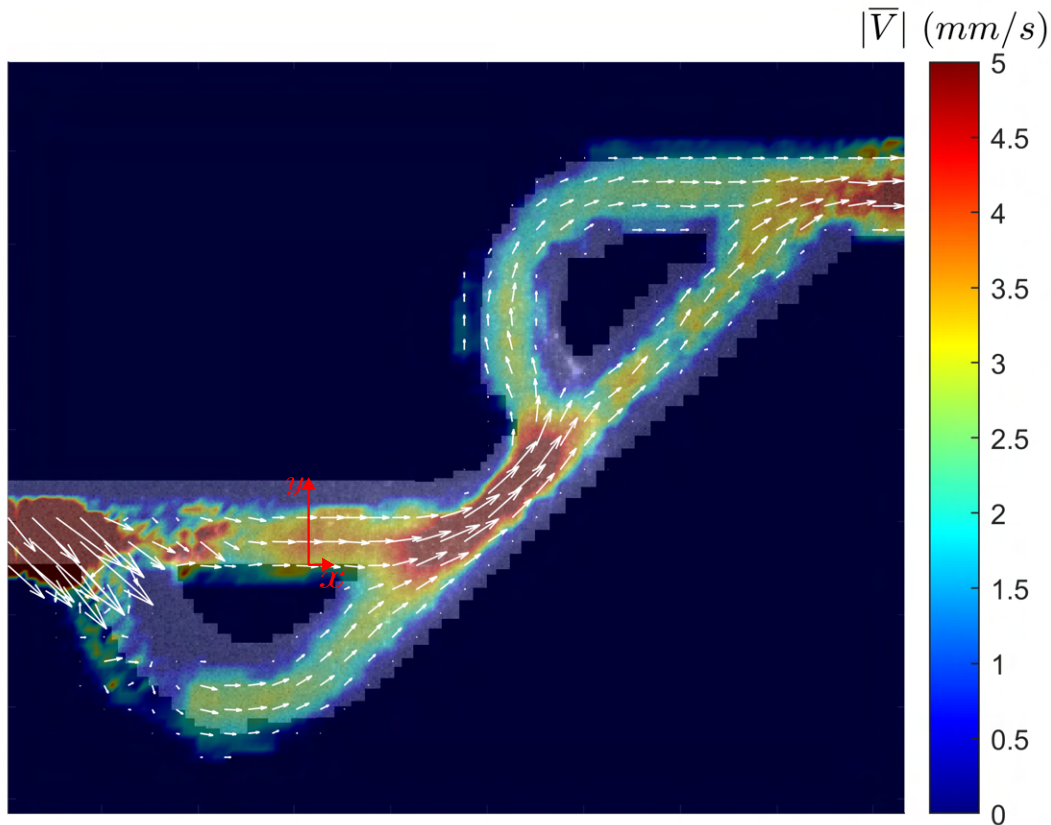


Figura 6.27: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de entrada no instante $t = t_0$.

Os perfis de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na figura 6.27, são apresentados na Figura 6.28 durante um período

de oscilação $T = 0.1\text{ s}$ e com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$. Observa-se o início do escoamento direto no instante t_0 e atingindo o seu valor máximo o instante $t_0 + 3\Delta t$ na posição $y = 0.40\text{ mm}$. Já no instante $t_0 + 5\Delta t$ se inicia o escoamento reverso, que atinge uma velocidade máxima no instante $t_0 + 6\Delta t$ na posição $y = 0.50\text{ mm}$.

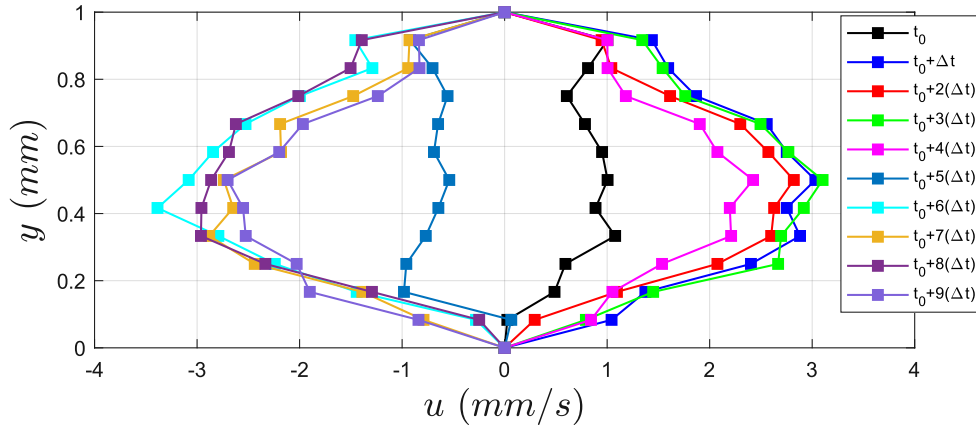


Figura 6.28: Perfis de velocidade da componente u na válvula de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1\text{ s}$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$

A variação temporal da média da componente u , obtida a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4\text{ s}$ e intervalo amostral $\Delta t = 0.01\text{ s}$, é mostrada na Figura 6.29. É interessante observar que a oscilação da componente u se aproxima de uma senoide com frequência igual à do atuador, $f = 10\text{ Hz}$, apesar do sinal de excitação do piezoelétrico ser do tipo onda quadrada. Isso indica que o sistema apresenta um tempo de resposta lento em relação ao degrau de voltagem imposto pelo atuador.

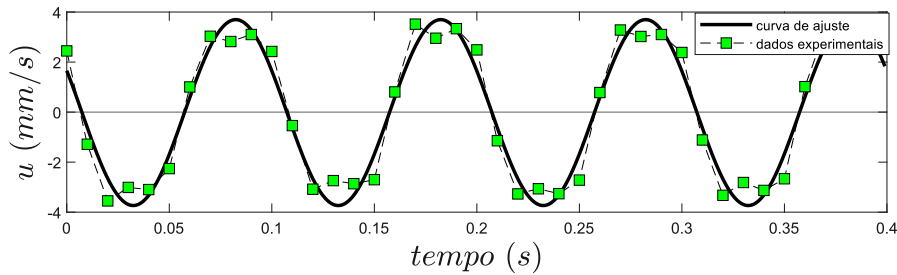


Figura 6.29: Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4\text{ s}$ na válvula de entrada.

O mesmo comportamento, sob as mesmas condições do experimento na válvula de entrada, é identificado válvula de saída, conforme a Figura 6.30. Na região de junção, apresenta velocidades elevadas. Porém, na região da entrada

da válvula são observados vetores espúrios devido à baixa iluminação nessa região.

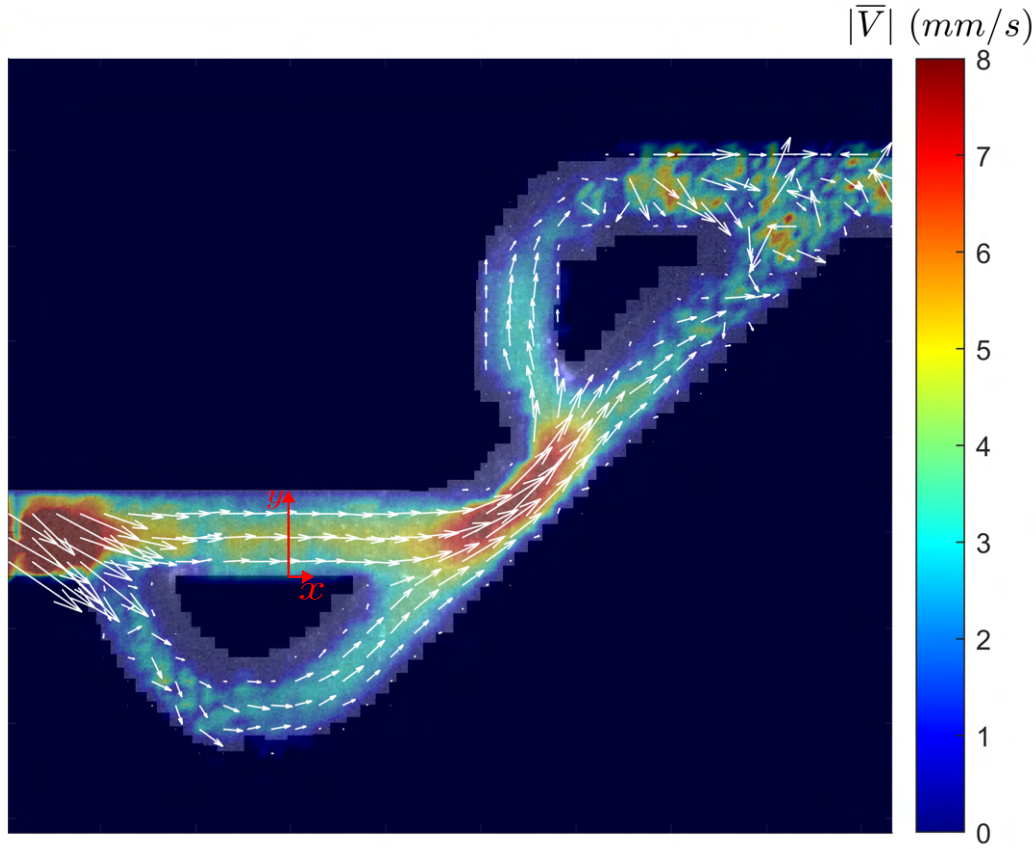


Figura 6.30: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula de saída no instante $t = t_0$.

Os perfis de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na figura 6.30, são apresentados na Figura 6.31 durante um período de oscilação $T = 0.1 s$ e com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01 s$. Observa-se o início do escoamento direto no instante t_0 e atingindo o seu valor máximo no instante $t_0 + 3\Delta t$ na posição $y = 0.40 mm$. Já no instante $t_0 + 5\Delta t$ se inicia o escoamento reverso, que atinge uma velocidade máxima no instante $t_0 + 6\Delta t$ na posição $y = 0.50 mm$.

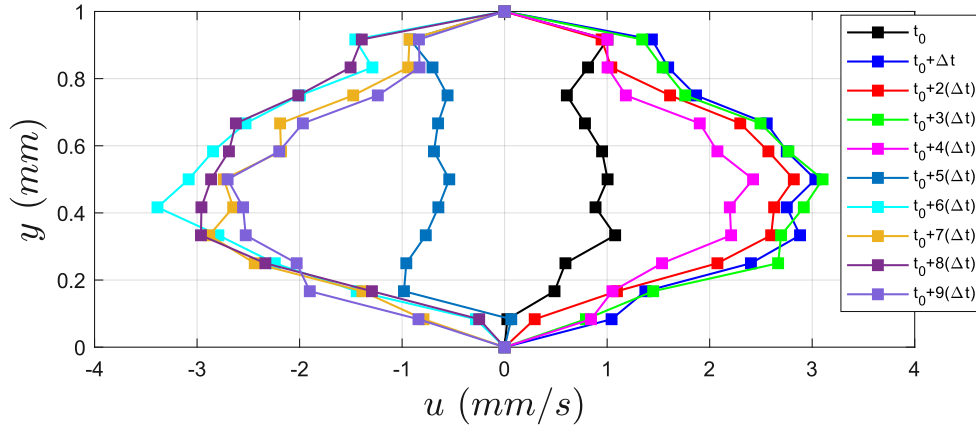


Figura 6.31: Perfis de velocidade da componente u na válvula de saída durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s.

Por fim, a variação temporal da média da componente u , obtida a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s e intervalo amostral $\Delta t = 0.01$ s, é mostrada na Figura 6.32. É interessante observar que a oscilação da componente u se aproxima de uma senoide com frequência igual à do atuador, $f = 10$ Hz, apesar do sinal de excitação do piezoelétrico ser do tipo onda quadrada. Isso indica que o sistema apresenta um tempo de resposta lento em relação ao degrau de voltagem imposto pelo atuador.

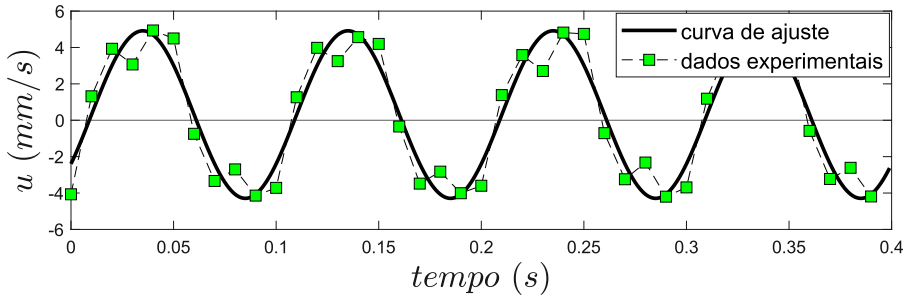


Figura 6.32: Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s na válvula de saída.

6.4.2 válvula bocal/difusor

Os campos de velocidade na válvula bocal/difusor, localizada na entrada da bomba, foram obtidos a partir da média de 25 eventos, sendo apresentados na Figura 6.33. Os dados foram adquiridos em modo pulsátil, com frequência do atuador de $f_{puls} = 10$ Hz, e processados a uma taxa de $f_{proc} = 100$ Hz. Observa-se que o escoamento acelera na região da garganta, onde ocorre uma redução da seção transversal, evidenciada pelo alongamento dos vetores nessa região. Além disso, não se observam vetores espúrios, indicando uma medição

de boa qualidade, com vetores bem definidos e coerentes com o comportamento físico esperado.

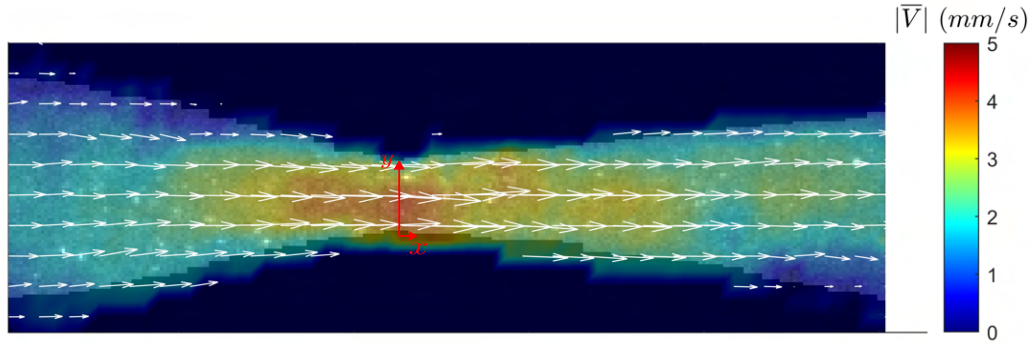


Figura 6.33: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula bolca/difusor de entrada no instante $t = t_0$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na Figura 6.33, são mostrados na Figura 6.34, durante um período de oscilação $T = 0.1\text{ s}$ e com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$. Observa-se o comportamento esperado para escoamentos internos, com perfis de velocidades em formato parabólico. Essa característica evidencia uma melhora na qualidade da medição realizada com a técnica PIV. A velocidade atinge seu valor máximo para o escoamento direto na posição $y = 0.25$ e no instante $t_0 + 5\Delta t$.

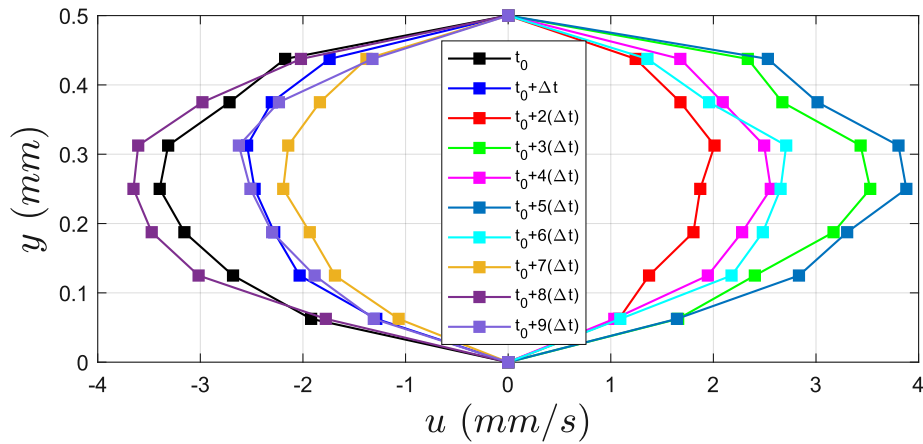


Figura 6.34: Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1\text{ s}$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$.

A variação temporal da média da componente u , obtida a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4\text{ s}$ e intervalo amostral $\Delta t = 0.01\text{ s}$, é mostrada na Figura 6.35. Nota-se que os dados experimentais apresentam um comportamento oscilatório periódico, compatível com a excitação do atuador

por uma onda quadrada. Ainda que a curva de ajuste represente uma senoide, os dados medidos sugerem uma transição mais abrupta entre os extremos, o que é característico de uma resposta influenciada por uma excitação com forma de onda quadrada. Essa tendência reforça a coerência entre a excitação imposta e a resposta do escoamento medida por PIV.

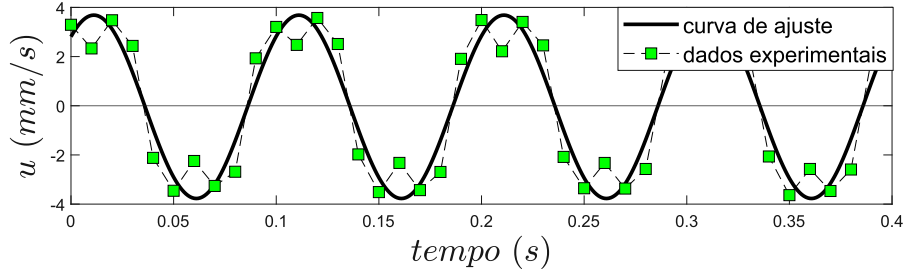


Figura 6.35: Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4\text{ s}$ na válvula bolca/difusor de entrada.

Na válvula do tipo bocal/difusor localizada na saída da bomba, sob as mesmas condições experimentais da válvula de entrada, observam-se regiões com vetores espúrios. Esse comportamento pode estar associado à insuficiência de iluminação, à concentração excessiva de partículas traçadoras ou ainda ao espalhamento nas interfaces, que compromete a qualidade da visualização, conforme ilustra a Figura 6.36

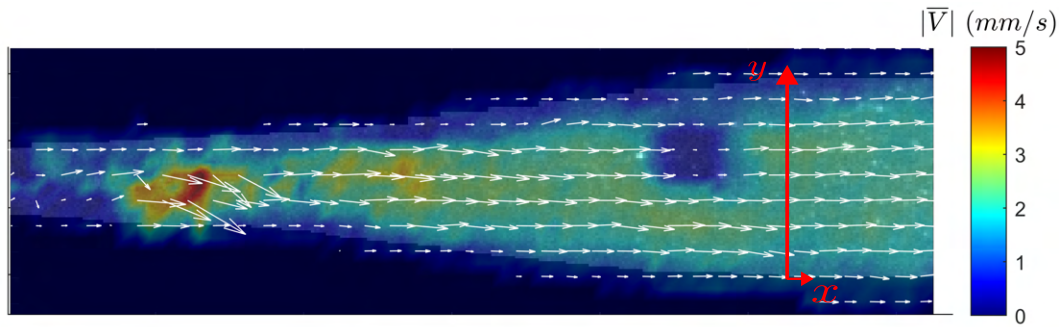


Figura 6.36: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula bocal/difusor de saída no instante $t = t_0$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na Figura 6.36, são mostrados na Figura 6.37, durante um período de oscilação $T = 0.1\text{ s}$ e com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$. Observa-se que, embora os perfis de velocidade apresentados na Figura 6.37 revelem maior qualidade em comparação aos dados obtidos com água, ainda persiste uma componente de oscilação aleatória, associada aos problemas previamente descritos.

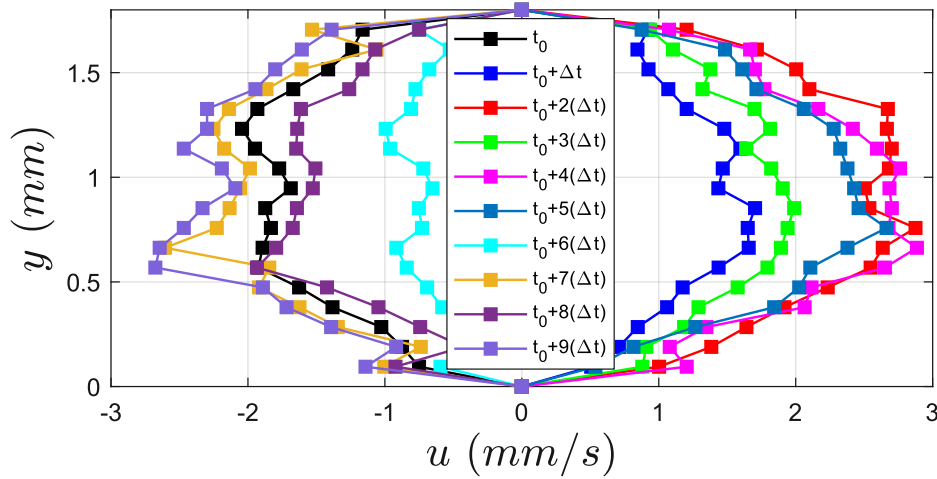


Figura 6.37: Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s.

Por fim, a variação temporal da média da componente u , obtida a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s e intervalo amostral $\Delta t = 0.01$ s, é mostrada na Figura 6.38. É interessante observar que a oscilação da componente u se aproxima de uma senoide com frequência igual à do atuador, $f = 10$ Hz, apesar do sinal de excitação do piezoelétrico ser do tipo onda quadrada. Isso indica que o sistema apresenta um tempo de resposta lento em relação ao degrau de tensão imposto pelo atuador.

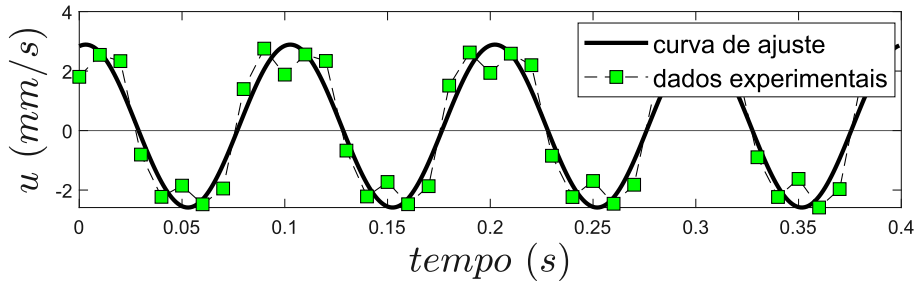


Figura 6.38: Variação temporal da média de u a partir de 25 eventos com duração de $T_{ev} = 0.4$ s na válvula bocal/difusor de saída.

Apesar do aumento na qualidade dos dados em comparação àqueles obtidos com água e rodamina, os campos de velocidade gerados ainda não se mostraram satisfatórios, apresentando um número excessivo de vetores espúrios que comprometem a confiabilidade dos resultados. Além disso, persistiram problemas relacionados à baixa iluminação e ao espalhamento da luz nas interfaces entre os materiais, dificultando a obtenção de imagens adequadas para o processamento. Diante disso, foi necessário um ajuste do índice de refração entre o material da resina e o fluido de trabalho. Para esse fim,

empregou-se uma mistura de cinamato de etila e álcool isopropílico, na proporção de 85% e 15%, respectivamente.

6.5

Determinação dos Campos de Velocidade em Válvulas no Modo Pulsátil com Cinamato de Etila

Como os dados obtidos com o uso de óleo de peroba contendo partículas de fluoresceína não se mostraram satisfatórios para os testes com a válvula Tesla T45-R de 2 canais e com a válvula do tipo bocal/difusor, optou-se por substituir o fluido por uma mistura de cinamato de etila e álcool isopropílico, na proporção de 85% e 15%, respectivamente. Essa nova composição apresenta um índice de refração mais próximo ao da resina utilizada na fabricação da bomba, favorecendo a visualização das partículas fluorescentes. As partículas de fluoresceína foram excitadas por um feixe de laser com comprimento de onda $\lambda_{\text{exc laser}} = 488\text{nm}$ (espectro da luz azul), emitindo fluorescência em $\lambda_{\text{emi fluo}} = 542\text{nm}$ (espectro da luz verde). Para assegurar que apenas a luz emitida pelas partículas fosse captada, utilizou-se um filtro óptico passa-alta com comprimento de corte em $\lambda_{\text{corte fluo}} = 515\text{nm}$.

6.5.1

Válvulas Tesla dois canais

Os campos de velocidade na válvula T45-R de 2 canais, localizada na entrada da bomba, foram obtidos a partir da média de 25 eventos, sendo apresentados na Figura 6.39. Os dados foram adquiridos em modo pulsátil, com frequência do atuador de $f_{\text{puls}} = 10\text{ Hz}$, e processados a uma taxa de $f_{\text{proc}} = 100\text{ Hz}$. Observa-se não haver presença de vetores espúrios e que os vetores obtidos representam adequadamente o comportamento do escoamento. Nas regiões retilíneas e na junção dos canais, verificam-se velocidades mais elevadas, enquanto nas regiões curvas o escoamento apresenta velocidades menores.

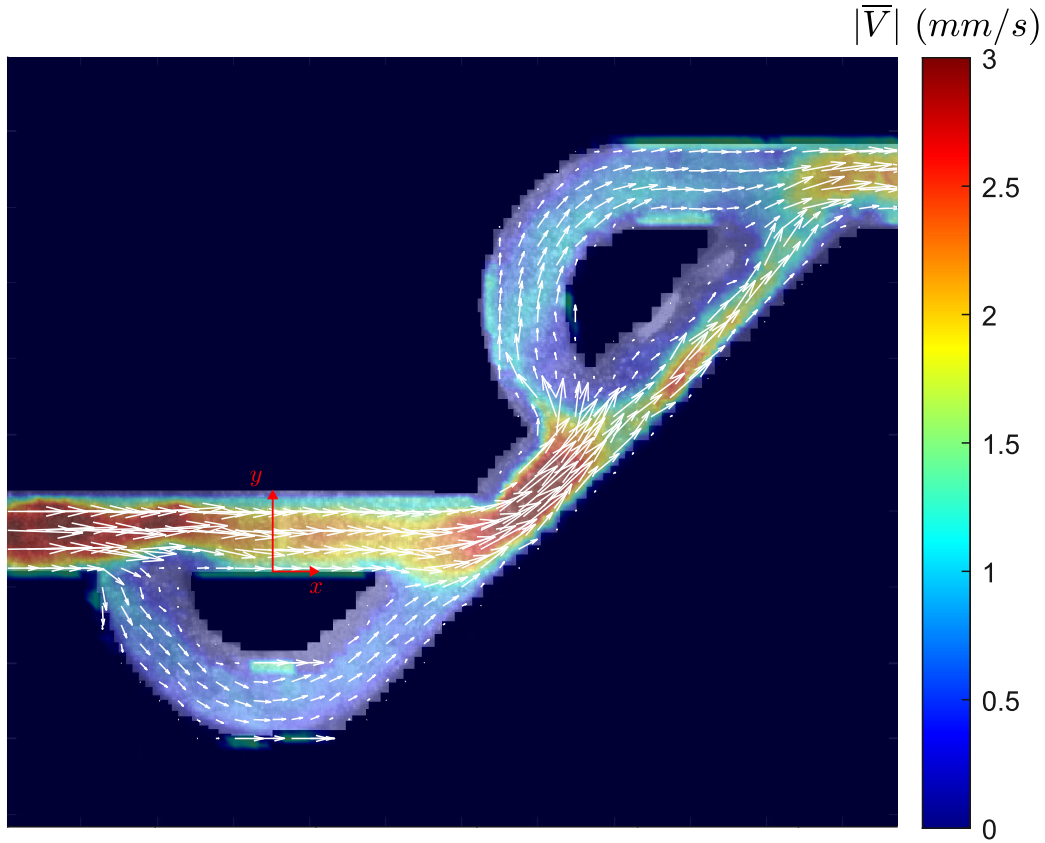


Figura 6.39: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula T45-R 2 canais de entrada no instante $t = t_0$.

A Figura 6.40 apresenta a evolução da velocidade média na válvula de entrada durante um ciclo do atuador piezoelétrico, com período $T = 0.1s$ e intervalo temporal $\Delta t = 0.01s$. No instante t_0 se inicia o escoamento direto. Observa-se que na seção reta da entrada e na junção entre os canais a magnitude da velocidade é crescente. No instante $t_0 + (\Delta t)$, a magnitude se torna máxima enquanto nas regiões curvas a magnitude da velocidade é baixa. Já em $t_0 + 2(\Delta t)$ observa-se uma diminuição progressiva das magnitudes de velocidade, porém em $t_0 + 3(\Delta t)$ a magnitude da velocidade volta a aumentar. Finalmente, no instante $t_0 + 4(\Delta t)$ a magnitude atinge valores mínimos, preparando-se para a inversão do escoamento. No instante $t_0 + 5(\Delta t)$, inicia-se o escoamento no sentido reverso, com o crescimento das magnitudes da velocidade concentradas novamente no canal reto e na região de junção, mas agora no sentido oposto. Em $t_0 + 6(\Delta t)$ essas magnitudes se tornam máximas e nas regiões dos canais apresentam baixas magnitudes. No instante $t_0 + 7(\Delta t)$, observa-se uma redução progressiva das magnitudes de velocidade, mas $t_0 + 8(\Delta t)$ as magnitudes aumentam na região reta e de junção. Finalmente, em $t_0 + 9(\Delta t)$, a magnitude atinge seu ponto mínimo, preparando-se para o próximo ciclo de inversão do escoamento.

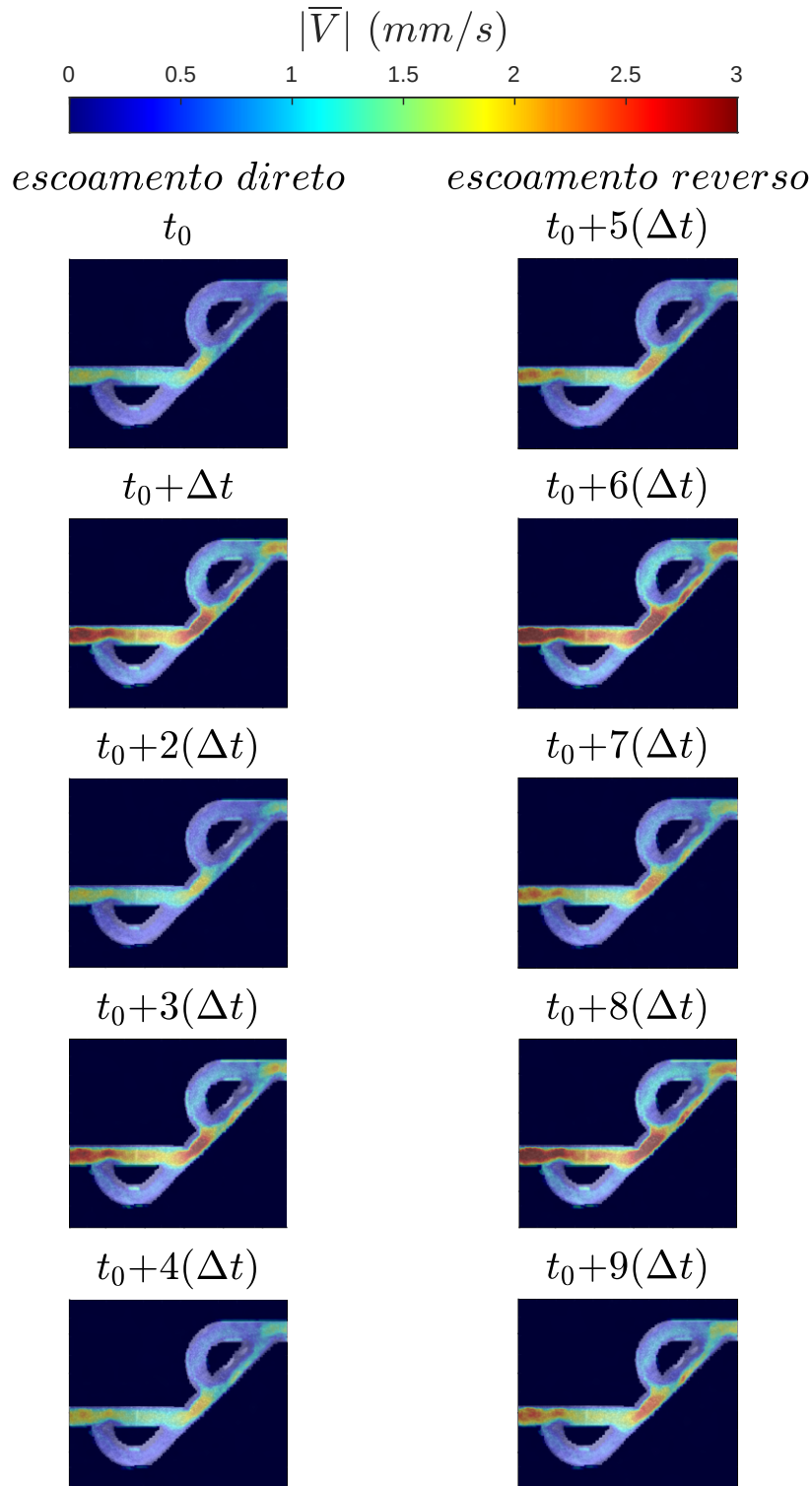


Figura 6.40: Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula T45-R 2 canais de entrada durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 \text{ s}$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na Figura 6.39, são apresentados na Figura 6.41, durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s. Observa-se que, no instante inicial t_0 , inicia-se o escoamento em sentido reverso, que atinge uma velocidade máxima no instante $t_0 + \Delta t$ e diminui em $t_0 + 2\Delta t$. No sentido direto, a velocidade máxima é alcançada no instante $t_0 + 6\Delta t$, e o ciclo prossegue. Durante todo esse intervalo, os perfis apresentam menos oscilações espúrias.

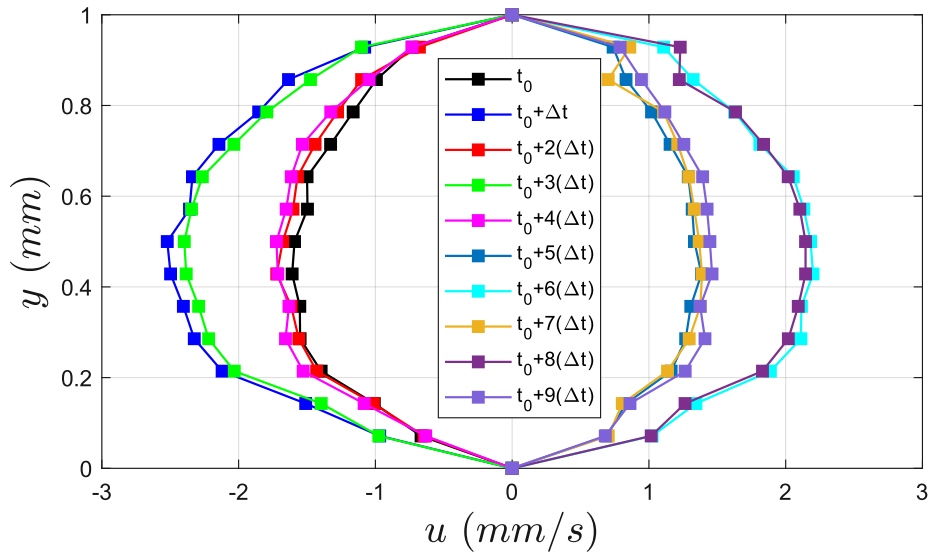


Figura 6.41: Perfis de velocidade da componente u na válvula T45-R 2 canais de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s.

A variação temporal da média da componente u , calculada a partir de 25 eventos com duração $T_{ev} = 0.4$ s e intervalo amostral de $\Delta t = 0.01$ s, está apresentada na Figura 6.42. Observa-se que os dados experimentais exibem um comportamento oscilatório periódico, condizente com a excitação do atuador por uma onda quadrada. Embora a curva ajustada seja uma senoide, os dados medidos indicam uma transição mais brusca entre os valores extremos, característica típica de uma resposta a uma excitação com formato de onda quadrada. Essa observação reforça a consistência entre a excitação aplicada e a resposta do escoamento captada pelo método PIV.

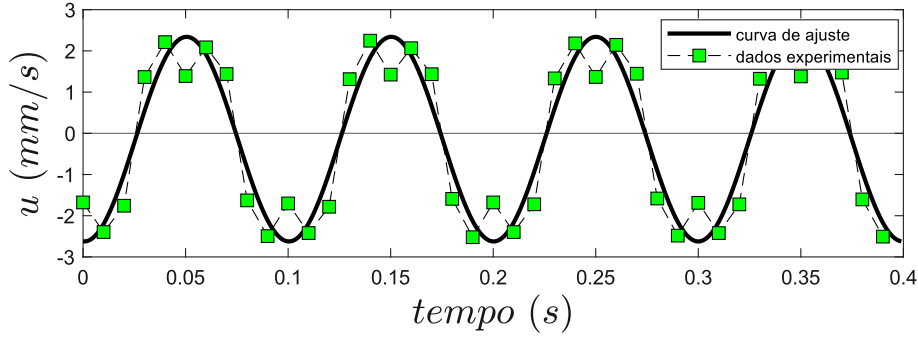
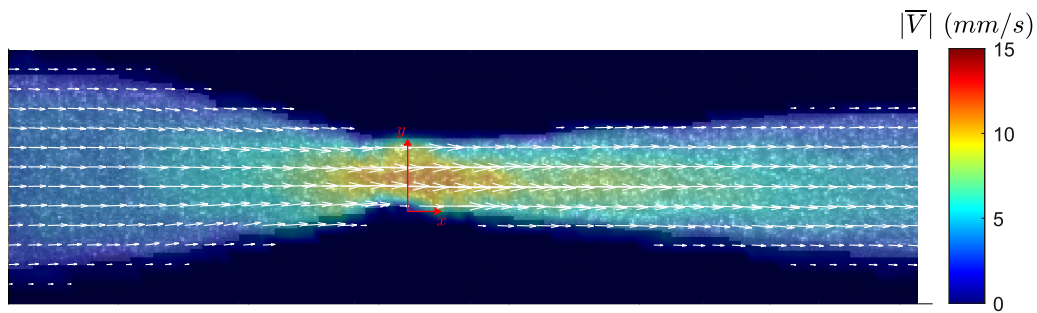


Figura 6.42: Variação da velocidade no tempo

6.5.2

Válvulas bocal/difusor

Os campos de velocidade na válvula bocal/difusor, localizada na entrada da bomba, foram obtidos a partir da média de 25 eventos, sendo apresentados na Figura 6.43. Os dados foram adquiridos em modo pulsátil, com frequência do atuador de $f_{\text{puls}} = 10$ Hz, e processados a uma taxa de $f_{\text{proc}} = 100$ Hz. Observa-se que o escoamento acelera na região da garganta, onde ocorre uma redução da seção transversal. Além disso, não se observam vetores espúrios, indicando uma medição de boa qualidade, com vetores bem definidos e coerentes com o

Figura 6.43: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula bocal/difusor de entrada no instante $t = t_0$.

A Figura 6.44 apresenta a evolução da velocidade média na válvula de entrada durante um ciclo do atuador piezoelétrico, com período $T = 0.1$ s e intervalo temporal $\Delta t = 0.01$ s. Observa-se que o escoamento direto se inicia no instante t_0 ; já no instante $t_0 + \Delta t$, a velocidade atinge o valor máximo na região da garganta e mantém uma magnitude da velocidade alta por quase todo o bocal. Porém, no instante $t_0 + 2\Delta t$, a magnitude da velocidade diminui, aumentando novamente no instante $t_0 + 3\Delta t$, já no instante $t_0 + 4\Delta t$ a magnitude da velocidade começa a diminuir para começar o escoamento reverso no instante $t_0 + 5\Delta t$. A velocidade se torna máxima no instante $t_0 + 6\Delta t$, mas

reduz no instante $t_0+7\Delta t$ voltando a aumentar no instante $t_0+8\Delta t$ para diminuir e iniciar o novo período. Durante todo esse ciclo os campos de velocidades se mostram adequadamente capturados.

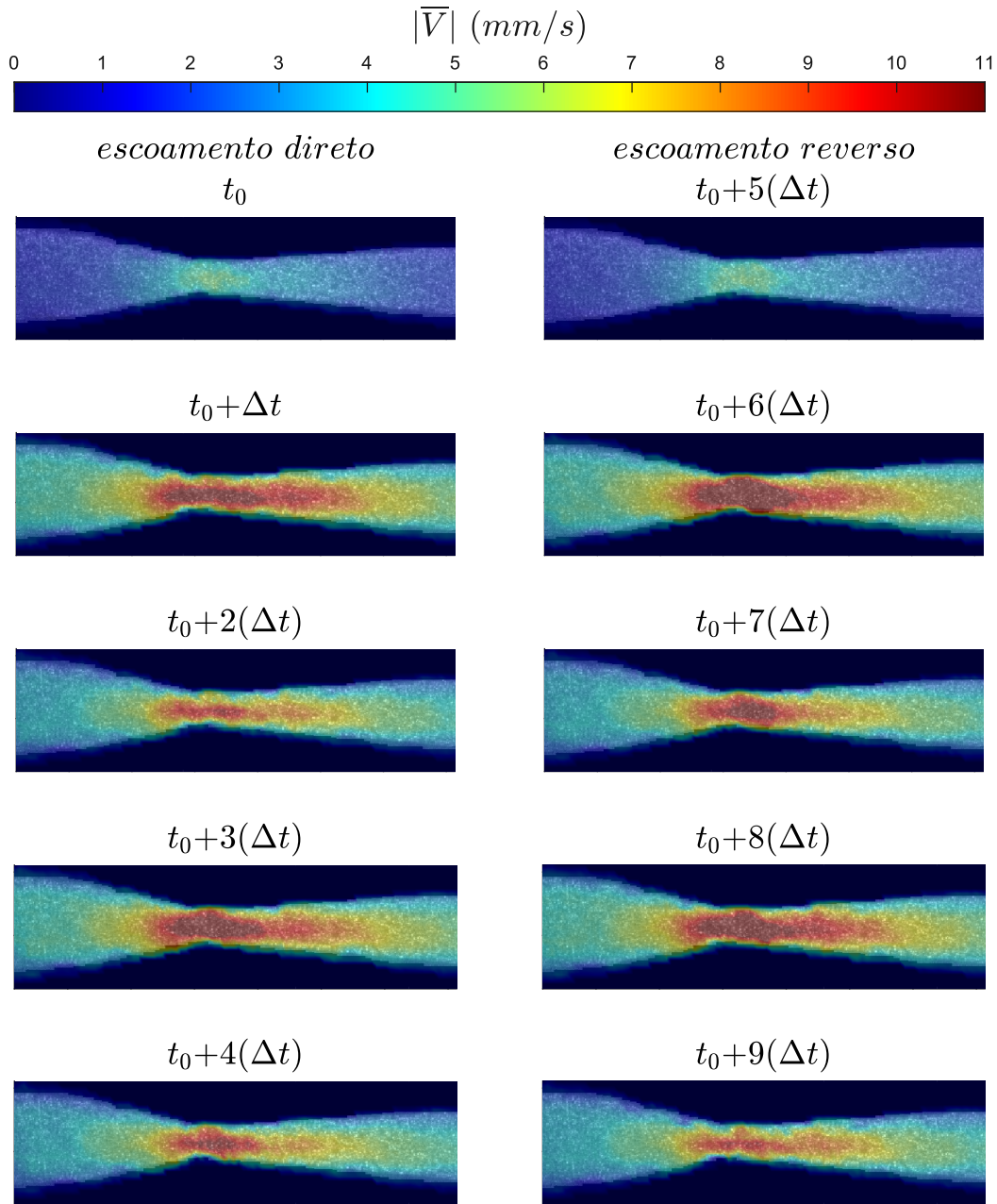


Figura 6.44: Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 \text{ s}$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial adotado na Figura 6.43, são apresentados na Figura 6.45, durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s. Observa-se que, no instante inicial t_0 , inicia-se o escoamento direto, que atinge uma velocidade máxima no instante $t_0 + 3\Delta t$. No escoamento reverso, a velocidade máxima é alcançada no instante $t_0 + 6\Delta t$.

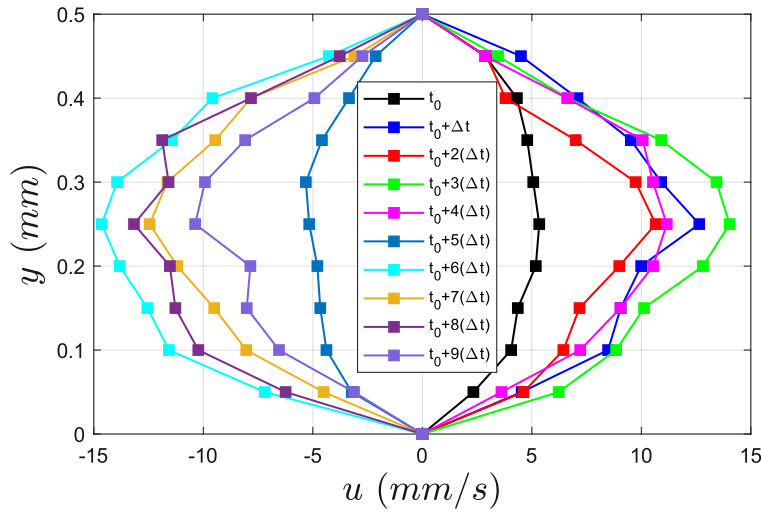


Figura 6.45: Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s.

A Figura 6.46 apresenta a evolução temporal da média da componente u , obtida a partir da análise de 25 eventos com duração $T_{ev} = 0.4$ s e intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s. Os resultados experimentais revelam um padrão oscilatório periódico, compatível com a atuação do sistema por meio de uma excitação do tipo onda quadrada. Apesar da curva ajustada seguir uma forma senoidal, os dados medidos demonstram transições abruptas entre os valores máximos e mínimos, comportamento típico de respostas a estímulos quadrados. Tal coerência entre o perfil da excitação e a resposta do escoamento, registrada via PIV, evidencia a fidelidade da medição e a eficiência do método adotado.

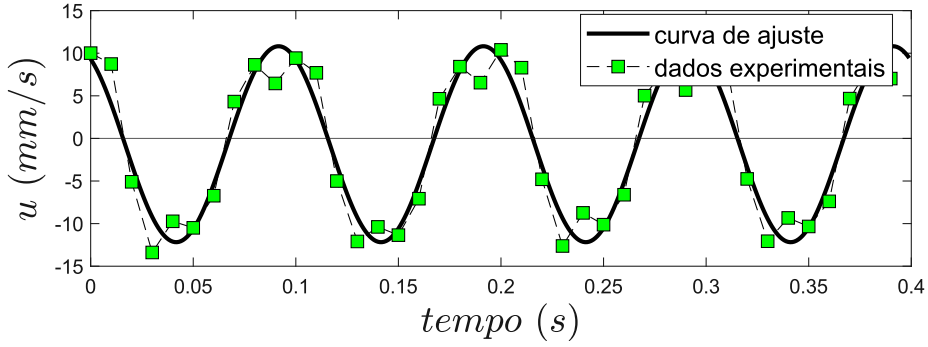


Figura 6.46: variação da velocidade ao longo do tempo

Na válvula do tipo bocal/difusor localizada na saída da bomba, sob as mesmas condições experimentais aplicadas à válvula de entrada, observam-se maiores magnitudes de velocidade na região da garganta, conforme ilustrado na Figura 6.47. Além disso, é importante destacar que os dados obtidos não apresentam vetores espúrios, indicando uma medição de boa qualidade, com vetores bem definidos e coerentes com o comportamento físico esperado.

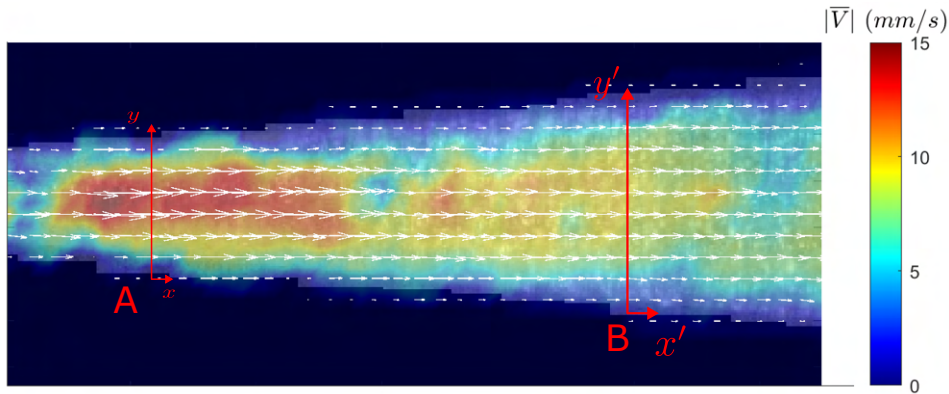


Figura 6.47: O campo de velocidade obtido a partir da média de 25 eventos na válvula bocal/difusor de saída no instante $t = t_0$.

A Figura 6.48 apresenta a evolução da velocidade média na válvula de entrada durante um ciclo do atuador piezoelétrico, com período $T = 0.1s$ e intervalo temporal $\Delta t = 0.01s$. Observa-se, no instante inicial t_0 , o início do escoamento direto com velocidades moderadas. Em $t_0 + \Delta t$, ocorre um aumento expressivo na magnitude da velocidade. Essa intensidade começa a decair em $t_0 + 2\Delta t$. No instante $t_0 + 3\Delta t$, verifica-se um novo pico de velocidade. Em $t_0 + 4\Delta t$ há uma atenuação generalizada do escoamento, com dispersão da velocidade e preparação para a inversão do escoamento. A partir de $t_0 + 5\Delta t$, inicia-se o escoamento reverso, novamente com magnitudes moderadas e perfil mais homogêneo. Em $t_0 + 6\Delta t$ ocorre um novo pico de velocidade, agora concentrado na entrada do difusor. A magnitude diminui

novamente em $t_0 + 7\Delta t$. Um segundo pico reverso se forma em $t_0 + 8\Delta t$, com regiões de velocidade elevada semelhantes às da fase de escoamento direto, o escoamento reverso perde força em $t_0 + 9\Delta t$ e imediatamente depois o ciclo se repete.

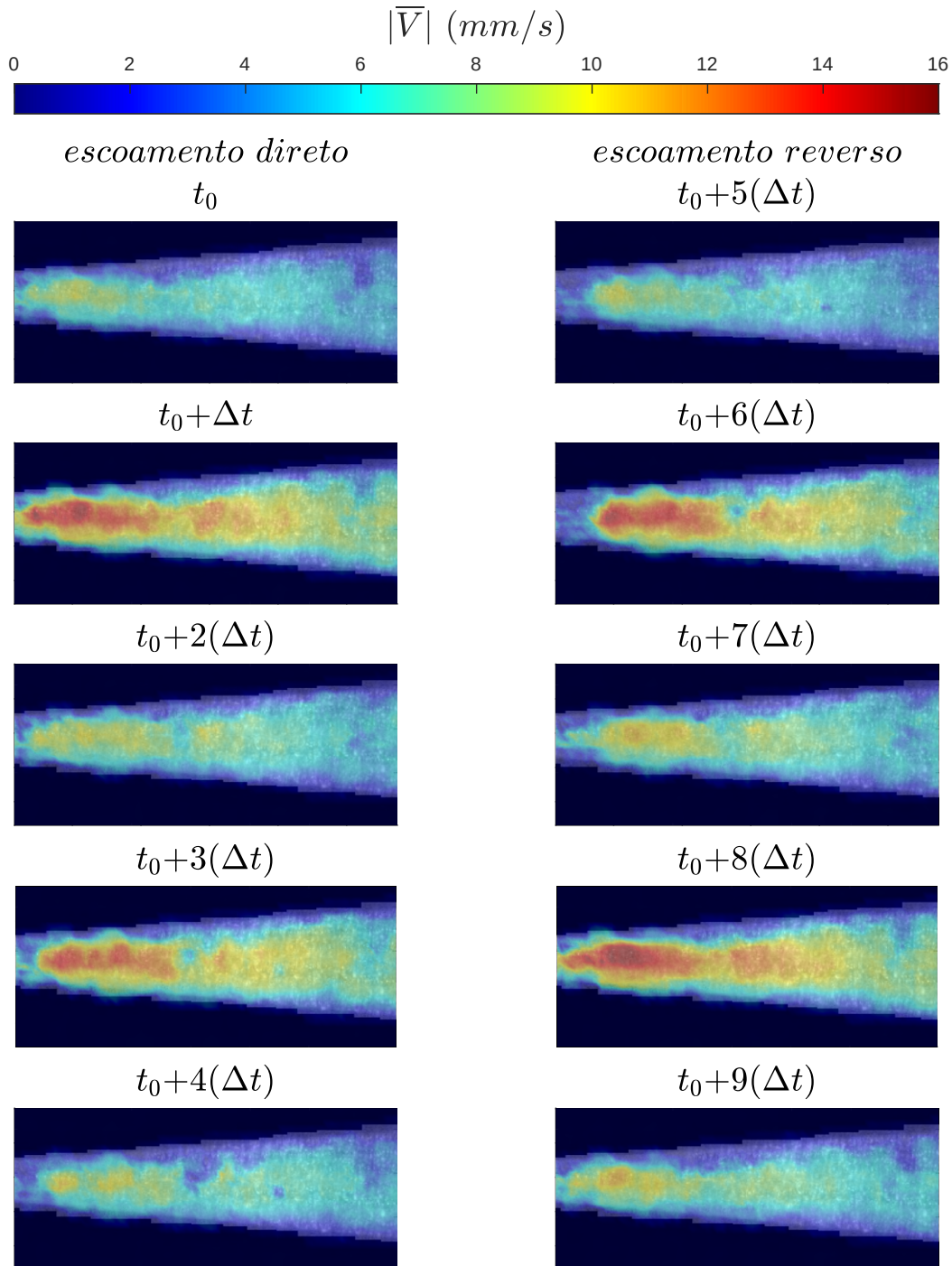


Figura 6.48: Evolução temporal da magnitude da velocidade na válvula bo-cal/difusor de saída durante um período de $T = 0.1s$. O instante inicial do ciclo do piezoelétrico é t_0 , e o intervalo de tempo amostral é $\Delta t = 0.01 \text{ s}$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial B na Figura 6.47, são apresentados na Figura 6.49, durante um período de oscilação $T = 0.1\text{ s}$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$. Nota-se uma variação suave sem presença de oscilações aleatórias, o qual é um indicativo de perfis mais confiáveis, ou seja, com menos vetores espúrios.

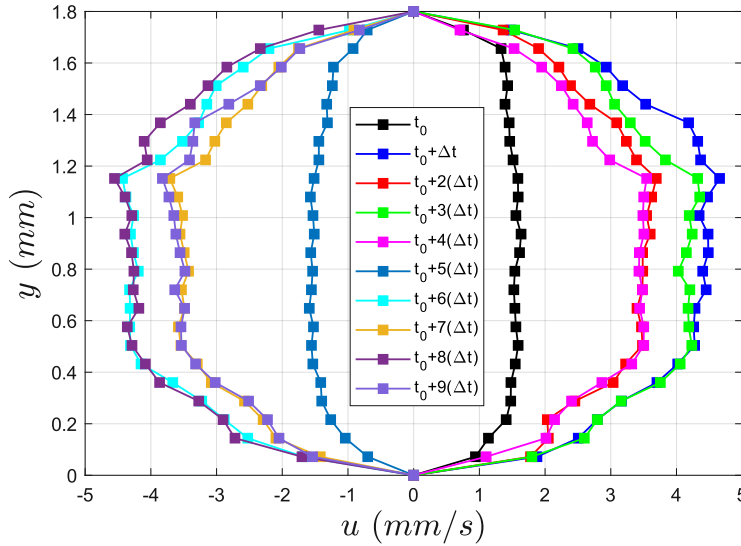


Figura 6.49: Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de saída durante um período de oscilação $T = 0.1\text{ s}$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$.

Os perfis da componente de velocidade u ao longo da direção x , conforme o referencial A na Figura 6.47, são apresentados na Figura 6.50, durante um período de oscilação $T = 0.1\text{ s}$, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$. Observa-se uma variação significativa da velocidade ao longo do tempo. Atinge seu valor máximo no instante $t_0 + \Delta t$ no sentido reverso, e em $t_0 + 5\Delta t$ no sentido direto.

A Figura 6.51 apresenta a evolução temporal da média da componente u , obtida a partir da análise de 25 eventos com duração $T_{ev} = 0.4\text{ s}$ e intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01\text{ s}$. Os resultados experimentais revelam um padrão oscilatório periódico, compatível com a atuação do sistema por meio de uma excitação do tipo onda quadrada. Apesar da curva ajustada seguir uma forma senoidal, os dados medidos demonstram transições abruptas entre os valores máximos e mínimos, comportamento típico de respostas a estímulos quadrados. Tal coerência entre o perfil da excitação e a resposta do escoamento, registrada via PIV, evidencia a fidelidade da medição e a eficiência do método adotado.

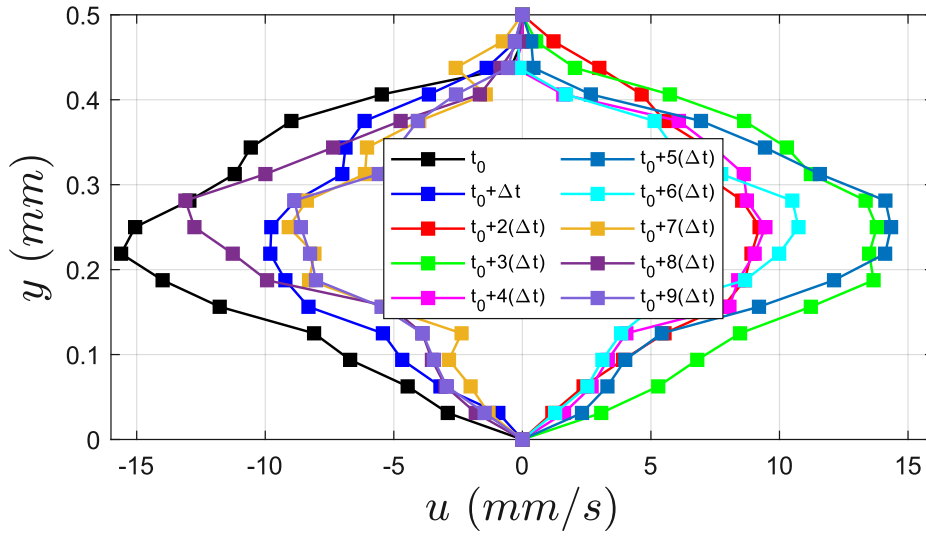


Figura 6.50: Perfis de velocidade da componente u na válvula bocal/difusor de entrada durante um período de oscilação $T = 0.1$ s, com intervalo de amostragem $\Delta t = 0.01$ s.

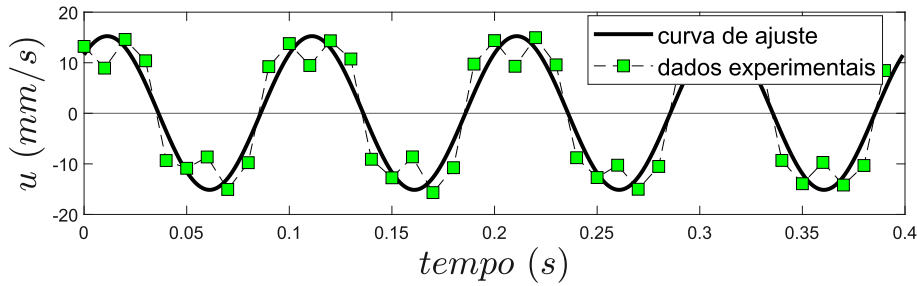


Figura 6.51: Variação da velocidade ao longo do tempo

Os resultados obtidos com o cinamato de etila e álcool apresentaram melhora significativa dos campos de velocidade em relação aos demais fluidos. Essa combinação de técnicas não é usual para medições com PIV. Além disso, o ajuste do índice de refração de resinas de impressão 3D com cinamato de etila e álcool ainda não foi reportado na literatura e teve de ser desenvolvido no âmbito deste trabalho. Isso demandou tempo e reduziu o escopo de varredura de casos e análise dos resultados. Ainda assim, acredita-se que as contribuições obtidas são muito úteis para desenvolvimentos futuros do grupo de pesquisa.

Conclusão e trabalhos futuros

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a caracterização experimental de uma bomba piezoelétrica equipada com diferentes válvulas sem partes móveis, com foco na análise do escoamento por meio da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Bombas piezoelétricas desse tipo são especialmente promissoras para aplicações em sistemas microfluídicos, devido à sua estrutura compacta, ausência de partes móveis e potencial de miniaturização.

A bomba e os conjuntos de válvulas foram modelados em SolidWorks e fabricados por impressão 3D em resina transparente. Para viabilizar a aplicação da técnica PIV, as superfícies das peças passaram por um processo de polimento, garantindo um acabamento óptico adequado à visualização do interior do canal.

Foram testadas diferentes geometrias de válvulas: do tipo T45-R 2 canais, tipo T45-R 4 canais e bocal/difusor. O objetivo foi comparar o desempenho hidráulico dessas geometrias em dois regimes distintos de operação: pulsátil e contínuo.

Nos testes em regime pulsátil, observou-se que a frequência de operação de 10 Hz resultou na maior vazão para todas as válvulas, sendo que a válvula do tipo Tesla T45-R 2 canais apresentou o melhor desempenho hidráulico, com uma vazão de 0.0139 mL/min . Já no regime contínuo, verificou-se que a válvula do tipo bocal/difusor teve o maior desempenho com uma vazão de 6.5 mL/min . Além disso, a diodicidade foi avaliada no regime contínuo para um número de Reynolds próximo de 100. Nessa condição, as válvulas T45-R2 e o elemento bocal/difusor apresentaram diodicidades em torno de 1.17, enquanto a válvula T45-R4 registrou um valor inferior, próximo de 1.11.

As medições dos campos de velocidade foram inicialmente realizadas com água, partículas fluorescentes de rodamina e iluminação LED. No entanto, a baixa intensidade da fonte de luz e a sedimentação das partículas comprometeram os resultados para ambas as geometrias de válvula.

Diante dessas limitações, adotou-se uma nova abordagem: o uso de um laser como fonte de iluminação, partículas fluorescentes e a substituição da água por fluidos com índice de refração mais próximo ao da resina das peças. Foram testados o óleo de peroba e o cinamato de etila. O óleo de peroba apresentou desempenho superior ao da água, mas ainda com regiões com pouca iluminação e distorções óticas. Já o cinamato de etila proporcionou imagens de alta qualidade, com campos de velocidade bem definidos e livre de distorções

visuais, cumprindo plenamente os objetivos propostos para o uso da técnica PIV.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Testar a Diodicidade das bombas piezoelétricas para números de Reynolds mais altos.
- Testar novas configurações e acoplamentos de válvulas buscando incrementar a Diodicidade.
- Empregar técnicas de otimização topológica para encontrar válvulas mais eficientes.
- Explorar novas técnicas de fabricação das bombas piezoelétricas com maior resolução espacial.

Referências bibliográficas

- 1 LI, H. et al. A review of recent studies on piezoelectric pumps and their applications. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 151, p. 107393, 2021. ISSN 0888-3270. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327020307792>.
- 2 QIAN, J.-y. et al. A numerical investigation of the flow of nanofluids through a micro tesla valve. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, v. 20, 11 2018.
- 3 HU, P. t al. Numerical investigation of Tesla valves with a variable angle. **Physics of Fluids**, v. 34, n. 3, p. 033603, 03 2022. ISSN 1070-6631. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0084194>.
- 4 WHITE, F. **Mecânica dos Fluidos**. [S.l.]: AMGH, 2011. 880 p. Capa comum, ISBN-10: 8563308211. ISBN 9788563308214.
- 5 VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. [S.l.]: Editora Blucher, 2021. ISBN 9788521211518.
- 6 ABRANTES, J. K.; PAULA, I. B.; AZEVEDO, L. F. Medição de escoamentos turbulentos utilizando velocimetria por imagem de partículas. In: CARMO, A.; MENEGHINI, A.; VOLPE, E. (Ed.). **Turbulência**. São Paulo: ABCM USP, 2012. v. 8, p. 133–209.
- 7 MIKKELSEN, A. **Experimental Studies of Flow- and Electric Properties of Oil Droplets Including Suspended Clay Particles**. Tese (Doutorado) — Norwegian University of Science and Technology, 06 2012.
- 8 LIU, G. et al. A disposable piezoelectric micropump with high performance for closed-loop insulin therapy system. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 163, n. 1, p. 291–296, 2010. ISSN 0924-4247. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424710003080>.
- 9 ZHANG, T.; WANG, Q.-M. Valveless piezoelectric micropump for fuel delivery in direct methanol fuel cell (dmfc) devices. **Journal of Power Sources**, v. 140, n. 1, p. 72–80, 2005. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775304008201>.
- 10 MA, H.-K. et al. Development of an oapcp-micropump liquid cooling system in a laptop. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 36, n. 3, p. 225–232, 2009. ISSN 0735-1933. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193308002546>.
- 11 HU, R. et al. Recent studies on the application of piezoelectric pump in different fields. **Microsystem Technologies**, v. 29, n. 5, p. 663–682, 2023. ISSN 1432-1858.

- 12 HUANG, J. et al. A heat exchanger based on the piezoelectric pump for cpu cooling. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 342, p. 113620, 2022. ISSN 0924-4247. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424722002588>.
- 13 MOHAMMADZADEH, K. et al. Numerical Investigation on the Effect of the Size and Number of Stages on the Tesla Microvalve Efficiency. **Journal of Mechanics**, v. 29, n. 3, p. 527–534, 05 2013. ISSN 1811-8216. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/jmech.2013.29>.
- 14 SHEEN, H. J. et al. Unsteady flow behaviors in an obstacle-type valveless micropump by micro-piv. **Microfluidics and Nanofluidics**, v. 4, n. 4, p. 331–342, Apr 2008. ISSN 1613-4990. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10404-007-0189-9>.
- 15 SAFFAR, Y. et al. Determination of the near wall flow of a multi-stage tesla diode using piv and ptv. **14th International Symposium on Particle Image Velocimetry**, v. 1, 08 2021.
- 16 STEMME, E.; STEMME, G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 39, n. 2, p. 159–167, 1993. ISSN 0924-4247. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092442479380213Z>.
- 17 FORSTER, F. K. et al. Design, fabrication and testing of fixed-valve micropumps. In: **Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. [s.n.], 1995. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55676026>.
- 18 OLSSON, A. et al. Micromachined flat-walled valveless diffuser pumps. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 6, n. 2, p. 161–166, 1997.
- 19 OLSSON, A. et al. Numerical and experimental studies of flat-walled diffuser elements for valve-less micropumps. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 84, n. 1, p. 165–175, 2000. ISSN 0924-4247. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424799003209>.
- 20 FORSTER, F.; WILLIAMS, B. Parametric design of fixed-geometry microvalves: The tesser valve. In: **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 7.
- 21 SUN, C.-I.; YANG, Z. H. Effects of the half angle on the flow rectification of a microdiffuser. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 17, n. 10, p. 2031, sep 2007. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/17/10/015>.
- 22 YUAN, S.-q. et al. Design and experimental study of a novel three-way diffuser/nozzle elements employed in valveless piezoelectric micropumps. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 1, p. 221–230, Jan 2015. ISSN 1806-3691. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0176-5>.

- 23 SINGH, S. et al. Analytical modeling, simulations and experimental studies of a pzt actuated planar valveless pdms micropump. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 225, p. 81–94, 2015. ISSN 0924-4247. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424715000692>.
- 24 DERA KHSHAN, S. et al. Performance improvement and two-phase flow study of a piezoelectric micropump with tesla nozzle-diffuser microvalves. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, v. 12, n. 2, p. 341–350, 2019. ISSN 1735-3572. Disponível em: https://www.jafmonline.net/article_754.html.
- 25 LIN, S. et al. Topology optimization of fixed-geometry fluid diodes. **Journal of Mechanical Design**, v. 137, n. 8, p. 081402, 08 2015. ISSN 1050-0472. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4030297>.
- 26 GOLI, S. et al. Anisotropic flow physics in diamond microchannels: Design implications for microfluidic rectifiers handling newtonian fluids. **Physics of Fluids**, v. 36, n. 2, p. 022027, fev. 2024. ISSN 1070-6631. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0191528>.
- 27 FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications**. [S.l.]: Springer New York, 2010. ISBN 9781441964663.
- 28 PHROZEN. **Phrozen Sonic Mighty 8K Resin 3D Printer**. 2025. Acessado em: 14 de janeiro de 2025. Disponível em: <https://phrozen3d.com/products/sonic-mighty-8k>.
- 29 AVALIAÇÃO de dados de medição: Guia para a expressão da incerteza de medição – GUM 2008. 1ª edição brasileira da 1ª edição do bipm de 2008. ed. Duque de Caxias, RJ: INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2012. Tradução autorizada da publicação "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement", BIPM 2008 (JCGM 100:2008). ISBN 978-85-86920-13-4. Disponível em: <https://www.inmetro.gov.br/>.
- 30 AZEVEDO, L. F. A.; ALMEIDA, J. A. Velocimetria por imagem de partículas. In: **III Escola de Primavera Transição & Turbulência**. [S.l.]: ABCM, 2002. p. 191–214.

A

Análise de Incerteza

A vazão mássica é calculada conforme a equação (A-1):

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t} \quad (\text{A-1})$$

A propagação de incerteza para vazão mássica pode ser determinada pela equação (A-2):

$$u_{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_A} u_{m_A}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial m_B} u_{m_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial (\Delta t_A)} u_{t_A}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial (\Delta t_B)} u_{t_B}\right)^2} \quad (\text{A-2})$$

Os coeficientes de sensibilidade ficam conforme as equações (A-3) e (A-4):

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial m} = \frac{1}{\Delta t} \quad (\text{A-3})$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial (\Delta t)} = \frac{-m}{(\Delta t)^2} \quad (\text{A-4})$$

A incerteza tipo A é dada pela equação (A-5):

$$u_A = \pm \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (\text{A-5})$$

onde s é o desvio padrão da amostra e N é o número de medições.

Já incerteza tipo B é dada pela equação (A-6):

$$u_B = \pm \frac{r}{\sqrt{12}} \quad (\text{A-6})$$

onde r é a resolução do instrumento.

Substituindo as equações (A-3) e (A-4) na equação (A-2), obtém-se a incerteza padrão conforme a equação (A-7):

$$u_{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta t} u_{m_A}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta t} u_{m_B}\right)^2 + \left(\frac{m}{\Delta t^2} u_{t_A}\right)^2 + \left(\frac{m}{\Delta t^2} u_{t_B}\right)^2} \quad (\text{A-7})$$

já a incerteza padrão relativa é calculada pela equação (A-8):

$$\frac{u_{\dot{m}}}{\dot{m}} = \sqrt{\left(\frac{1}{m} u_{m_A}\right)^2 + \left(\frac{1}{m} u_{m_B}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta t} u_{t_A}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta t} u_{t_B}\right)^2} \quad (\text{A-8})$$

Por fim, o grau de liberdade efetivo pode ser determinado pela equação (A-9)

$$G.L_{\text{efetivo}} = \frac{u_{\dot{m}}^4}{\left(\frac{\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta t} u_{m_A}\right)^4}{G.L_m}\right)} \quad (\text{A-9})$$

Logo, a incerteza expandida para um fator de abrangência $p = 95\%$ é dado pela equação (A-10):

$$u_{exp} = k(p = 95\%) \cdot \frac{u_{\dot{m}}}{\dot{m}} \quad (\text{A-10})$$

Conforme a equação (A-10) para conversão da vazão mássica em vazão volumétrica, a densidade volumétrica da água é uma propriedade física tabelada e será considerado constante para uma temperatura ambiente ($T = 20^\circ\text{C}$) igual a $\rho = 0.998 \text{ g/cm}^3$, então, a incerteza da vazão volumétrica (A-11):

$$u_Q = u_{\dot{m}} \quad (\text{A-11})$$