

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME AUGUSTO DALRI



**SENSOR CALORIMÉTRICO DE VAZÃO PARA SISTEMAS
MICROFLUÍDICOS**

CURITIBA
2016

GUILHERME AUGUSTO DALRI

**SENSOR CALORIMÉTRICO DE VAZÃO PARA SISTEMAS
MICROFLUÍDICOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cyro Ketzer Saul.

Curitiba

2016

Dalri, Guilherme Augusto

Sensor calorimétrico de vazão para sistemas microfluídicos /
Guilherme Augusto Dalri. – Curitiba, 2016.

93 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor
de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência
dos Materiais - PIPE.

Orientador: Cyro Ketzer Saul

Bibliografia: 83-87

1. Detectores infravermelhos. 2. Flúidos. 3. Usinagem laser.
I. Saul, Cyro Ketzer. II. Título.

CDD 536.2




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE
Setor de Tecnologia

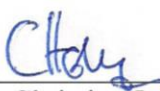
RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos dezoito dias do mês de março de 2016, no auditório do CEHPAR - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. de Oliveira, coordenadora do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a trecentésima décima sexta defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Prof. Dr. Cyro Ketzer Saul (UFPR), Christian Johann Losso Hermes (UFPR), Adriana Freire Lubambo (INCT/Fio Cruz). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **GUILHERME AUGUSTO DALRI** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**SENSOR CALORIMÉTRICO DE VAZÃO PARA SISTEMAS MICROFLUÍDICOS.**” Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVADO da candidata, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).


Curitiba, 18 de março de 2016.



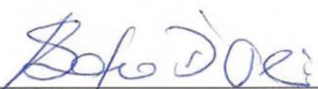
Prof. Dr. Cyro Ketzer Saul
Orientador



Prof. Dr. Christian Johann Losso Hermes
Examinador



Prof.ª Dr.ª Adriana Freire Lubambo
Examinador



Prof.ª Dr.ª Ana Sofia C. M. de Oliveira
Coordenadora do PIPE

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sensor térmico de vazão do tipo calorimétrico, aplicável a sistemas microfluídicos e construído com materiais de baixo custo, tais como acrílico, isopor e fita dupla face. O dispositivo consiste em um elemento aquecedor e dois termopares, posicionados antes e depois do aquecedor. Os materiais foram processados com fresa a laser de CO₂ de 40 W de potência e pelo plotter de recorte. A construção do dispositivo teve foco na redução das perdas térmicas, melhorando, assim, a sensibilidade térmica. Isto foi feito por meio do uso de poliestireno expandido (isopor) e da inclusão de cavidades vazias na estrutura, para reduzir os efeitos da condução de calor, que são algumas ordens de grandeza maiores do que os efeitos da convecção de calor. A aquisição de dados foi realizada utilizando termopares ligados a amplificadores para termopar, estes ligados a um conversor analógico-digital (AD) com resolução de 16 bits que, por sua vez, foi conectado à plataforma Arduino Due. O controle de potência no aquecedor também foi realizado através da plataforma Arduino Due e a alimentação foi feita por uma fonte de computador para garantir estabilidade de tensão. A resolução de temperatura obtida é de 0,005 °C/bit e o nível de ruído inferior a 0,05 °C. O dispositivo caracterizado é capaz de realizar medidas de vazão em duas faixas, sendo a primeira de 0,2 a 3,0 µl/min e a segunda na faixa de 10 a 100 µl/min.

Palavras-chave: sensor calorimétrico de vazão, microfluídica, usinagem laser

ABSTRACT

This work presents the development of a thermal flow sensor of the type calorimetric, applicable to microfluidic systems, that it was constructed using low cost materials like Plexiglas, Styrofoam and polymeric double side adhesive tapes. The device consists of a resistive heater and two thermocouples positioned in both inlet and outlet. All the materials were machined with a 40 W CO₂ laser and a cutting plotter. The device constructive structure was conceived focusing on the materials performance in a way to reduce thermal losses, therefore improving thermal sensitivity. This was done by using expanded polystyrene (Styrofoam) and including air voids in the structure to reduce the effects of thermal conduction, which are a few orders of magnitude higher than convective heat conduction effects. Data acquisition was performed using thermocouples, connected to thermocouple amplifiers, then to a 16 bit resolution multiplexed Analog to Digital Converter (ADC) and finally to an Arduino Due platform. The heater power control was also performed with the Arduino platform using a Personal Computer power source to guarantee a stable voltage source. The temperature resolution obtained with this system was 0.005 °C/bit and the final noise level was below 0.05 °C. The device is able to detect flow rates in two different ranges, the first from 0.2 to 3.0 µl/min and the second from 10 to 100 µl/min.

Keywords: calorimetric flow sensor, microfluidics, laser machining

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Técnica piezoresistiva (a) e técnica capacitiva (b e c) (NGUYEN, 2002).	15
Figura 2: Exemplos de configurações de dispositivos que utilizam a transferência de força como técnica, em destaque os elementos medidores de tensão (<i>Strain gauge</i>) (BEEBY <i>et al.</i> , 2004).	16
Figura 3: Montagens de sensores a partir de princípios óticos (BEEBY <i>et al.</i> , 2004).	16
Figura 4: Técnicas utilizadas nos sensores térmicos (a) <i>hot-wire</i> ou <i>hot-film</i> , (b) calorimétrica e (c) <i>Time of Flight</i> (BEEBY <i>et al.</i> , 2004).	17
Figura 5: Forças de superfície atuando sobre uma partícula fluida.	24
Figura 6: Elemento de fluido entre placas paralelas submetido a uma tensão de cisalhamento.	25
Figura 7: Exemplo de chapa de poliestireno expandido, fabricado por processo de extrusão.	31
FIGURA 8: a) Adesivo transferível para laminação com regiões vazadas para isolamento, b) aplicação do adesivo sobre o filme de polipropileno, e em c) aplicação do filme junto com a próxima camada de adesivo para selamento da região vazada.	31
Figura 9: Fita de adesivo tranferível para laminação da 3M modelo YR-9767.	32
Figura 10: Película de polipropileno da marca BOLLORÉ.	32
Figura 11: Detalhe do forjamento da resistência.	33
Figura 12: Detalhe do contato elétrico entre a resistência e o fio de cobre achatado; abaixo escala de uma régua de metal com precisão de 1/2mm.	34
Figura 13: Detalhe da solda traseira feita com auxílio de microscópio óptico.	35
Figura 14: Montagem da fonte de tensão e suportes adaptados de avanço micrométrico nos 3 eixos para a solda traseira do termopar.	35
Figura 15: Termopar tipo K com fio de 13 μm de diâmetro da marca OMEGA.	36
Figura16: Detalhe da junção dos fios de 170 μm e 13 μm de diâmetro.	36
Figura 17: Fresadora a laser de CO ₂ Laser Solution 100, da Gravograph®. ...	37
Figura 18: Detalhe do corte das peças em acrílico, a) desenho da peça e b) peça em acrílico conforme o desenho.	38

Figura 19: Detalhe da peça de poliestireno cortada pela fresadora.	38
Figura 20: Sequência de corte do filme de polipropileno, a) base de corte com o filme fixado e esticado, b) etapa corte dos furos e c) corte dos contornos.	39
Figura 21: Plotter de recorte do Silhouette PORTRAIT da marca Silhouette. ...	39
Figura 22: Detalhe da orientação dos movimentos do cabeçote (direção x) e da base de corte (direção y).	40
Figura 23: Detalhe do resultado do corte da camada de adesivo pelo plotter de recorte.	40
Figura 24: Base para montagem.	41
Figura 25: Sequência de colagem camada com canal, a) camada de adesivo exposto com o termopar posicionado, b) alinhamento da outra camada de adesivo e c) aplicação de pressão.	41
Figura 26: Sequência de colagem do filme de polipropileno, a) alinhamento da peça de acrílico com o filme de polipropileno e b) o filme já aplicado sobre a camada de adesivo.	42
Figura 27: Sequência de preparação do escalpe para ser colado ao acesso da camada superior de acrílico, a) o escalpe, b) corte da agulha e c) colagem da mangueira no acesso.	43
Figura 28: Diagrama da organização do sistema de controle e aquisição de dados.	43
Figura 29: CI AD595AQ na placa para conexão com o termopar e com os cabos de alimentação e de sinal do CI.	44
Figura 30: Ligação da placa Arduino DUE com a placa ADC.	45
Figura 31: Circuito transistorizado para alimentação do circuito base, R1 é uma resistência ôhmica, R2 é a resistência de aquecimento.	46
Figura 32: Esquema elétrico do aquecedor, R1 é uma resistência ôhmica, R2 é a resistência de aquecimento.	47
Figura 33: IDE Arduino versão 1.6.5 disponível em www.arduino.cc , em detalhe na caixa de programação a estrutura principal do programa.	48
Figura 34: Trecho do programa que controla e realiza a leitura das variáveis.	49
Figura 35: Camadas de materiais estruturantes do modelo 1, da camada superior à camada inferior.	50

Figura 36: Esquema de posicionamento das camadas e os outros componentes do modelo 1.....	50
Figura 37: Dimensões dos detalhes das camadas do modelo 1.	51
Figura 38: Camadas de materiais estruturantes do modelo 2, da camada superior à camada inferior.....	52
Figura 39: Detalhe da dimensão do reservatório de aquecimento e o posicionamento da resistência no mesmo.	52
Figura 40: Camadas de materiais estruturantes do modelo 3, da camada superior à camada inferior.....	53
Figura 41: a) Detalhe do lado superior, b) detalhe do lado inferior e c) detalhe do posicionamento do termopar na montagem do dispositivo.	54
Figura 42: Camadas de materiais estruturantes do modelo 4, da camada superior à camada inferior.....	55
Figura 43: a) Detalhe da posição do termopar na saída do reservatório e b) detalhe da estrutura microfluídica “suspensa”.....	55
Figura 44: Detalhe do modelo 5, com o elemento aquecedor orientado na direção do canal e termopares posicionados simetricamente ao aquecedor.....	56
Figura 45: Nova disposição das camadas constituintes do dispositivo fora de escala. A entrada e a saída do microcanal estão niveladas.....	57
Figura 46: Camadas de materiais estruturantes do modelo 5, da camada superior à camada inferior.....	58
Figura 47: a) Motagem experimental para o teste de vazão por infusão e b) detalhe da conexão seringa-dispositivo.	59
Figura 48: Montagem experimental para os testes de infusão.....	60
Figura 49: Esquema simplificado do Volume de controle.....	61
Figura 50: Curva da tensão U pela temperatura, para calibração do CI AD595AQ.	65
Figura 51: Gráfico do teste transiente para vazão de 60 $\mu\text{l}/\text{min}$, onde T_s são os dados para temperatura registrada na saída, T_e são os dados para temperatura registrada na entrada e T_m são os dados para temperatura registrada no reservatório.	67
Figura 52: Gráfico do teste transiente para vazão de 120 $\mu\text{l}/\text{min}$, onde T_s são os dados para temperatura registrada na saída, T_e são os dados para temperatura	

registrada na entrada e T_m são os dados para temperatura registrada no reservatório.	67
Figura 53: Gráfico do teste em regime permanente para vazão de 30 $\mu\text{l}/\text{min}$, onde T_e são os dados para temperatura na entrada e T_s são os dados para temperatura na saída do reservatório.	68
Figura 54: Ampliação do gráfico da Figura 53.....	69
Figura 55: Gráfico para testes com vazão de 30 $\mu\text{l}/\text{min}$, para o modelo 4.	70
Figura 56: Gráficos da temperatura na saída do reservatório e da potência do aquecedor.	70
Figura 57: Gráfico da variação de temperatura para vazão de 7,2 $\mu\text{l}/\text{min}$ em função do tempo e da potência no aquecedor em função do tempo.	72
Figura 58: Curvas da variação de temperatura para testes realizados com a seringa de 50 μl , nas vazões indicadas na legenda, em $\mu\text{l}/\text{min}$	73
Figura 59: Curva das médias dos ΔT para cada vazão, utilizando a seringa de 50 μl	74
Figura 60: Gráfico da variação da temperatura em função da vazão para a faixa de 0,2 a 3,0 $\mu\text{l}/\text{min}$ e ajuste linear dos dados.	75
Figura 61: Gráfico da vazão calculada pela vazão proveniente da bomba de infusão.....	76
Figura 62: Curvas da variação de temperatura para as vazões indicadas na legenda, em $\mu\text{l}/\text{min}$. Valores obtidos para teste realizado com a seringa de 500 μl	77
Figura 63: Gráfico da média da variação de temperatura para os testes realizados com a seringa de 500 μl	78
Figura 64: Gráfico do início de um comportamento exponencial para a dependência da variação de temperatura em função da vazão.	79
Figura 65: Curva característica do sensor de vazão.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sensores térmicos de vazão comerciais para líquidos.....	14
Tabela 2: Dimensões dos resistores forjados.....	34
Tabela 3: Números de Reynolds e Péclét	62
Tabela 4: Coeficientes gerados pelo ajuste linear obtido pelo software Origin.	66
Tabela 5: Coeficientes da reta ajustada aos valores do gráfico na Figura 63. .	75

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. SENSORES DE VAZÃO	13
1.2. SENSORES NÃO TÉRMICOS	14
1.3. SENSORES TÉRMICOS	16
1.3.1. <i>HOT-WIRE OU HOT-FILM</i>	17
1.3.2. <i>TIME OF FLIGHT</i>	18
1.3.3. <i>CALORIMÉTRICOS</i>	18
1.4. OBJETIVOS	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS	22
2.1.1. <i>HIPÓTESE DO CONTINUO</i>	22
2.1.2. <i>EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES</i>	26
2.1.3. <i>MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR</i>	28
3. DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO	30
3.1. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1.1. <i>ESCOLHA DE MATERIAIS</i>	30
3.1.2. <i>TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO</i>	37
3.1.3. <i>CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS</i>	43
3.2. EVOLUÇÃO DO DESIGN	49
3.2.1. <i>MODELO 1</i>	49
3.2.2. <i>MODELO 2</i>	51
3.2.3. <i>MODELO 3</i>	53
3.2.4. <i>MODELO 4</i>	54
3.2.5. <i>MODELO 5</i>	56
3.3. MONTAGEM EXPERIMENTAL	58
3.4. MODELAMENTO A UM VOLUME DE CONTROLE	60
3.4.1. <i>CONSERVAÇÃO DE MASSA</i>	60
3.4.2. <i>CONSERVAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO</i>	61
3.4.3. <i>CONSERVAÇÃO DE ENERGIA PARA UM VOLUME DE CONTROLE</i>	62
4. CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO	65
4.1. CALIBRAÇÃO DO AD595AQ	65
4.2. TESTE DE VAZÃO POR INFUSÃO	66
4.2.1. <i>RESULTADOS REFERENTES AO MODELO 3</i>	66
4.2.2. <i>RESULTADOS REFERENTES AO MODELO 4</i>	68
4.2.3. <i>RESULTADOS REFERENTES AO MODELO 5</i>	71

5. CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICES.....	88

1. INTRODUÇÃO

Dispositivos microfluídicos se caracterizam pelas pequenas dimensões de seus sistemas e pelos reduzidos volumes de fluidos que são envolvidos. Seus sistemas são compostos por canais micrométricos que podem variar de unidades a centenas de micrômetros. Esses sistemas apresentam uma grande variedade de aplicações e podem ser fabricados com diversos materiais, como polímeros, metais, vidros, cerâmicas e cristais (silício) (MADOU, 2002; ABGRALL *et al.*, 2007). A Microfluídica é uma área multidisciplinar de pesquisa e tecnologia que estuda o comportamento, controle e manipulação de pequenos volumes de fluidos em sistemas com estruturas de dimensões reduzidas na qual os dispositivos microfluídicos são de interesse.

Os sistemas microfluídicos podem operar de forma isolada ou integrada. A integração de várias funções em um único dispositivo é conhecida como μ -TAS (microsistemas de análise total) ou *Lab On a Chip* (LOC) (laboratório em um chip) (REYES *et al.*, 2002; ABGRALL *et al.*, 2007).

A fabricação de sistemas microfluídicos foi baseada em técnicas e tecnologias oriundas da microeletrônica, que provêm de sistemas micro-eletromecânicos (MEMS). Mas estas técnicas requerem o uso de silício que, em particular, é caro e, desta forma, ficam restritas a centros de pesquisa de tecnologia de ponta e a grandes laboratórios (FILHO, 2010; COLTRO *et al.*, 2007; FONSECA, 2008).

Nas últimas três décadas, a microfluídica vem se destacando com um grande crescimento. Primeiramente isto ocorreu em áreas como análises químicas, biotecnologia e processos químicos. Hoje em dia, uns dos seus principais destaques são os dispositivos desenvolvidos a partir de materiais que dispensam o uso de procedimentos baseados em MEMS, e, desta forma, barateiam os processos envolvidos (WHITESIDES, 2006; COLTRO *et al.*, 2007; DORNELAS, 2013). Neste contexto, a versatilidade dos sistemas microfluídicos torna a microfluídica mais acessível e área de pesquisa estimulante, pela possibilidade de utilizar materiais alternativos para confecção dos sistemas. A escolha destes materiais deve levar em conta várias características: custo, propriedades térmicas e elétricas, facilidade de fabricação e integração a outros

dispositivos. Não apenas essas características devem ser consideradas, mas também as técnicas de processamento de tais materiais (KOVARIK *et al.*, 2012).

Os dispositivos microfluídicos desenvolvidos por materiais alternativos de baixo custo despertam bastante interesse em aplicações associadas à saúde pública por serem economicamente viáveis, serem portáteis, isto é, não necessitam ficar restritos ao ambiente do laboratório, e por apresentarem uma diminuição no tempo envolvido nos processos de diagnóstico (JANASEK *et al.*, 2006; DE MELLO, 2006; DITTRICH *et al.*, 2006; YAGER *et al.*, 2006).

Um desafio para microfluídica foi a miniaturização de dispositivos macros, tais como, canais, válvulas, bombas, misturadores, sensores de vazão, entre outros. A solução aconteceu de forma natural com a incorporação da tecnologia proveniente da microeletrônica e dos MEMS, mas quando se trata de utilizar materiais não convencionais, ainda para alguns dispositivos, por exemplo, os sensores de vazão, a tecnologia não está consolidada.

Outro desafio é a necessidade da determinação da vazão, de forma a permitir o controle da quantidade de amostra que está sendo ou que será processada nos dispositivos microfluídicos bem como estimar a duração do processo (BEEBY *et al.*, 2004). Os dispositivos que realizam esta função são conhecidos como sensores de vazão.

1.1. SENSORES DE VAZÃO

Sensores de vazão são empregados quando é necessário determinar a quantidade de fluido que escoar, por exemplo, em um canal ou microcanal. O que geralmente é medido é a vazão volumétrica ou a vazão mássica (volume por unidade de tempo ou massa por unidade de tempo, respectivamente) (BEEBY *et al.*, 2004; NGUYEN, 2002).

Os sensores de vazão funcionam de forma indireta, ou seja, utilizam outros princípios físicos que permitam a determinação da vazão, tais como, diferença de pressão, transferência de força, transferência de calor, princípios óticos entre outros (BEEBY *et al.*, 2004; NGUYEN, 2002).

No mercado estão presentes sensores de vazão com princípio de funcionamento térmico para líquidos, cujo custo de investimento mínimo é de 1800 dólares. Uma característica comum aos modelos comerciais é a sua

dificuldade de integração a chips microfluídicos. Na Tabela 1 estão listadas alguns modelos e marcas.

Tabela 1: Sensores térmicos de vazão comerciais para líquidos.

Marca/Modelo		Princípio	Faixa (µl/min)	Erro	Fluido
Mitos 3200xxx	096	Térmico	0,2 – 5,0	5%	H ₂ O
	097		30 – 1000		
	098		1 – 50		
	099		0,4 – 7		
	100	0,07 – 1,50	10%		
Sensirion SLx Series	25	Térmico	0,05 – 1,5		H ₂ O
	75		0,25 -7		
	430		1 - 40		
Eleveflow MFS	1	Térmico	0,07 - 1,5	10%	H ₂ O
	2		0,4 - 7	5%	
	3		2 - 80		
	4		40 - 1000		
	5		200 - 5000		
Bronkhorst LM	02	Térmico	0,025-1,25	2%	H ₂ O
	10		4 - 80	1%	
	20		33 - 1660	1%	

Os sensores de vazão podem ser classificados em sensores obstrutivos e não obstrutivos, ou seja, que não interferem na resistência hidráulica do sensor (importante quando o sistema opera a pressão constante). Os sensores não obstrutivos podem ser ainda classificados em invasivos e não invasivos. Os que funcionam, por exemplo, com princípios térmicos, elétricos, moleculares ou por partículas para detecção, são sensores invasivos (COLLINS, 2008). Para efeito de organização, qualifica-se esses sensores invasivos em não térmicos e térmicos (NGUYEN, 1997).

1.2. SENSORES NÃO TÉRMICOS

Os sensores não térmicos mais empregados na microfluídica são os mecânicos, que podem operar por transferência de força ou por diferença de pressão, e os óticos. Os que empregam diferença de pressão têm como princípio de funcionamento medir uma diferença de pressão para associá-la a uma respectiva vazão. Essa tomada da diferença de pressão pode ser feita de

diversas maneiras, cada técnica para um tipo de aplicação. Na microfluídica são utilizadas duas técnicas: a capacitiva e a piezoresistiva. Na capacitiva, é acoplado a uma membrana um capacitor variável; com o escoamento, há uma variação de pressão na membrana, que provoca uma variação na capacitância, devido ao aumento ou diminuição na espessura do dielétrico. Essa variação pode ser associada à vazão do fluido (Figuras 1b e 1c).

No caso piezoresistivo, um elemento piezoresistivo é associado à membrana (OOSTERBROEK *et al.*, 2003). Um aumento ou diminuição da pressão na membrana gera uma alteração na resistência elétrica do elemento, que pode ser associada à vazão do fluido (Figura 1a). Para aplicações em microfluídica é necessário o uso de um sensor de temperatura integrado para compensação dos efeitos térmicos (WEBSTER, 1999). A fabricação de um sensor de vazão por diferença de pressão, independente da técnica utilizada, é baseada em sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS) (WEBSTER, 1999; MADOU, 2002; KUO *et al.*, 2012).

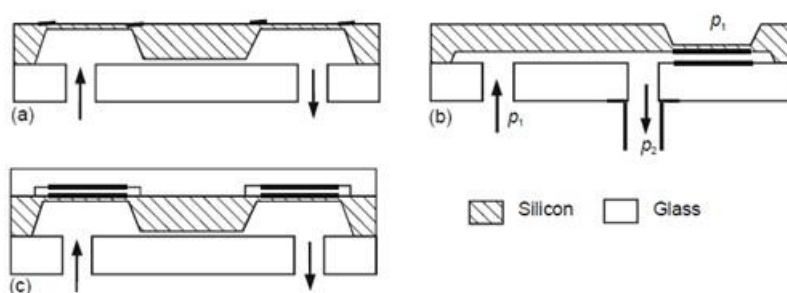


Figura 1: Técnica piezoresistiva (a) e técnica capacitiva (b e c) (NGUYEN, 2002).

Os sensores que medem a vazão através da transferência de força também são baseados em MEMS. A técnica utiliza hastes (*cantilevers*) ligadas a elementos piezoresistivos ou medidores de tensão mecânica; a deformação mecânica do *cantilever*, por exemplo, é proporcional a vazão. Uma desvantagem desse tipo de sensor é que ele pode ser afetado por particulados (BEEBY *et al.*, 2004). Na Figura 2 são apresentados esquemas de configurações de diferentes dispositivos que utilizam a técnica da transferência de força para medição de vazão.

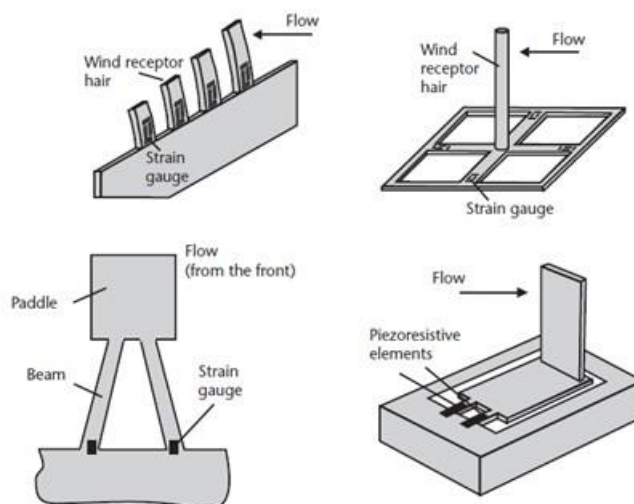


Figura 2: Exemplos de configurações de dispositivos que utilizam a transferência de força como técnica, em destaque os elementos medidores de tensão (*Strain gauge*) (BEEBY *et al.*, 2004).

Os sensores óticos de vazão são baseados em detecção ótica de partícula (técnica conhecida como PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*), interferometria ou detecção de fases no fluido (Figura 3). As informações detectadas (por exemplo, o deslocamento de partículas ou gotas de substâncias conhecidas com o escoamento do fluido) podem ser usadas para determinar a vazão. Os sensores são geralmente grandes, pois necessitam de fontes óticas para excitação e detectores que não são microscópicos, como um CCD (*charge-coupled device* ou dispositivo de carga acoplada) ou um microscópio, o que torna as medidas caras (BEEBY *et al.*, 2004).

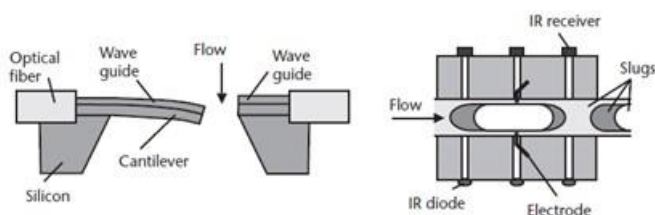


Figura 3: Montagens de sensores a partir de princípios óticos (BEEBY *et al.*, 2004).

1.3. SENSORES TÉRMICOS

Sensores térmicos têm como princípio de funcionamento a transferência de calor para o fluido e podem utilizar três técnicas diferentes: a baseada em anemômetro de fio quente (*hot-wire* ou *hot-film*) (Figura 4a), a calorimétrica (Figura 4b) e a por tempo de voo (*Time of Flight*) (Figura 4c). Pode-se encontrar

na literatura trabalhos que apresentam sensores que utilizam duas ou até as três técnicas integradas com finalidade de aumentar a faixa de leitura do sensor.

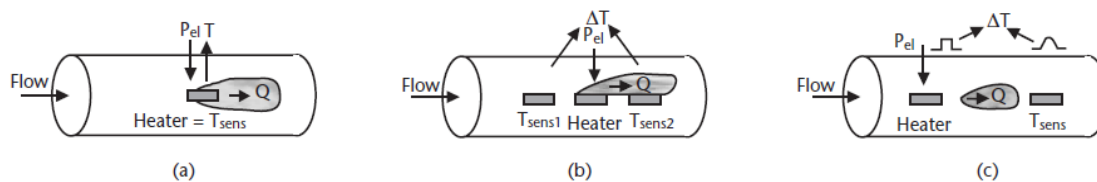


Figura 4: Técnicas utilizadas nos sensores térmicos (a) *hot-wire* ou *hot-film*, (b) calorimétrica e (c) *Time of Flight* (BEEBY *et al.*, 2004).

1.3.1. HOT-WIRE OU HOT-FILM

Os sensores baseados em *hot-wire* ou *hot-film* analisam eletricamente as propriedades do elemento aquecedor, que pode ser um fio ou um filme metálico. A principal característica do sensor anemométrico é o efeito de resfriamento no elemento aquecedor. Há duas maneiras para fazer essa análise: por potência constante e por temperatura constante (NGUYEN, 2002). Quando utilizada a potência constante, o aquecedor é analisado como um resistor com resistência variável, dependente da temperatura. O fluido, ao escoar pelo resistor, faz a temperatura do resistor diminuir por causa da transferência de calor; a diminuição da temperatura diminui a resistência elétrica, ocasionando uma variação da tensão aplicada no resistor, quando a corrente elétrica é mantida constante. O valor de tensão é associado à vazão.

No processo de temperatura constante, a potência é controlada no aquecedor para que a temperatura não mude e, por consequência, a resistência permaneça a mesma. Esse controle da potência necessita de um circuito mais complexo. A partir da medida da tensão, obtém-se o valor da vazão.

O primeiro trabalho citado sobre sensor de vazão microfluídico com princípio de funcionamento térmico, foi o trabalho realizado por Petersen, em 1985, o qual propôs a utilização de um elemento termoresistivo (*hot-film*) (NGUYEN, 1997). Na citação de Nguyen (1997) não foi relatada a faixa de operação do sensor desenvolvido por Petersen.

O dispositivo proposto por Lammerink *et al.* (1993) é baseado em silício e sua fabricação utiliza tecnologia MEMS. O elemento aquecedor e os sensores

de temperatura estão suspensos sobre uma malha constituída de nitrato de silício, o que resultou no aumento da sensibilidade do dispositivo.

Já o trabalho de Fung *et al.* (2005) utiliza como principal material estruturante dos canais o PMMA e a membrana de Parilene como substrato para deposição dos eletrodos; ele utilizou nanotubos de carbono como elemento aquecedor, testou com vazão de 50 a 150 $\mu\text{l}/\text{min}$ e utilizou ar como fluido.

1.3.2. TIME OF FLIGHT

Os sensores que utilizam a técnica *Time of Flight* (TOF) avaliam o tempo de passagem de um pulso de calor por uma distância conhecida (NGUYEN, 2002). Essa distância pode ser do aquecedor até o sensor de temperatura ou entre dois sensores de temperatura, como analisado por Tanaka *et al.* (2009). Neste último caso é o intervalo de tempo medido que permite determinar a vazão.

1.3.3. CALORIMÉTRICOS

Os sensores calorimétricos de vazão avaliam a variação de temperatura do fluido. Para isso é posicionado um sensor de temperatura antes e outro depois do aquecedor, dessa forma avalia-se qual foi o aumento de temperatura (NGUYEN, 2002). Essa variação na temperatura do fluido é dependente da vazão e a sua dependência varia com de acordo com a faixa de vazão como que é apresentado nos trabalhos de Dijkstra *et al.* (2008), Schöler *et al.* (2004) e Patsis *et al.* (2012). A configuração calorimétrica apresenta maior sensibilidade e torna as medidas mais confiáveis (BEEBY *et al.*, 2004; NGUYEN, 2002; MALUF *et al.*, 2004).

Os sensores calorimétricos de vazão apresentam três pontos importantes: o aquecedor, os sensores de temperatura e o isolamento térmico, que determinam a confiabilidade nas medidas de vazão. Os trabalhos presentes na literatura preferencialmente apresentam técnicas de fabricação baseadas em MEMS, por serem técnicas que garantem os três pontos.

O trabalho de Chung (2006) é um exemplo de sensor baseado em técnicas de fabricação presente em MEMS. Ele apresenta um sensor de vazão fabricado sobre substrato de silício contendo uma membrana de $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ que

serve de apoio para os sensores de temperatura e para o aquecedor, além de servir como isolamento térmico, já que em baixo dessa membrana fica uma região vazia. Esse sensor apresenta três pares de sensores de temperatura distribuídos de forma simétrica em relação ao elemento aquecedor; os três pares possibilitam maior faixa de vazão detectável.

Um exemplo de trabalho que utiliza dois ou mais princípios de funcionamento é o sensor apresentado por Tanaka *et al.* (2009). Eles desenvolveram um sensor de vazão para ser acoplado a reatores que lidam com fluidos corrosivos. O sensor é fabricado em um chip de vidro por processos de fabricação baseados em MEMS. O sensor utiliza duas técnicas para determinação da vazão: a calorimétrica e a *time of flight*, fazendo com que a faixa de detecção seja ampliada.

Outros trabalhos seguem a mesma linha do trabalho de Tanaka *et al.* (2009), como o trabalho de Ćerimović *et al.* (2009), que desenvolveu um sensor de vazão que pode ser operado por dois métodos: o calorimétrico e por tempo de voo. O dispositivo foi construído sobre substrato de silício, mas o diferencial deste sensor é conter três membranas para apoio e isolamento térmico do aquecedor e dos sensores de temperatura, já nos demais sensores é apenas uma membrana para todos os elementos.

Outras técnicas utilizadas para confecção de sensores térmicos de vazão são apresentadas nos trabalhos de Jun *et al.* (2001), Petropoulos & Kaltsas (2010), Kim & Kim (2006) e Koizumi (2013). Jun *et al.* (2001) desenvolveram um sensor térmico de vazão tanto para gás quanto para líquidos, construído sobre uma câmara com baixa pressão e com dimensões de 100µm de comprimento, 100µm de largura e 6µm de altura. O dispositivo é fabricado por processo CMOS (*Complementary Metal-oxide-semiconductor*). A grande vantagem da câmara é no isolamento térmico.

Petropoulos & Kaltsas (2010) avaliaram um dispositivo feito diretamente em uma placa de circuito impresso (PCB). O elemento aquecedor e os de sensoriamento são feitos por filmes finos de platina depositados diretamente sobre contatos de cobre. O material da placa de circuito impresso garante isolamento térmico. O sensor pode ser operado por duas técnicas: *hot-wire* e calorimétrica.

O sensor de vazão proposto por Kim & Kim (2006) utiliza como substrato uma lâmina de quartzo, na qual é depositado por processos *sputtering* o aquecedor e os sensores de temperatura, que são termopares do tipo K feitos por filme depositado. O microcanal é feito em PDMS que é colado ao substrato de quartzo por colagem a plasma.

O trabalho de Koizumi (2013) consistiu em desenvolver um sensor de vazão baseado na difusão de calor no aquecedor para um escoamento de Hagen–Poiseuille. O princípio de funcionamento é por tempo de voo. Esse sensor utiliza como sensor de temperatura um termopar, localizado no centro do tubo, e o aquecedor é feito com fio de níquel-cromo, de 120 μm de diâmetro, formando uma resistência helicoidal de comprimento 3mm e diâmetro externo de 540 μm , que é posicionada no centro de um tubo de 2 mm de diâmetro. Esse tubo é posicionado na vertical, com entrada de fluido na parte inferior, e o seu diâmetro foi aumentado na região entre o aquecedor e o termopar para garantir o escoamento de Hagen–Poiseuille.

Além desses exemplos de sensores de vazão, existem outros dispositivos microfluídicos que buscam o uso de materiais e técnicas alternativos, como o emprego de papel, polímeros e fitas adesivas na fabricação de substratos e microcanais (WHITESIDES, 2006; COLTRO *et al.*, 2007).

Um desses trabalhos com materiais e técnicas alternativos é o de Dornelas (2013), que utilizou papel na confecção de μPADs (*microfluidic paper-based devices*) e que podem ser empregados em dispositivos do tipo *point-of-care*, para diagnóstico médico. Já Koppaathy *et al.* (2014) propuseram um sensor que detecta variações de temperatura de alta precisão para avaliar reações endotérmicas e exotérmicas, como água com glicerol. Para isso confeccionaram um dispositivo contendo um único canal com duas entradas e uma saída, feito a partir de dois *slides* de vidro, base e tampa, e utilizando uma fita da Kapton® para a fabricação do canal e sua vedação. Os sensores de temperatura foram do tipo termopilhas, feitos por deposição de vapor, composta por antimônio (Sb) e bismuto (Bi), que tem coeficiente Seebeck de 7,14 mV/K.

1.4. OBJETIVOS

Apesar de já existirem sensores calorimétricos que utilizam materiais e técnicas alternativos, especialmente em relação aos baseados em MEMS, ainda há a necessidade de se desenvolver um sensor que alie um bom isolamento térmico, tendo em vista que, por empregar princípios calorimétricos o isolamento térmico se torna um parâmetro crítico, e um baixo custo de fabricação. Dessa maneira, a construção do sensor calorimétrico de vazão apresentada neste trabalho se propõe a: utilizar materiais ditos alternativos aos usados em sistemas desenvolvidos por tecnologia MEMS; miniaturizar, a partir de estudos destes materiais, o dispositivo de maneira a obter um bom isolamento térmico e desenvolver um sistema de controle e aquisição de dados empregando a plataforma aberta Arduino.

O objetivo geral deste trabalho então ficou definido como: desenvolver e caracterizar um sensor calorimétrico de vazão empregando materiais poliméricos de baixo custo e com bom isolamento térmico.

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar os materiais mais compatíveis com suas funções no dispositivo.
- Determinar os processos de fabricação necessários para a construção do dispositivo.
- Fabricar protótipos do dispositivo.
- Construir metodologia que possibilite a caracterização do dispositivo.
- Desenvolver um sistema de controle e aquisição de dados para o dispositivo usando a plataforma Arduino.
- Caracterizar o dispositivo na função de sensor calorimétrico de vazão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS

Nessa sessão serão apresentados, de forma breve, alguns conceitos e definições para o entendimento dos fenômenos envolvidos no desenvolvimento do sensor calorimétrico de vazão.

2.1.1. HIPÓTESE DO CONTÍNUO

A hipótese do contínuo para os fluidos é a base da Mecânica dos Fluidos clássica e conduz ao conceito de partícula de fluido. De modo comparativo com uma partícula pontual na mecânica clássica, uma partícula de fluido tem um tamanho infinitesimal. Esse tamanho infinitesimal é definido como sendo o limite no qual as propriedades do fluido variam muito pouco de ponto a ponto. Nos casos em que a escala é menor que esse limite, na escala molecular, o fluido sofre grandes variações em suas propriedades quando medidas, sendo que nessa escala a hipótese do contínuo não é válida (FOX, MCDONALD & PRICHARD, 2010).

Como consequência da hipótese do contínuo, cada propriedade do fluido como massa específica, velocidade, pressão, temperatura etc., assume um valor definido em cada ponto no espaço, e são consideradas funções contínuas da posição e do tempo.

2.1.1.1. Massa específica e densidade

A propriedade massa específica é definida como massa por unidade de volume, desta forma, a massa específica média dentro do volume V , é dada por $\rho = m/V$. Mas para determinar a massa específica num ponto arbitrário do fluido, devemos selecionar um pequeno volume, δV , em torno deste ponto e determinar a razão $\delta m/\delta V$. Tal volume deve ser pequeno o suficiente comparado ao volume V e suficientemente grande comparado às dimensões moleculares, onde o volume $\delta V'$ representa o menor volume em que a hipótese do contínuo é válida. Desta forma define-se a massa específica como:

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V'} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1)$$

A massa específica em um ponto arbitrário pode variar no tempo, portanto, a representação completa para massa específica é dada por

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (2)$$

Esta é a representação de campo massa específica e é um campo escalar dependendo apenas da sua magnitude.

Uma forma útil na qual a massa específica pode ser expressa é na forma adimensional, que é definida como sendo a razão entre a massa específica de um material, sólido ou líquido, pela massa específica máxima da água que é 1000 kg/m^3 a 4°C .

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} \quad (3)$$

2.1.1.2. Velocidade

A velocidade instantânea atribuída a uma partícula fluida em um ponto, num dado instante, segue também a noção de campo, o campo vetorial velocidade é dado por

$$\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t) \quad (4)$$

O vetor velocidade pode ser escrito em termo dos seus componentes ortogonais u , v , w nas respectivas direções \hat{i} , \hat{j} , \hat{k}

$$\vec{v} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (5)$$

Em geral, cada componente u , v e w será uma função de x , y , z e t .

2.1.1.3. Segunda Lei de Newton e pressão

As partículas fluidas estão sujeitas a forças de duas naturezas distintas, as forças de superfície (pressão, atrito), geradas por contato com outras partículas ou por contato com uma superfície, e as forças de campo (gravidade, elétrica e magnética).

Aplicando a segunda lei de Newton a partícula fluida, que estabelece que a soma de todas as forças aplicadas sobre a partícula é igual a variação da quantidade de movimento, a equação pode ser escrita como:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = f_{campo} + f_{superfície} \quad (6)$$

Onde D/Dt é uma derivada material ou substancial, ou seja, considera a variação temporal e a variação convectiva devido ao campo de velocidade, a derivada material é escrita como

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \quad (7)$$

A equação (7) fica

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = f_{campo} + f_{superfície} \quad (8)$$

Imagine uma partícula fluida em contato com outra e que através do contato é gerada uma força. Considere um elemento de área (δA_n), em qualquer ponto da superfície, cuja orientação é dada pelo vetor unitário (\hat{n}), normal a superfície, e que aponta para fora (Figura 5).

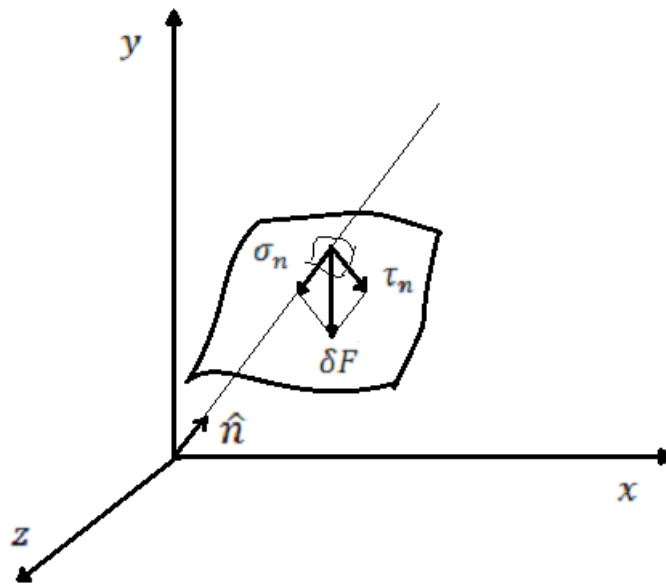


Figura 5: Forças de superfície atuando sobre uma partícula fluida.

A força ($\delta \vec{F}$) atuante sobre ($\delta \vec{A}_n$), pode ser decomposta em duas componentes, uma na direção normal, denominada tensão normal (σ_n), e outra na direção tangente à área, denominada tensão de cisalhamento (τ_n) resultado das forças de superfície, (figura 5). A tensão normal fica definida como

$$\sigma_n = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}}{\delta \vec{A}_n}. \quad (6)$$

O termo “pressão” será usado para denotar a tensão normal, ficando assim definido,

$$p = -\sigma_n. \quad (7)$$

Alguns padrões de pressões são estabelecidos, dependendo de algumas situações. Para pressão atmosférica é definido que a pressão equivalente a uma atmosfera padrão (*atm*) é a pressão produzida por uma coluna vertical de mercúrio com exatamente 76 cm de altura, de massa específica $13,5951\text{ gcm}^{-3}$, em um ponto onde a aceleração da gravidade tenha seu valor padrão de $980,665\text{ cms}^{-2}$. A pressão manométrica é a pressão atmosférica em outras condições fora das condições padrão, por exemplo, por efeito de altitude. E a chamada pressão absoluta é a soma da pressão manométrica mais a pressão atmosférica.

2.1.1.4. Viscosidade

Para um fluido a tensão de cisalhamento aparece devido ao escoamento viscoso. Se não houver escoamentos, situação no qual o fluido se encontra em repouso não existe tensões de cisalhamento (FOX, MCDONALD & PRICHARD, 2010). Para o melhor entendimento, considere um fluido entre duas placas paralelas móveis (Figura 6).

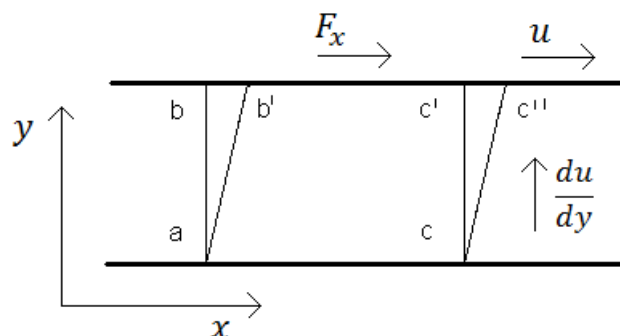


Figura 6: Elemento de fluido entre placas paralelas submetido a uma tensão de cisalhamento.

A placa superior se desloca com velocidade constante u e sob força constante F_x . O elemento de fluido quando submetido à tensão de cisalhamento τ_{yx} , experimenta uma taxa de cisalhamento dada por du/dy , que define o perfil de velocidade ao longo da direção \hat{y} . Deste modo, a lei de Newton da viscosidade para o escoamento é dada por

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (8)$$

A constante μ é a viscosidade absoluta (ou dinâmica). A viscosidade é função da temperatura do fluido.

2.1.2. EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES

As equações que regem a mecânica dos fluidos provêm de leis de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia, e, em seus formalismos, levam as hipóteses e conceitos apresentados anteriormente. A conservação de massa pode ser entendida pela seguinte relação

$$\rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = d\dot{m}$$

Onde $d\vec{A}$ é um elemento de área da partícula fluida e $d\dot{m}$ é o fluxo mássico que atravessa esse elemento de área.

A equação de Navier-Stokes é a equação que descreve o movimento dos fluidos que apresentam comportamentos de um fluido newtoniano, que apresenta isotropia e incompressível, para um campo de velocidade de Euler. A forma vetorial da equação de Navier-Stokes é representada por

$$\rho [\partial_t \vec{v} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}] = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (9)$$

Onde:

ρ é a massa específica;

\vec{v} é a velocidade vetorial do fluido;

p é a pressão;

μ é a viscosidade absoluta do fluido.

Os termos do lado esquerdo constituintes da equação (9) se relacionam com as forças inerciais e a quantidade de movimento e o lado direito, se relacionam com a pressão e a viscosidade. O termo não linear $\rho(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v}$ da equação em questão pode ser desprezado em situações de velocidades subsônicas. Nessas condições entra-se no regime chamado de fluxo laminar, e a equação (9) pode apresentar soluções analíticas para uma série de problemas de fluxo que pode ser encontrada.

E a equação para conservação de energia pode ser derivada da primeira Lei da Termodinâmica que diz que a energia total de um sistema é a soma do

calor trocado com o trabalho realizado ao sistema, uma forma de expressá-la é em função da temperatura do fluido.

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \beta T \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (10)$$

Onde:

c_p é o calor específico a pressão constante do fluido;

β é o coeficiente de expansão térmica do fluido;

k é o coeficiente de difusão térmica do fluido;

Φ é a função de dissipação associada aos esforços viscosos.

2.1.2.1. Número de Reynolds

O número de Reynolds é um adimensional da mecânica dos fluidos que é obtido através da equação de Navier-Stokes. O número de Reynolds relaciona a massa específica, à velocidade, à viscosidade e ao comprimento característico do sistema, e é dado por

$$Re \equiv \frac{\rho v L}{\mu} \quad (11)$$

Onde:

ρ é a massa específica do fluido;

μ é a viscosidade absoluta do fluido;

v é a velocidade característica do fluido;

L é o comprimento característico do sistema.

A magnitude do número de Reynolds é utilizada para estimar o comportamento do escoamento entre turbulento e laminar. Para fins comparativos é definido o número de Reynolds de transição Re_t . Para valores de $Re < Re_t$ o fluxo é dito laminar, caso contrário $Re > Re_t$ o fluxo é turbulento e o valor de Re_t é de 2300 a 3000. Entretanto, para microfluídica, o número de Reynolds de transição pode assumir valores em torno de 15 (GRAVESEN, 1993).

2.1.2.2. Número de Prandtl e Número de Péclet

O número de Prandtl é muito importante em problemas de transferência de calor por convecção para velocidades altas, mas para velocidades baixas

compreendidas pelo número de Mach, $Ma < 0,3$, onde o Ma é definido pela razão da velocidade característica pela velocidade do som, os termos de expansão térmica ($\beta T \frac{Dp}{Dt}$) e a função dissipação (Φ) podem ser negligenciados (WHITE, 2006). O número de Prandtl é definido por:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (12)$$

Em velocidades baixas um parâmetro importante é o produto do número de Reynolds pelo número de Prandtl que relaciona a transferência de calor por convecção (associado ao transporte de massa) e por condução (associado à difusão de calor) e define o número de Péclet:

$$Pe = \frac{\rho c_p v L}{k} \quad (13)$$

Para números de Péclet elevados a transferência de calor ocorre por convecção em detrimento do processo de condução. Em casos de números de Péclet reduzidos os processos de condução não podem ser negligenciados e passam a interferir nas medidas de vazão (WEIGAND, 2004).

2.1.3. MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O calor pode ser transferido por três modos, condução, convecção e radiação (MORAN, 2009). A condução ocorre de molécula para molécula, devido a interação da molécula com maior energia para a de menor energia. Essa transferência de calor aumenta conforme a diferença de temperatura e com a capacidade da substância de fazer a transferência de energia. A taxa de transferência de calor é expressa pela lei de Fourier para a condução

$$\dot{Q} = -kA\nabla T \quad (14)$$

a taxa de transferência térmica é proporcional à condutibilidade térmica k , à área total A e ao gradiente de temperatura.

Quando temos um meio escoando, o modo de transferência térmica para este meio é denominado convecção. O coeficiente de transferência de calor por convecção é normalmente correlacionado com a lei de resfriamento de Newton por

$$\dot{Q} = Ah\Delta T \quad (15)$$

Onde as propriedades de transferência de calor estão concentradas no coeficiente de transferência de calor h que se torna então uma função das propriedades do meio, do escoamento e da geometria.

E por último o modo de transferência de calor por radiação, que transmite calor por ondas eletromagnéticas. A taxa de emissão superficial de calor é dada por

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (16)$$

Onde ε é a emissividade, T_s é a temperatura da superfície e σ é a constante de Boltzmann.

3. DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO

3.1. MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo desenvolvido foi feito empregando materiais e técnicas considerados não convencionais no desenvolvimento de sensores de vazão que empregam o princípio térmico em seu funcionamento. Trata-se de materiais e técnicas que já vêm sendo estudados para aplicações em dispositivos microfluídicos, visando tanto a redução dos custos de fabricação quanto facilitar a prototipagem dos mesmos.

3.1.1. ESCOLHA DE MATERIAIS

Os critérios determinantes na escolha dos materiais para constituir o sensor calorimétrico de vazão, foram baseados nos três pontos importantes que garantem a eficiência e a sensibilidade do sensor; são eles: isolamento térmico, elemento de aquecimento e os sensores de temperatura; e na redução dos custos, que determinou a seleção dos materiais a serem testados na fabricação dos protótipos.

3.1.1.1. Isolamento térmico

Para o isolamento térmico inicialmente foi pensado no uso de poliestireno expandido de baixa densidade, comercializado em chapas fabricadas por processo de extrusão, com espessuras que variam de 2 em 2 *mm*, começando em 2 *mm* (Figura 7). A motivação para o uso desse material foi por causa da sua ampla aplicação em embalagens e dispositivos que requerem isolamento térmico e pela sua alta oferta no mercado e seu baixo custo.



Figura 7: Exemplo de chapa de poliestireno expandido, fabricado por processo de extrusão.

O uso do poliestireno expandido com finalidade de isolar termicamente o sistema foi descartado por motivos posteriormente explicados na sessão 3.2 (Evolução do Design), e foi gradativamente substituído por camadas de adesivo transferível para laminação da 3M (espessura de 50 μm), com regiões vazadas intercaladas com camadas de película de polipropileno da marca BOLLORÉ, com espessura de 10 μm , com o intuito de formar câmaras de ar aumentando isolamento térmico (Figura 8).

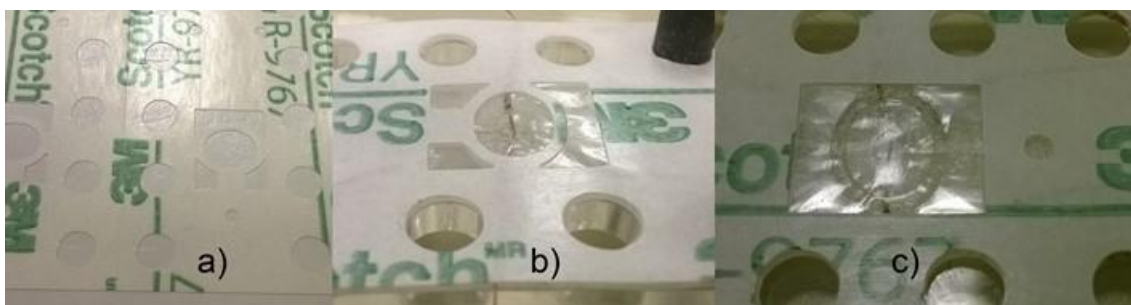


FIGURA 8: a) Adesivo transferível para laminação com regiões vazadas para isolamento, b) aplicação do adesivo sobre o filme de polipropileno, e em c) aplicação do filme junto com a próxima camada de adesivo para selamento da região vazada.

3.1.1.2. Estrutura microfluídica

O principal material estruturante foi a fita de adesivo transferível para laminação 3M-YR-9767 (Figura 9), cuja composição é o acrílico contendo fibras de vidro, com espessura de 50 μm . Ela apresenta alta adesão aos outros materiais constituintes do projeto e grande resistência a ambientes úmidos, segundo o fabricante. Outra vantagem do adesivo transferível é apresentar flexibilidade para contornar degraus e obstáculos, por exemplo, eletrodos feitos por fios, sem deixar espaços vazios. A principal desvantagem na aplicação em

microfluídica é por apresentar solubilidade em etanol, acetona, gasolina entre outros solventes orgânicos.



Figura 9: Fita de adesivo transferível para laminação da 3M modelo YR-9767.

Entre as camadas de adesivo transferível, para limitar os canais e as câmaras de ar, encontra-se a camada formada pela película de polipropileno da marca BOLLORÉ, com espessura de 10 μm (Figura 10).



Figura 10: Película de polipropileno da marca BOLLORÉ.

Outros materiais para estrutura microfluídica também foram avaliados, um deles foi a fita dupla face da marca Alltak, com espessura de 100 μm , constituída por um filme de vinil mais camadas adesivas, mas o seu uso foi impedido por apresentar baixa adesão e flexibilidade comparada ao adesivo transferível, ocasionando vazamentos.

Outro material analisado foi a etiqueta translúcida Pimaco da marca BIC, com espessura de 100 μm , porém sua aplicação necessita de uma camada extra de adesivo transferível na parte superior da etiqueta, o que, além de apresentar

baixa adesão e flexibilidade se comparada ao adesivo transferível, ocasiona vazamentos.

Também foi estudado o uso de camadas fabricadas à base de PDMS–poly(dimethylsiloxane), mas foi descartado devido à baixa adesão ao adesivo transferível.

3.1.1.3. Elemento aquecedor

Inicialmente foi utilizado um resistor comercial ôhmico de resistência 10 Ω , de 1/8 watts de potência dissipada como elemento aquecedor. Mas, por características de dimensionais e de precisão foi descartado. Para substituir o resistor foi decidido utilizar fio de liga níquel-cromo como elemento aquecedor, devido ao seu histórico uso em resistências e a sua disponibilidade no mercado com baixo custo comparado a outras ligas. Foram utilizados dois diâmetros diferentes: de 56 μm e de 78 μm .

A geometria escolhida o para elemento aquecedor foi a helicoidal, por já ser empregada em sistemas de aquecimento, como, por exemplo, nos resistores utilizados em chuveiro elétrico, e por ser eficiente. O seu forjamento é feito enrolando-se o fio de níquel-cromo em outro fio de diâmetro controlado (Figura 11), o qual define as dimensões do elemento aquecedor.



Figura 11: Detalhe do forjamento da resistência.

Para conexão da resistência forjada ao circuito elétrico, foi utilizado fio de cobre com diâmetro de 100 μm , mas nesse diâmetro o contato formado com a resistência fica com dimensões não satisfatórias para a aplicação desejada. A solução encontrada foi achatar o fio de cobre de maneira que reduzisse sua

espessura para facilitar o manuseio (Figura 12). Esse processo de achatamento garante, pelo menos, a redução de 50 % no diâmetro podendo chegar a uma redução de até 70 % do diâmetro.

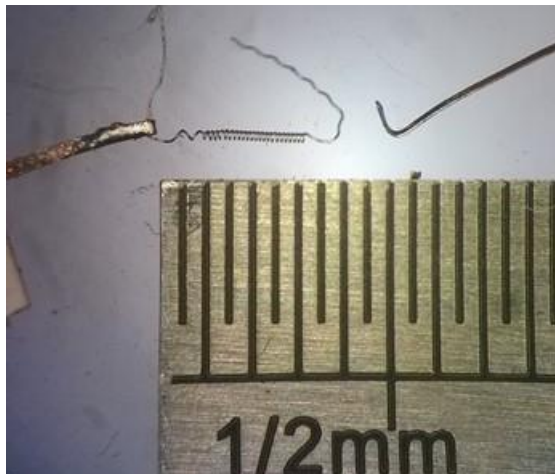


Figura 12: Detalhe do contato elétrico entre a resistência e o fio de cobre achatado; abaixo escala de uma régua de metal com precisão de 0,5 mm.

A Tabela 2 apresenta as dimensões dos resistores forjados empregando esse método.

Tabela 2: Dimensões dos resistores forjados.

Diâmetro do fio interno ($\pm 1 \mu m$)	Diâmetro do fio de níquel-cromo ($\pm 1 \mu m$)	Diâmetro externo do resistor ($\pm 1 \mu m$)	Comprimento total do fio de níquel-cromo ($\pm 0,05 mm$)	Resistência elétrica do resistor a 20°C ($\pm 0,03 \Omega$)	Escala de reprodutibilidade 10 reprodutível e 0 não reprodutível
56	56	168	7,85	4,27	5
	78	212	6,73	1,89	
78	56	190	9,39	5,11	8
	78	234	7,84	2,20	
100	56	212	10,93	5,95	10
	78	256	8,95	2,51	

3.1.1.4. Sensores de temperatura

Como sensores de temperatura, inicialmente, foram utilizados termistores, porém estes não apresentaram sensibilidade para detectar pequenas variações de temperatura. Sua elevada capacidade térmica implicava em um tempo maior para entrar em equilíbrio térmico com o fluido, aumentando o tempo de resposta. Decidiu-se, então, reduzir a massa térmica do sensor para garantir mínima interferência, diminuir o tempo de resposta, e aumentar a precisão na medida de temperatura. Para isso, foram escolhidos os termopares.

O princípio de funcionamento dos termopares se deve ao Efeito Seebeck, que é a geração de uma diferença de potencial entre duas junções de dois condutores ou semicondutores submetidos a uma diferença de temperatura. A tensão elétrica gerada é proporcional à diferença de temperatura. Um exemplo é o termopar tipo K, que apresenta uma tensão de $41 \mu\text{V/K}$.

Foi testado o uso de termopar tipo K por ser o de menor custo e por apresentar amplo uso. O termopar inicialmente escolhido contém fio de $170 \mu\text{m}$ de diâmetro, com solda traseira na qual os dois fios são alinhados e soldados de forma que apresentam continuidade (Figura 13).

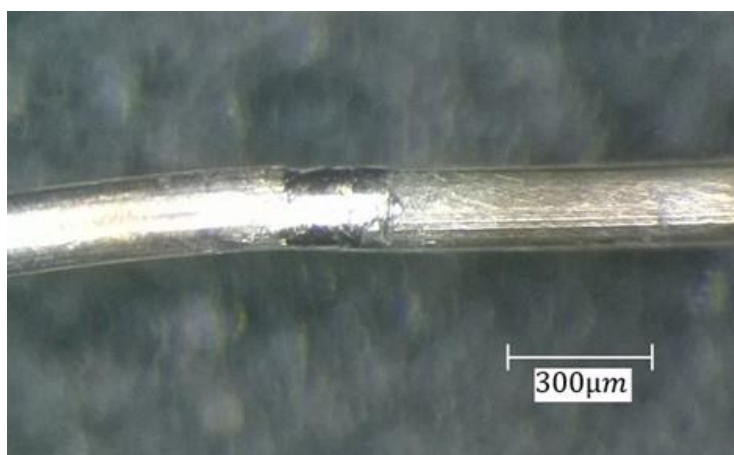


Figura 13: Detalhe da solda traseira feita com auxílio de microscópio óptico.

Para fazer essa solda foi empregada uma fonte de tensão, de 0 a 30 volts e corrente elétrica de 3 ampères, e utilizado um suporte com avanço micrométrico adaptado para posicionar os fios alinhados. Após um rápido curto-circuito entre os fios ocorria a solda, conforme mostra a Figura 14.

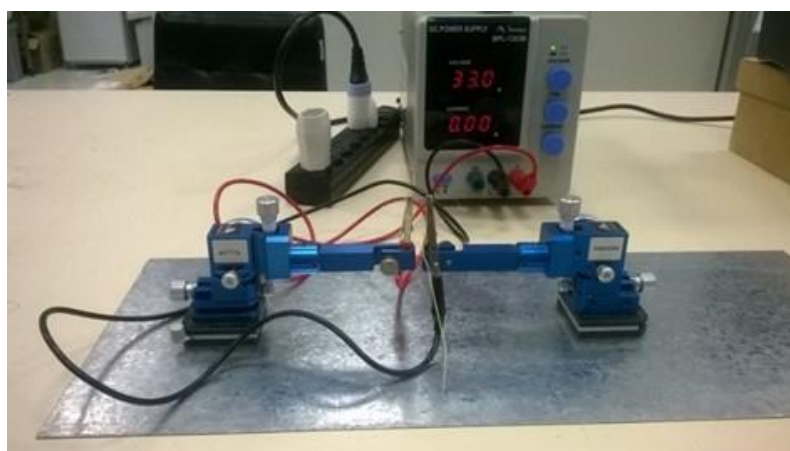


Figura 14: Montagem da fonte de tensão e suportes adaptados de avanço micrométrico nos 3 eixos para a solda traseira do termopar.

Outra possibilidade para melhorar a sensibilidade do termopar é diminuir o diâmetro do fio utilizado. O menor diâmetro de fio para termopares que é comercializado é da marca OMEGA, com 13 μm de diâmetro (Figura 15).



Figura 15: Termopar tipo K com fio de 13 μm de diâmetro da marca OMEGA.

Porém, para utilizá-lo foi necessário o uso de fios extensores da mesma liga metálica com diâmetro maior. Dessa maneira, o fio de 170 μm de diâmetro foi utilizado como extensor, o qual foi achatado por prensagem. O contato entre os dois fios foi feito enrolando-se o fio de menor diâmetro ao redor do de maior diâmetro, deixando sua extremidade livre para ser dobrada por cima do fio enrolado, para garantir o contato (Figura 16).



Figura 16: Detalhe da junção dos fios de 170 μm e 13 μm de diâmetro.

3.1.2. TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO

Para a prototipagem das camadas que compõem a estrutura do dispositivo, foram utilizadas técnicas específicas para cada material, como ablação a laser e plotter de recorte, melhor detalhadas nas próximas sessões.

3.1.2.1. Ablação a laser

A técnica de ablação a laser foi utilizada para o corte das camadas de acrílico, isopor e filme de polipropileno. Para este objetivo foi utilizada a fresadora a laser de CO₂, modelo Laser Solution 100, de 30 W de potência, da empresa Gravograph® (Figura 17).



Figura 17: Fresadora a laser de CO₂ Laser Solution 100, da Gravograph®.

A fresadora a laser é equipada com um laser de CO₂ com potência máxima de 30 W. Ela apresenta uma área disponível para gravação de 460 mm por 305 mm, respectivamente para o eixo x e y, e em cada eixo tem um trilho para deslocamento no plano xy, cuja velocidade máxima é de 2 m/s. O eixo z é responsável pela focalização do feixe do laser. Os possíveis ajustes deste equipamento são feitos nas propriedades específicas de gravação, determinados pelo software da fresadora: *raster*, *vector* e *dot*, e nos dois parâmetros ajustáveis: velocidade de deslocamento e potência do laser.

As propriedades específicas de gravação, determinadas pelo software da fresadora, discrimina o tipo de gravação que será feita. No modo *raster* é feita uma varredura por uma região e é recomendada para fazer rebaixos nas peças. No modo *vector* é feito o contorno definido por uma linha, sendo essa opção

recomendada para realização de cortes. E a opção *dot* é usada para a realização de pequenos pontos.

Este equipamento se comunica com o computador pela porta serial da impressora e sua operação pode ser realizada por qualquer software gráfico que produza desenhos vetorizados. Neste caso, o software utilizado foi o Corel Draw®.

No corte das camadas de acrílico foram utilizados os seguintes parâmetros: *vector*, potência 100 % e velocidade 5 %, para quatro passadas. Na Figura 18a está representado o desenho a ser enviado para fresadora e na Figura 18b está o resultado do corte da peça.

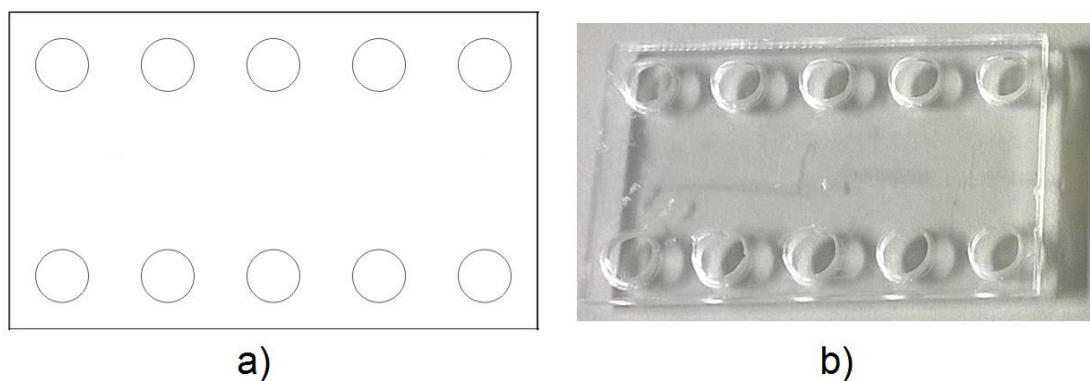


Figura 18: Detalhe do corte das peças em acrílico, a) desenho da peça e b) peça em acrílico conforme o desenho.

Para o corte da chapa de poliestireno expandido foram ajustados os parâmetros de corte em: *vector*, potência 5 % e velocidade 25 %, para oito passadas no total. Na Figura 19 está a peça de poliestireno cortada com esses parâmetros.

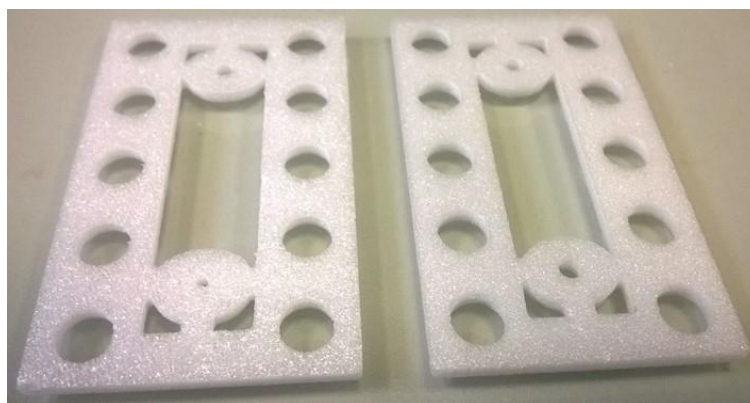


Figura 19: Detalhe da peça de poliestireno cortada pela fresadora.

Para o corte do filme de polipropileno, foi necessário criar um suporte em acrílico, para que o filme ficasse fixo e esticado. Esse suporte construído para conter quatro peças com uma borda de tamanho suficiente para colar fita dupla face e fixar o filme ao suporte, conforme mostra a Figura 20a. O corte ocorreu em duas etapas: na primeira são cortados os furos com os seguintes parâmetros: *vector*, potência 1 % e velocidade 50 % (Figura 20b), e na segunda foram cortados os contornos das peças com os seguintes parâmetros: *vector*, potência 5 % e velocidade 50 % (Figura 20c). Nas duas etapas foi necessário apenas uma passada.

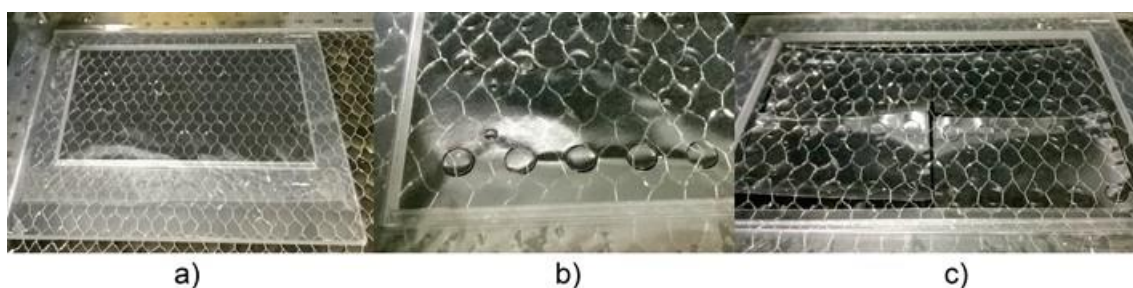


Figura 20: Sequência de corte do filme de polipropileno, a) base de corte com o filme fixado e esticado, b) etapa corte dos furos e c) corte dos contornos.

3.1.2.2. Plotter de recorte

O Plotter de recorte foi utilizado para o corte das camadas formadas pelo adesivo transferível. O equipamento utilizado foi da marca Silhouette® de modelo Silhouette PORTRAIT (Figura 21).



Figura 21: Plotter de recorte do Silhouette PORTRAIT da marca Silhouette.

O plotter de recorte Silhouette PORTRAIT se comunica com o computador via porta USB e utiliza software de desenho próprio (Silhouette Studio®). O mecanismo de corte é composto por uma espécie de cabeçote onde

contém o suporte para a lâmina de corte. O acionamento desta lâmina ocorre por indução magnética. Esse cabeçote é deslocado por um eixo orientado na direção x ; o deslocamento na direção y é realizado pela base de corte, que pode ser a própria folha de adesivo nas dimensões padrão para o plotter (Figura 22). Os parâmetros ajustáveis do plotter são: velocidade, espessura, ajustados via software, e profundidade da lâmina, ajustada manualmente.

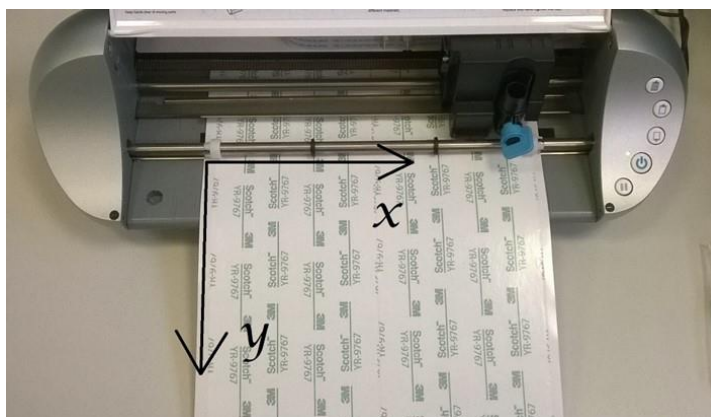


Figura 22: Detalhe da orientação dos movimentos do cabeçote (direção x) e da base de corte (direção y).

Para o corte do adesivo transferível pelo plotter de recorte, foi necessário transferi-lo antes para um papel siliconado, que serve como base de corte e que não danifica o adesivo. Os parâmetros utilizados para o corte são: velocidade nível 4, espessura nível 7 e profundidade da lâmina nível 2. Após o corte nesses parâmetros foi necessário retirar as partes cortadas que não seriam usadas (papel siliconado), tendo como resultado apenas a camada de adesivo com o *liner* de proteção (Figura 23).



Figura 23: Detalhe do resultado do corte da camada de adesivo pelo plotter de recorte.

3.1.2.3. Montagem do protótipo

Após ter cortado todas as peças, preparado os termopares com suas respectivas extensões e o resistor com os contatos elétricos, iniciou-se a montagem do protótipo seguindo os seguintes procedimentos, elaborados para garantir a vedação e o alinhamento das camadas.

Primeiro foi preparada uma peça de acrílico com as dimensões exatas do dispositivo e contendo furos guia, assim como todas as camadas, para que encaixem em parafusos adaptados em pelo menos quatro furos (Figura 24).



Figura 24: Base para montagem.

As primeiras camadas a serem montadas são as que contêm as estruturas dos canais. Nessa etapa também foram posicionados os termopares nas posições definidas. Primeiro foi destacado o adesivo com o canal que foi posicionado sobre a base com o lado do adesivo exposto virado para cima. Na sequência foram posicionados os termopares (Figura 25a), foi destacado outro adesivo igual ao primeiro e sobreposto sobre as duas camadas de adesivo alinhando-as através dos parafusos (Figura 25b). Quando essas duas camadas de adesivo entravam em contato uma com a outra, aplicava-se uma pequena pressão para expulsar bolhas de ar, utilizando uma peça de acrílico idêntica à da base (Figura 25c).

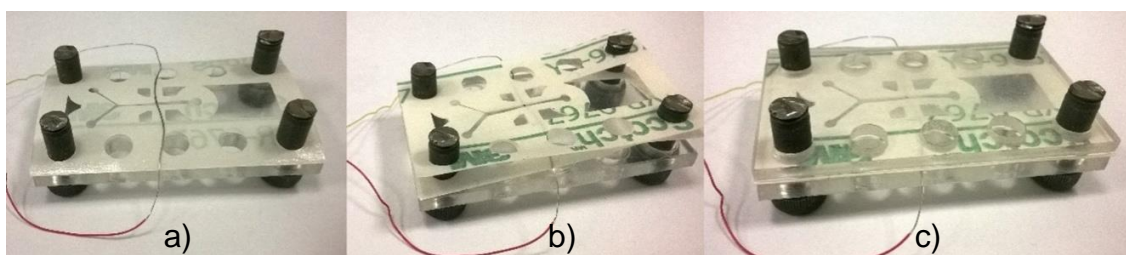


Figura 25: Sequência de colagem camada com canal, a) camada de adesivo exposto com o termopar posicionado, b) alinhamento da outra camada de adesivo e c) aplicação de pressão.

Na sequência foi colado o filme de polipropileno que limitava o canal microfluídico das outras camadas de adesivo. Para isso foi utilizada a peça de acrílico idêntica à base, molhada com álcool isopropílico para que o filme aderisse levemente nela. Então foi destacado o papel siliconado, conhecido como *liner*, para expor o adesivo. Em seguida, foram alinhadas as camadas por meio dos parafusos (Figura 26a), e aplicada pressão suficiente para expulsar possíveis bolhas de ar.

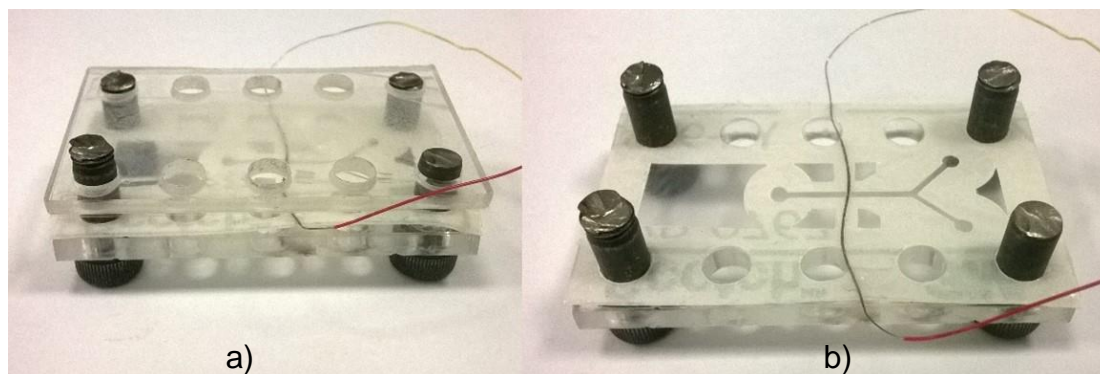


Figura 26: Sequência de colagem do filme de polipropileno, a) alinhamento da peça de acrílico com o filme de polipropileno e b) o filme já aplicado sobre a camada de adesivo.

O próximo passo foi colar as camadas centrais entre as camadas que continham os canais já com os termopares e o filme de polipropileno aplicado. Entre as camadas centrais está posicionado o resistor, que foi fixado da mesma forma que os canais e os termopares.

As próximas camadas, com regiões vazadas para isolamento térmico, foram coladas nas camadas que continham a estrutura microfluídica pelo mesmo procedimento das demais. Isso foi repetido até chegar à última camada de acrílico. A camada de acrílico inferior é a que possui apenas os furos guias, e a superior é a que possui os acessos para os escalpes (Figura 27a). Esses escalpes foram preparados para a inserção nos acessos retirando-se a parte da agulha, ficando apenas a mangueirinha com o conector (Figura 27b). A mangueirinha foi então, colada ao acesso com adesivo instantâneo, cuja composição é éster de cianoacrilato (Figura 27c).

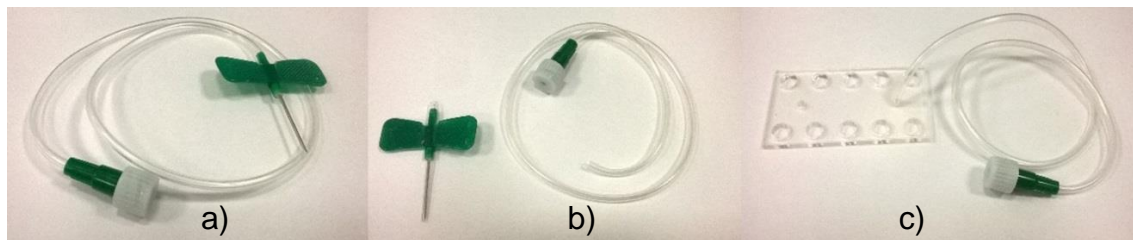


Figura 27: Sequência de preparação do escalpe para ser colado ao acesso da camada superior de acrílico, a) o escalpe, b) corte da agulha e c) colagem da mangueira no acesso.

3.1.3. CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de controle e aquisição de dados proposto utiliza os seguintes componentes: uma placa Arduino, o amplificador operacional AD595AQ, um conversor analógico digital de 16 bit e fontes chaveadas de 5 e 9 volts. A organização do sistema de controle e aquisição de dados está representada na Figura 28.

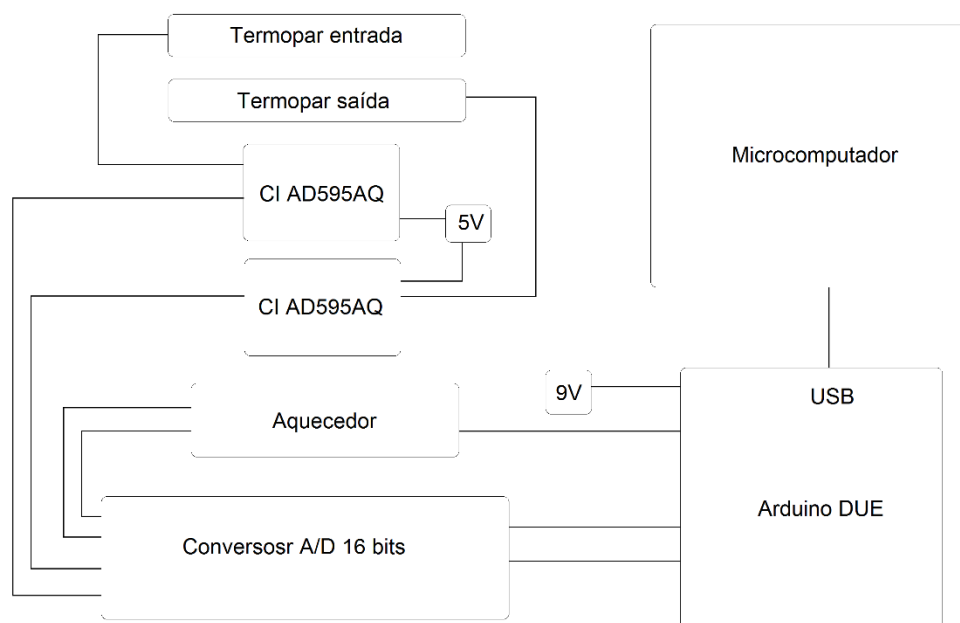


Figura 28: Diagrama da organização do sistema de controle e aquisição de dados.

A principal medida realizada foi a da temperatura através do termopar tipo K ($41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$). Para a leitura dos valores de tensão gerados pelo termopar, foi necessário um amplificador operacional que possibilitava as leituras das tensões pela placa Arduino e a sua conversão em valores de temperatura. O

amplificador operacional utilizado foi o CI AD595AQ, destinado à aplicação com termopares do tipo K (Figura 29). Ele apresenta resolução de saída de 10 mV/°C. Para a ligação do Circuito Impresso é preparada uma placa de impressão de circuitos de acordo com a ligação sugerida no *datasheet* do componente.



Figura 29: CI AD595AQ na placa para conexão com o termopar e com os cabos de alimentação e de sinal do CI.

O monitoramento do CI AD595AQ foi testado utilizando diretamente a placa Arduino UNO, a qual lê a tensão do CI por meio de um conversor analógico digital (AD), com resolução de 10 bits. A tensão de referência utilizada foi 3,3 V, assim o mínimo valor de tensão lido é dado por

$$\text{Mínimo valor} = \frac{\text{Tensão de referência}}{2^{10}-1} = \frac{3,3V}{1023bit} = 3,226 \text{ mV/bit}, \quad (17)$$

sabendo-se que o CI tem resolução de 10 mV/°C, a menor variação de temperatura detectável pela placa Arduino UNO é dada por

$$\text{Resolução de temperatura} = \frac{3,226\text{mV/bit}}{10\text{mV/}^\circ\text{C}} = 0,3226 \text{ }^\circ\text{C/bit}, \quad (18)$$

Foi testado também o uso da placa Arduino DUE, que é equipada com um conversor analógico digital com resolução de 12 bits. O menor valor lido pelo conversor, utilizando a mesma tensão de referência (3,3 V), e calculado pela equação (17), é de 0,8059 mV/bit, e a resolução na medida de temperatura, calculada pela equação (18), é de 0,08059 °C/bit.

Para melhorar a resolução na temperatura medida, foi utilizado um conversor analógico digital externo à placa Arduino DUE. Esse conversor, que vem instalado na placa da marca Circuitar, o CI ADS1115, é um conversor AD de 16 bits de resolução. Com ele o menor valor lido para mesma tensão de

referência (3,3 V) e calculado pela equação (17), é de $0,05035 \text{ mV/bit}$, e a resolução na menor variação de temperatura, calculada pela equação (18), é de $0,005035 \text{ }^\circ\text{C/bit}$.

A leitura do CI AD595AQ pode ser feita diretamente pela placa Arduino. Por isso, foi comparado o uso das placas Arduino UNO e Arduino DUE, a fim de definir a melhor resolução de medida. A resolução do conversor analógico digital interno às placas Arduino UNO e Arduino DUE é de 10 bit e de 12 bit, respectivamente. Usando como tensão de referência 3,3 V, a placa de 10 bit apresenta resolução de conversão de 3,225 mV e a de 12 bit apresenta 0,8059 mV. A placa Arduino DUE além de apresentar melhor resolução do conversor A/D, apresenta maior poder de processamento, com 84 MHz de velocidade, enquanto a placa Arduino UNO possui apenas 16 MHz.

Mesmo com o uso da placa Arduino DUE, foi necessária a utilização de um conversor A/D externo. Foi escolhida uma placa comercial da marca Circuitar (ADC), que é constituída por quatro entradas analógicas, lidas simultâneas, com taxa de amostragem de 840 leituras por segundo, e é implementada com filtro RC para cada canal. A ligação da placa ADC com a placa Arduino DUE está indicada na Figura 30.

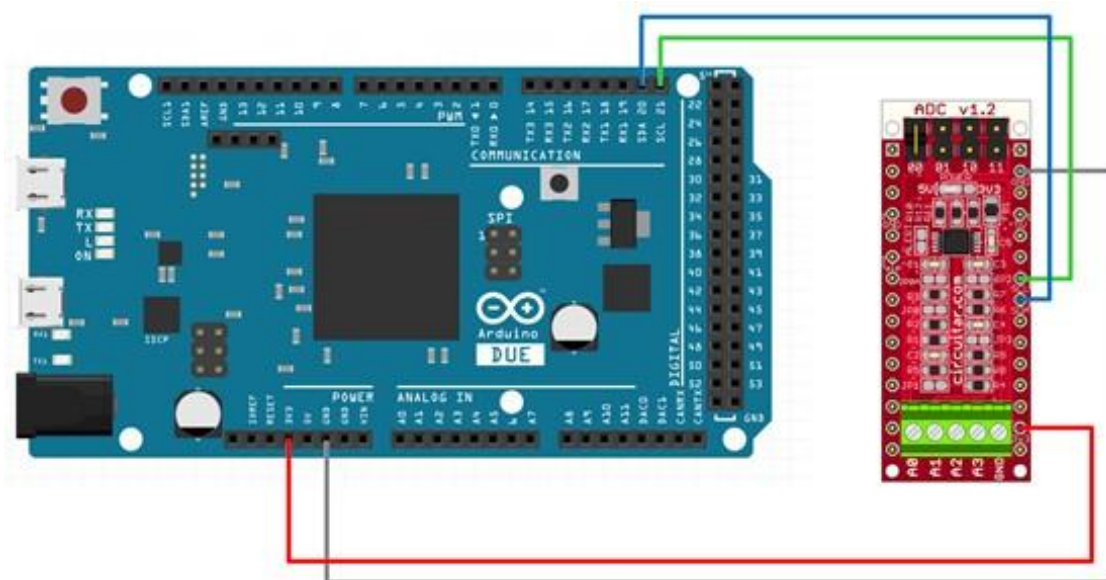


Figura 30: Ligação da placa Arduino DUE com a placa ADC.

Essa placa também possibilita o monitoramento da tensão sobre a resistência do aquecedor e, por consequência, a potência dissipada. Os circuitos testados têm como base um circuito divisor de tensão, composto por um resistor

ômico ligado em série com a resistência do aquecedor, que está aterrado. Conhecendo o valor do resistor ôhmico e a diferença de potencial nele, determina-se a corrente elétrica do circuito. Multiplicando-se a tensão sobre o aquecedor pela corrente determinada, obtém-se a potência elétrica dissipada pelo aquecedor.

O circuito de alimentação do circuito base que foi testado é controlado pela placa Arduino. Foram avaliados dois circuitos, o primeiro transistorizado (Figura 31) e o segundo com um relé.

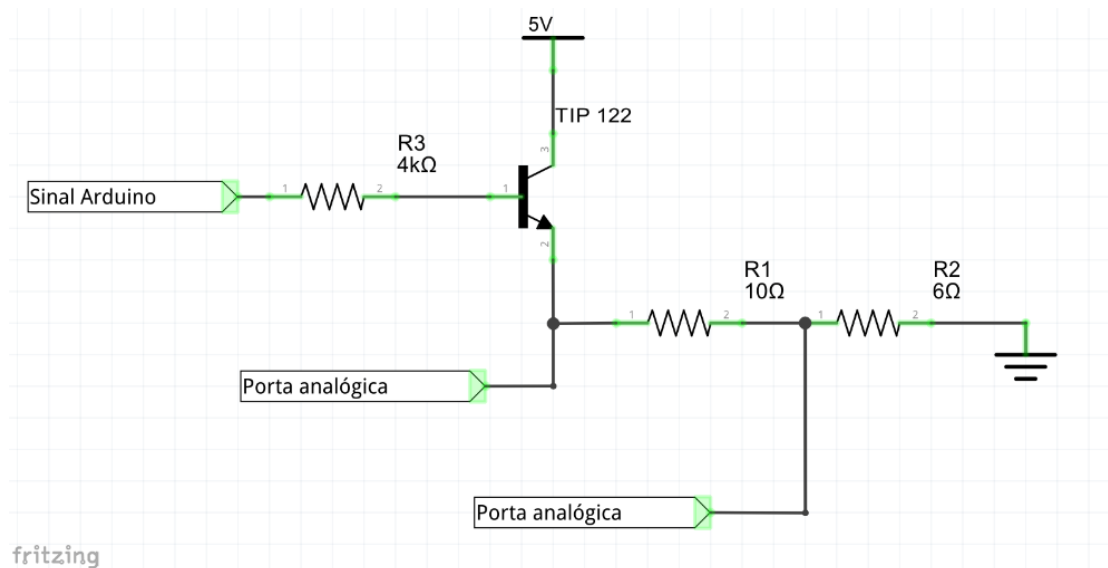


Figura 31: Circuito transistorizado para alimentação do circuito base, R1 é uma resistência ôhmica, R2 é a resistência de aquecimento.

O circuito base alimentado pelo circuito com o relé, possui um potenciômetro de precisão, que serve como divisor de tensão com a resistência do aquecedor. Desta forma é ajustada a tensão sobre a resistência. O circuito elétrico da Figura 32 representa o esquema elétrico para o aquecedor.

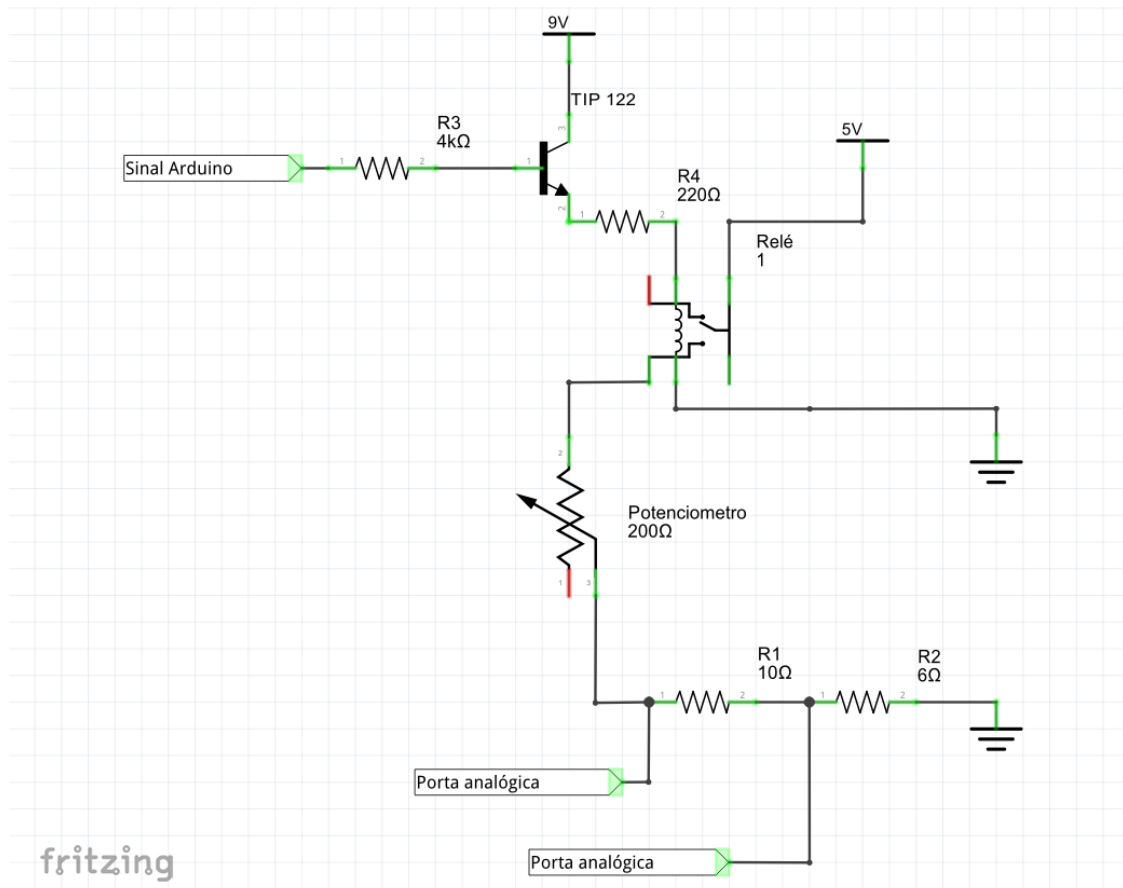
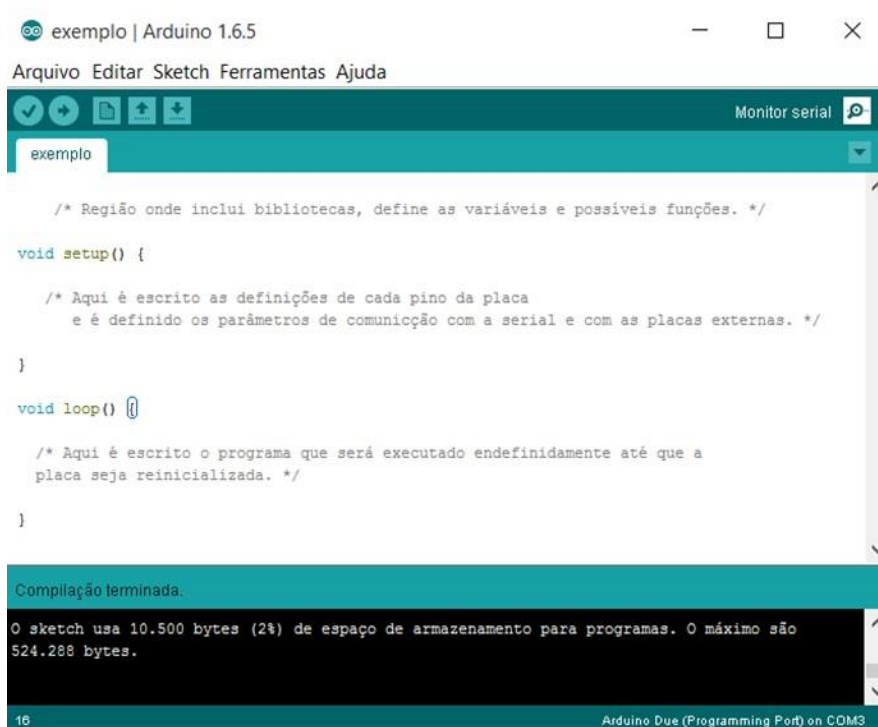


Figura 32: Esquema elétrico do aquecedor, R1 é uma resistência ôhmica, R2 é a resistência de aquecimento.

A programação da placa Arduino DUE é feita pela IDE (do inglês, *Integrated Development Environment* ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado), que conversa com a placa via conexão USB (Figura 33). Na IDE é escrita todas as linhas de comando do programa e é onde é acrescentado também as bibliotecas de comando próprio para cada componente externo a placa, por exemplo, a placa ADC da Circuitar. A linguagem de programação é C.



```
exemplo | Arduino 1.6.5
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

exemplo

/* Região onde inclui bibliotecas, define as variáveis e possíveis funções. */

void setup() {

  /* Aqui é escrito as definições de cada pino da placa
   e é definido os parâmetros de comunicação com a serial e com as placas externas. */

}

void loop() {

  /* Aqui é escrito o programa que será executado indefinidamente até que a
  placa seja reinicializada. */

}

Compilação terminada.
O sketch usa 10.500 bytes (2%) de espaço de armazenamento para programas. O máximo são
524.288 bytes.

16 Arduino Due (Programming Port) on COM3
```

Figura 33: IDE Arduino versão 1.6.5 disponível em www.arduino.cc, em detalhe na caixa de programação a estrutura principal do programa.

3.1.3.1. Tratamento dos dados

O processamento dos dados coletados foi feito de forma integral na própria programação da placa Arduino DUE. O programa desenvolvido executa funções de controle no mesmo “loop” em que lê valores de tensões provenientes da placa ADC, calcula a média móvel entre n valores, definidos inicialmente na variável “numLeitura” e seu respectivo desvio padrão da média móvel. Na Figura 34 é apresentado o trecho da programação feita na placa Arduino DUE, em que foi destacado o conjunto de códigos que calcula a média móvel e seu respectivo desvio padrão para uma variável, neste caso, a temperatura num dos termopares. O programa completo escrito para leitura das variáveis e controle do sistema está no Apêndice A.

```

while (a == 1) {
  if (tx < 10000) {
    digitalWrite(onPin, LOW);
  }
  else if (tx >= 10000) {
    digitalWrite(onPin, HIGH);
  }
  totalx = totalx - Leiturax[ind]; // subtrai o antigo valor da leitura para temp
  Leiturax[ind] = adc.readVoltage(0); // grava o atual valor da leitura
  totalx = totalx + Leiturax[ind]; // soma os valores das leituras
  mediax = totalx / numLeitura; // calcula a média da leitura para temp
  somasubx = somasubx - subx[ind]; // subtrai o antigo valor da subtração leitura - média
  subx[ind] = Leiturax[ind] - mediax; // grava em subx a atual subtração leitura - média
  subx[ind] = subx[ind] * subx[ind]; // grava em subx o valor do quadrado da subtração leitura - média
  somasubx = somasubx + subx[ind]; // soma os valores do quadrado da subtração leitura - média
  argumentox = somasubx / divisor; // calcula o argumento da raiz quadrada
  desvipadx = sqrt(argumentox); // calcula o valor do desvio padrão em temp
  x = mediax * 100; // temperatura Referencia de 3,3V e 10mV/°C
  vx = desvipadx * 100; // desvio padrão na leitura da temperatura em °C

  na sequência executa para as outras variáveis

  ind = ind + 1;
  tx = millis() - ti; // atualiza o valor do tempo
  int ok = escrevenaserial (x, vx, y, vy, z, w, amp, p, tx);
  if (ind >= numLeitura) {
    ind = 0;
  }
}
} //end while a==1

```

Comandos de controle: LOW desliga o aquecimento e HIGH liga o aquecimento

a variável numLeitura define a quantidade de valores em que será feita a média

Figura 34: Trecho do programa que controla e realiza a leitura das variáveis.

Através do desvio padrão é calculado o erro nas medidas de temperatura em cada termopar e ao calcular o delta de temperatura, soma-se os respectivos erros.

3.2. EVOLUÇÃO DO DESIGN

Desde a concepção inicial no trabalho realizado na iniciação científica houve mudanças tanto do design quanto dos elementos constituintes do projeto. A sequência de modelos de protótipos apresentada a seguir é referente ao desenvolvimento do sensor de vazão; outros protótipos auxiliares no processo são descritos no Apêndice B, onde são discutidos os resultados preliminares obtidos na configuração de sensor proposta por Vasconcelos *et al.* (2008).

3.2.1. MODELO 1

O primeiro modelo era constituído por camadas de poliestireno expandido de baixa densidade, por camadas de adesivo transferível, por duas camadas de acrílico, por um resistor Ôhmico de resistência 10 Ohms como

aquecedor e por dois termopares tipo K com solda traseira e fio com $170\ \mu\text{m}$ de diâmetro. A ordem das camadas, assim como o desenho feito no software CorelDraw, está na Figura 35.

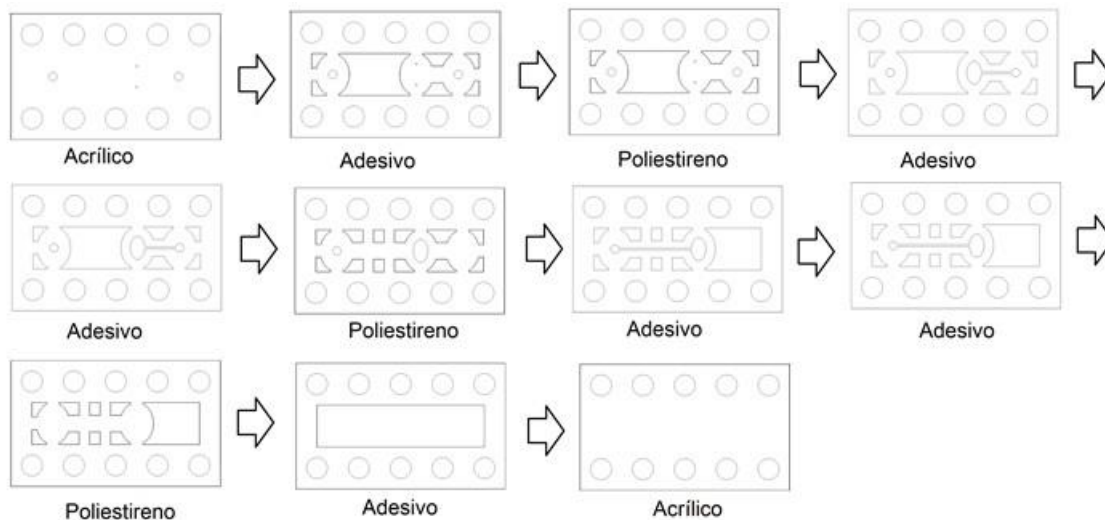


Figura 35: Camadas de materiais estruturantes do modelo 1, da camada superior à camada inferior.

A Figura 36 apresenta um esquema da montagem das camadas em vista lateral e o posicionamento dos termopares e do resistor.

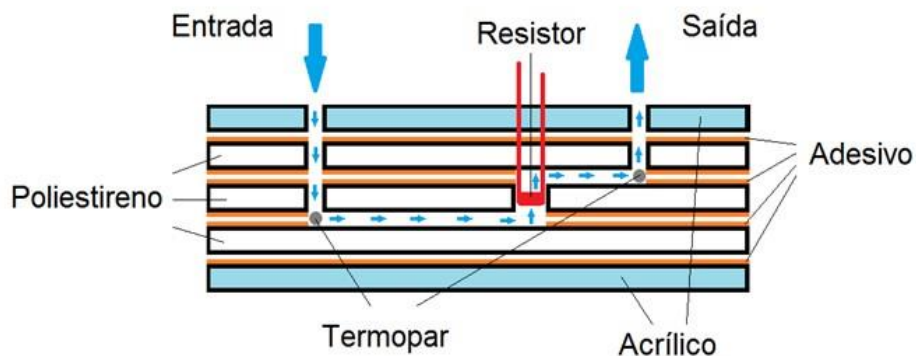


Figura 36: Esquema de posicionamento das camadas e os outros componentes do modelo 1.

As dimensões das camadas, assim como das principais estruturas, estão indicadas na Figura 37.

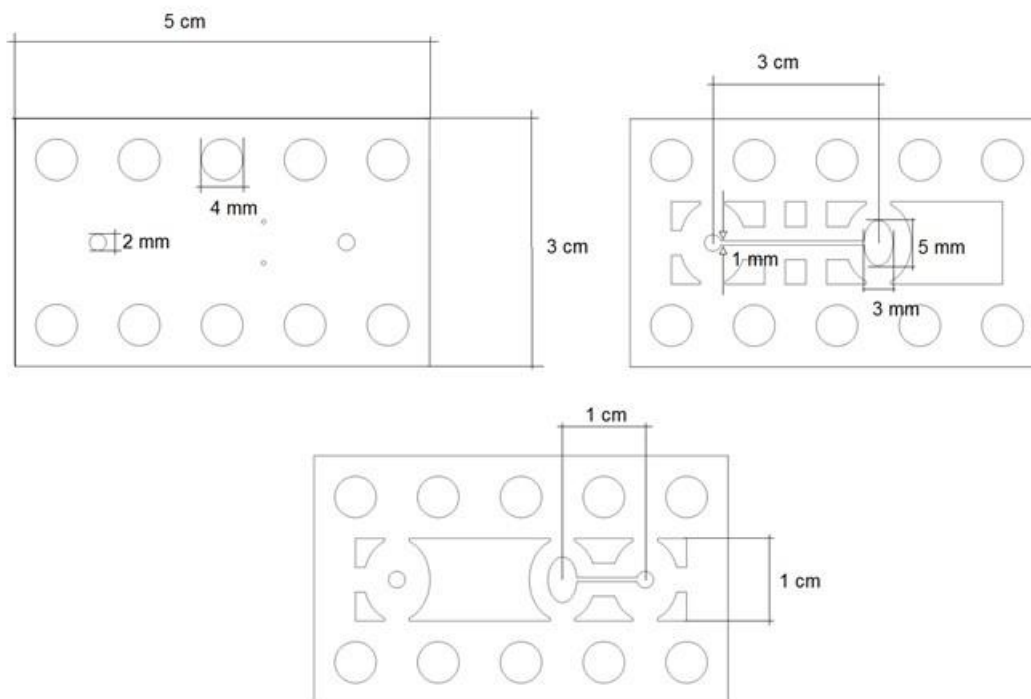


Figura 37: Dimensões dos detalhes das camadas do modelo 1.

Esse modelo não apresentou resultados significativos, pois ocorreram vazamentos, principalmente na vedação do resistor e ao longo dos canais. Nesse modelo não era possível visualizar os canais e nem o reservatório de aquecimento.

3.2.2. MODELO 2

No segundo modelo, foi alterado o resistor para uma resistência feita de fio de níquel-cromo, com $78 \mu m$ de diâmetro, enrolado em forma de espiral com diâmetro interno de $100 \mu m$ e externo de $256 \mu m$. Foi alterada também a geometria do reservatório de aquecimento (Figura 38).

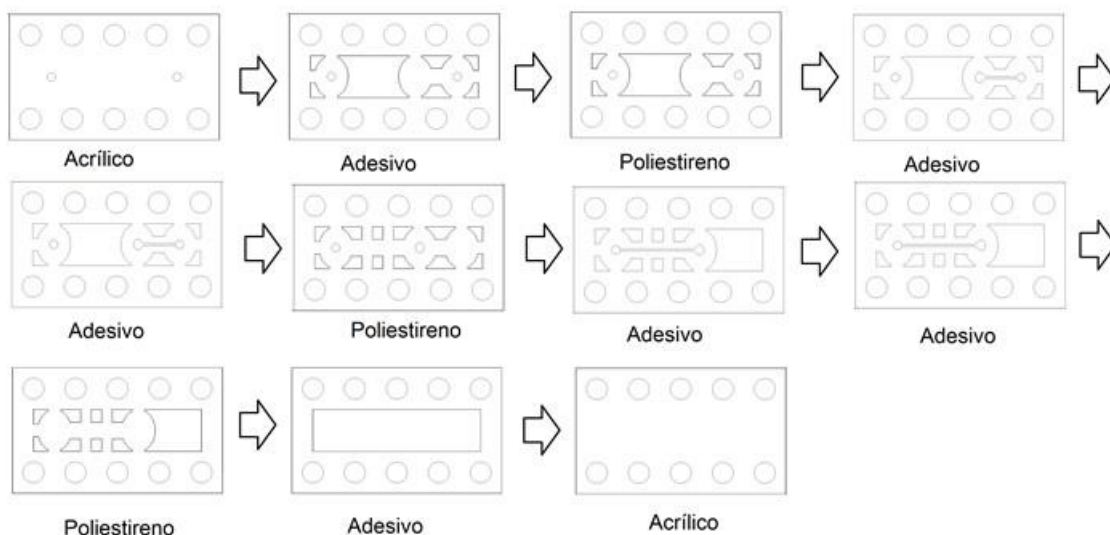


Figura 38: Camadas de materiais estruturantes do modelo 2, da camada superior à camada inferior.

As dimensões do reservatório de aquecimento e detalhes da resistência são evidenciadas na Figura 39.

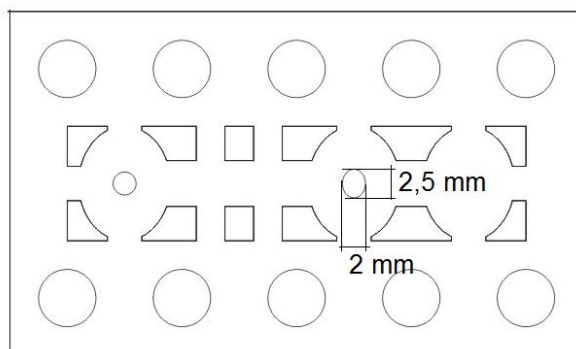


Figura 39: Detalhe da dimensão do reservatório de aquecimento e o posicionamento da resistência no mesmo.

Esse modelo apresentou melhores resultados, mas ainda não foram significativos devido a vazamentos, agora não mais na vedação do resistor, mas ainda nas estruturas microfluídicas. Uma análise foi feita para detectar os locais de vazamento, injetando-se água com corante. Após o descolamento das

camadas, ficou constatado que, por causa da superfície irregular do poliestireno, a vedação fica comprometida.

3.2.3. MODELO 3

No modelo 3 são substituídas as camadas de poliestireno logo acima do canal de saída e logo abaixo do canal de entrada por camadas de polipropileno, a fim de possibilitar a visualização dos canais e do reservatório de aquecimento e solucionar os problemas de vedação. A sequência das camadas está representada na Figura 40.

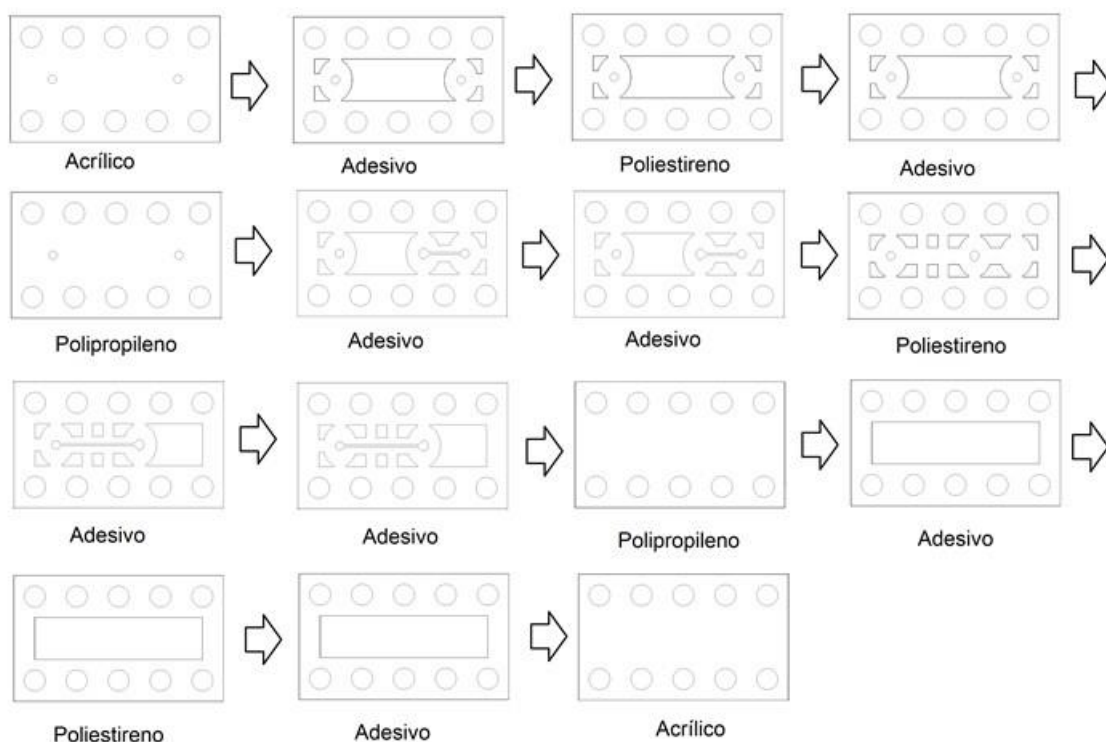


Figura 40: Camadas de materiais estruturantes do modelo 3, da camada superior à camada inferior.

Na Figura 41 está destacada a alteração das camadas de poliestireno pelas de polipropileno: para o lado superior na Figura 41a) e para o lado inferior Figura 441b). Na Figura 41c) está destacado detalhe do posicionamento do termopar na montagem do dispositivo.

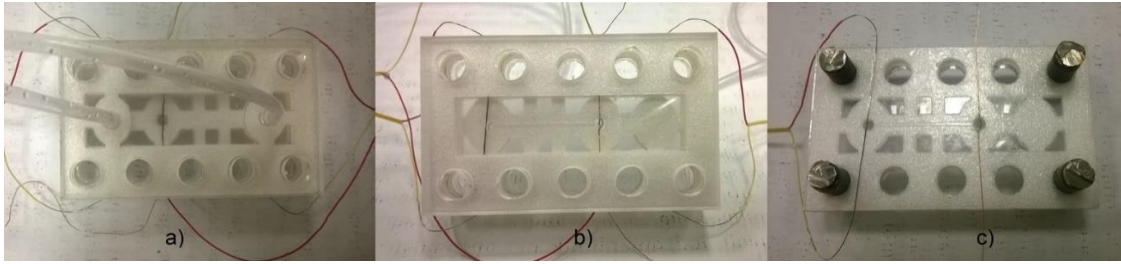


Figura 41: a) Detalhe do lado superior, b) detalhe do lado inferior e c) detalhe do posicionamento do termopar na montagem do dispositivo.

As camadas de polipropileno permitiram a visualização das regiões onde o adesivo não estava aderido às camadas de poliestireno, dessa maneira, possibilitaram uma melhor vedação do sistema.

3.2.4. MODELO 4

No modelo 4 substituiu-se a camada central de poliestireno por outras quatro camadas de adesivo e mais duas camadas de polipropileno, desta forma a estrutura microfluídica fica “suspensa”. Essa mudança só foi possível pela redução do diâmetro da resistência, que ficou com $190\ \mu\text{m}$ de diâmetro externo, com $78\ \mu\text{m}$ de diâmetro interno e fio com $56\ \mu\text{m}$ de diâmetro. Neste modelo também foi alterado o diâmetro do fio do termopar, de $170\ \mu\text{m}$ para $13\ \mu\text{m}$, o que permitiu uma melhora significativa na sensibilidade da medida de temperatura. A Figura 42 mostra a sequência das camadas constituintes da estrutura microfluídica deste modelo.

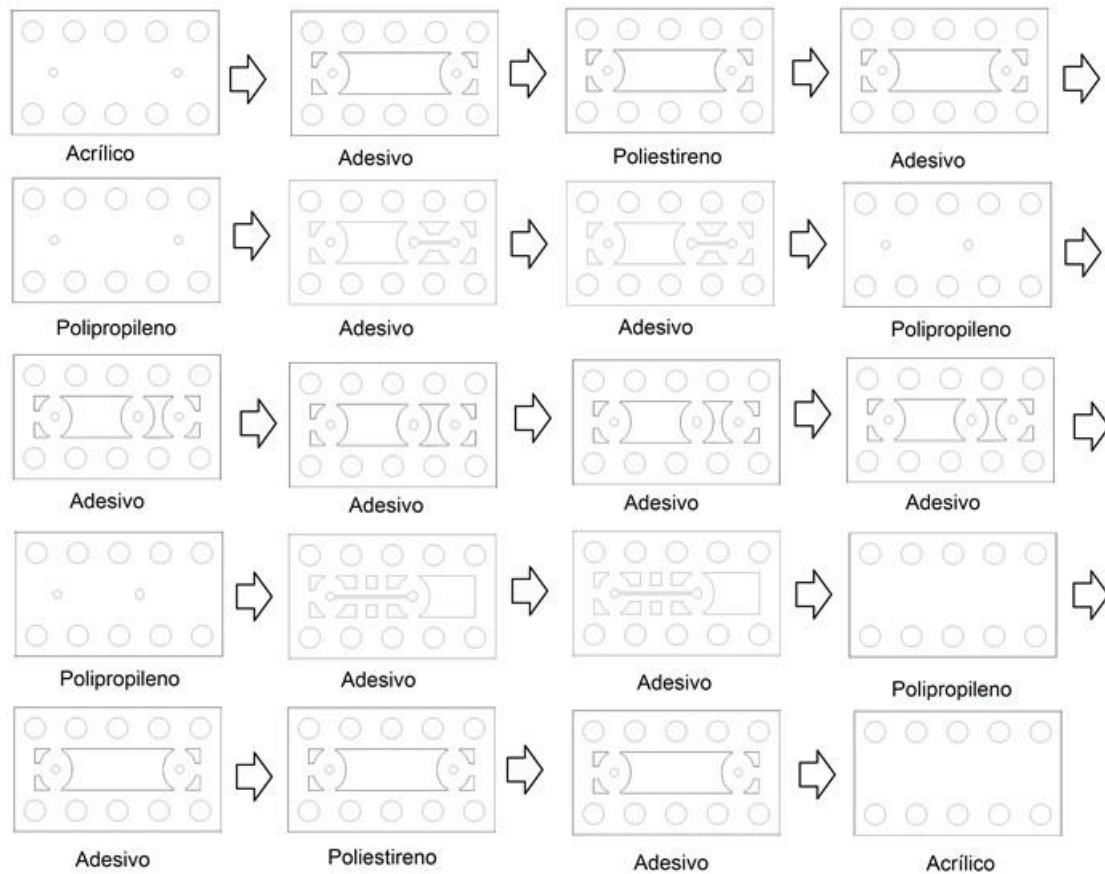


Figura 42: Camadas de materiais estruturantes do modelo 4, da camada superior à camada inferior.

Na Figura 43a) está em destaque o modelo 4 do dispositivo e na Figura 43b), um detalhe do posicionamento do termopar na saída do reservatório.

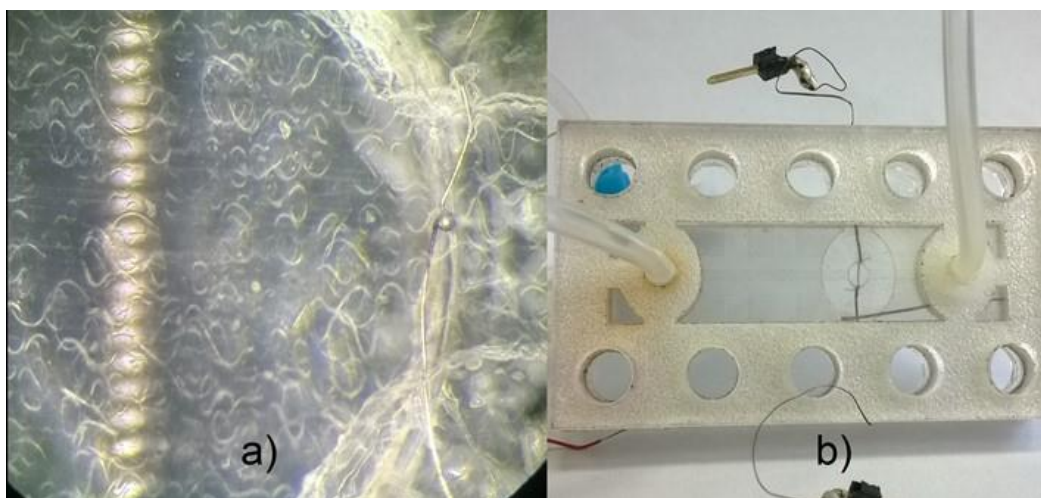


Figura 43: a) Detalhe da posição do termopar na saída do reservatório e b) detalhe da estrutura microfluídica “suspensão”.

A principal desvantagem deste modelo é a geração de bolhas no reservatório de aquecimento, devido ao fato de a água entrar em ebulição nas extremidades do aquecedor, onde a velocidade do fluido é menor.

3.2.5. MODELO 5

O modelo 5 foi adaptado para eliminar a geração de bolhas na resistência, problema verificado no modelo 4 (anterior). A orientação do elemento aquecedor foi alterada para o mesmo sentido do microcanal e as disposições dos termopares foram ajustadas para que os mesmos ficassem simétricos ao centro do reservatório de aquecimento e, por consequência, simétricos ao aquecedor (Figura 44).

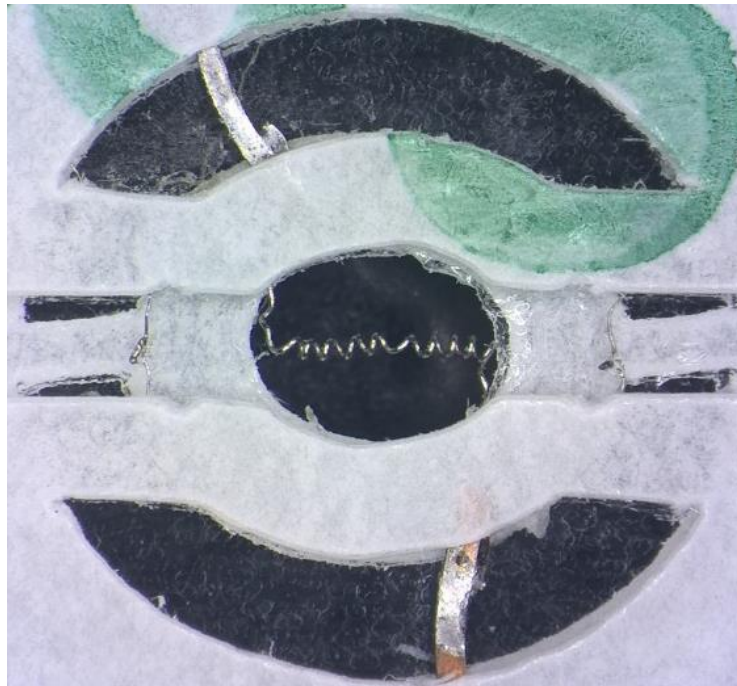


Figura 44: Detalhe do modelo 5, com o elemento aquecedor orientado na direção do canal e termopares posicionados simetricamente ao aquecedor.

A estrutura deste modelo também sofreu alteração: o microcanal de entrada foi posicionado no mesmo nível que o microcanal de saída. Na Figura 45 pode-se observar a nova disposição das camadas constituintes do dispositivo.

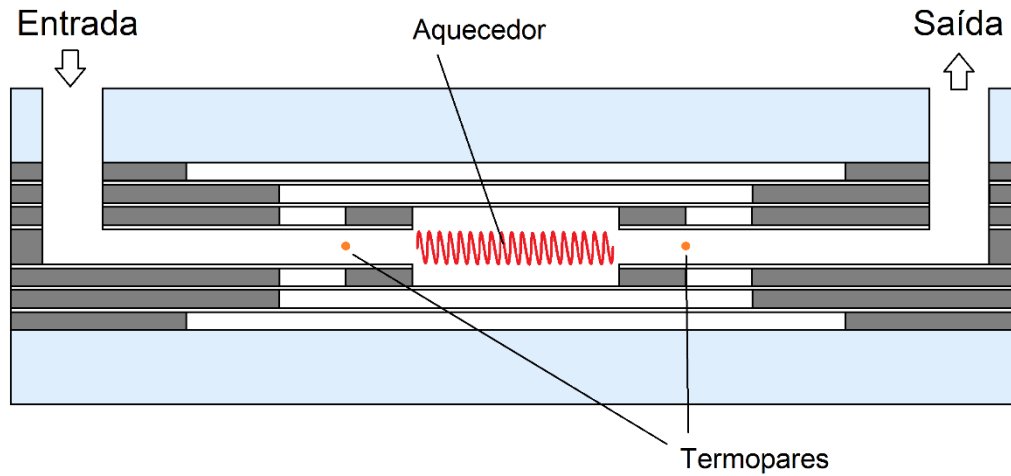


Figura 45: Nova disposição das camadas constituintes do dispositivo fora de escala. A entrada e a saída do microcanal estão niveladas.

A dimensão do microcanal de entrada e o de saída são de 1 mm de largura por 200 μm de altura, correspondente a quatro camadas de adesivo. O reservatório apresenta um formato de elipse, cuja base possui dimensões de 2,0 mm de largura por 2,5 mm de comprimento e a altura é definida por oito camadas de adesivo, totalizando 400 μm .

A sequência das camadas da estrutura microfluídica está representada na Figura 46.

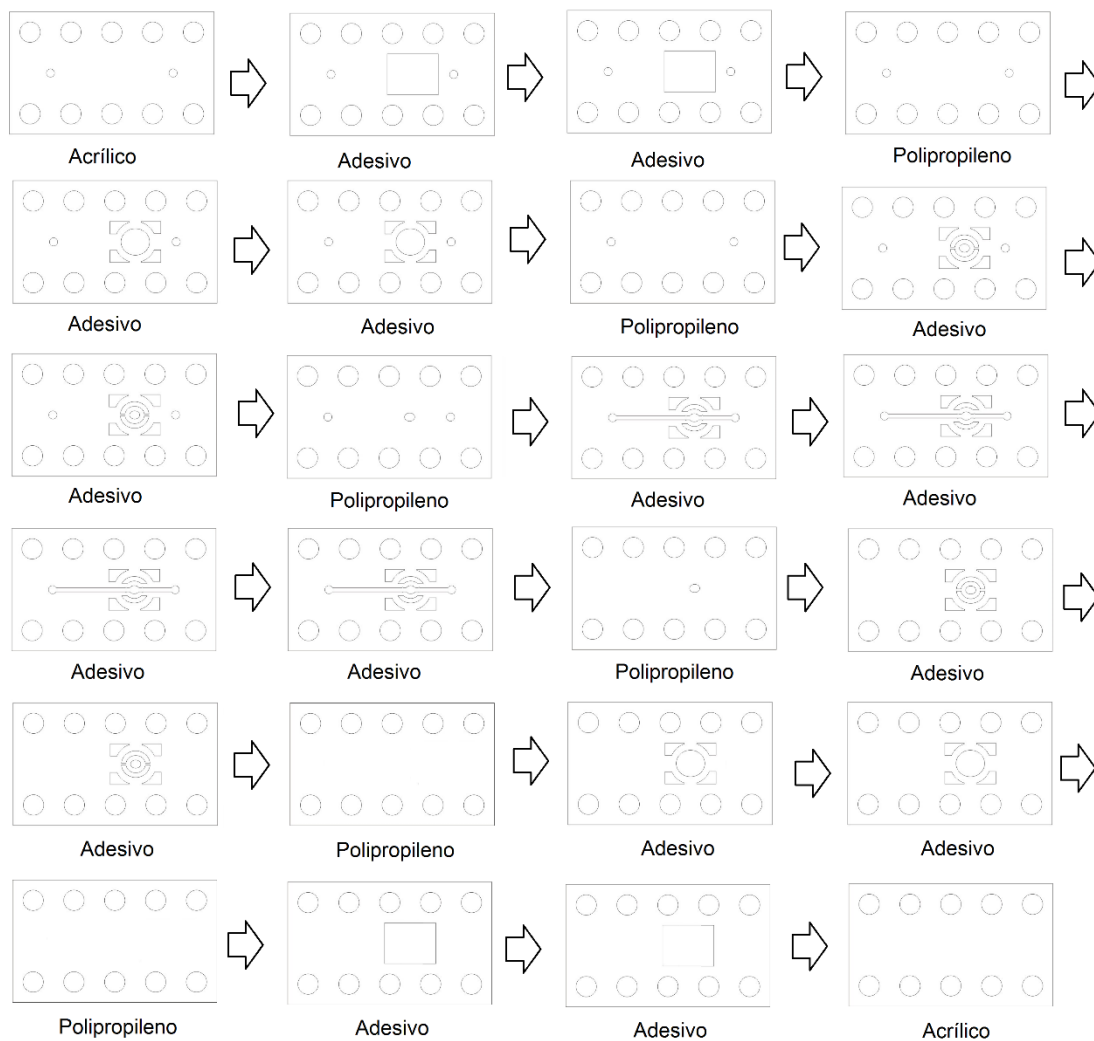


Figura 46: Camadas de materiais estruturantes do modelo 5, da camada superior à camada inferior.

3.3. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Os testes de infusão de fluidos, realizados para caracterização do sensor de vazão, utilizaram a bomba de seringa da HARVARD Apparatus modelo 11plus. As seringas utilizadas são da marca HAMILTON GASTIGHT®, nos modelos 1705TLL e 1750TLL, com os respectivos volumes de 50 μl e 500 μl . A conexão com o dispositivo é feita de forma direta, introduzindo-se uma torneira de três vias entre a seringa e o conector do escalpe para reposição de fluido (Figura 47).

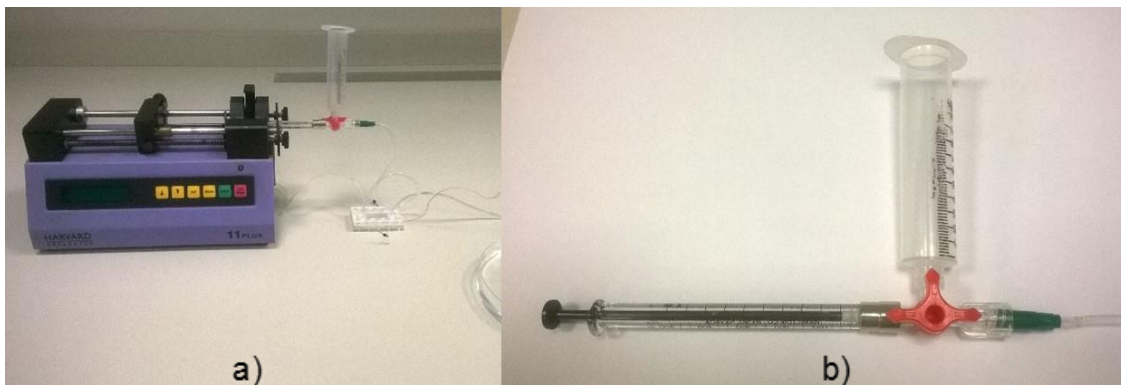


Figura 47: a) Montagem experimental para o teste de vazão por infusão e b) detalhe da conexão seringa-dispositivo.

Nesses testes são feitos o monitoramento da temperatura antes e durante o aquecimento, por meio do sistema de controle e aquisição de dados. Com a montagem do modelo 5, efetuaram-se dois tipos de análise: uma em regime transiente e outra em regime permanente (após estabilização do sistema).

Na análise em regime transiente avaliou-se a resposta do sensor à aplicação de um pulso de potência controlada. Nessa análise foi possível a determinação da posição final do termopar em relação ao reservatório de aquecimento. A análise em regime permanente possibilitou definir alguns parâmetros como a potência a ser aplicada e a faixa de vazão de operação.

A montagem experimental completa está representada na Figura 48. Esta montagem está organizada da seguinte maneira: uma bomba de seringa; o protótipo, situado no interior de uma caixa de acrílico junto com o sistema de aquisição e controle; o computador pessoal, para registro das informações enviadas pela placa Arduino DUE e uma fonte de alimentação. Todo o sistema de aquisição de dados, exceto a placa Arduino DUE, é alimentado por uma fonte de computador.

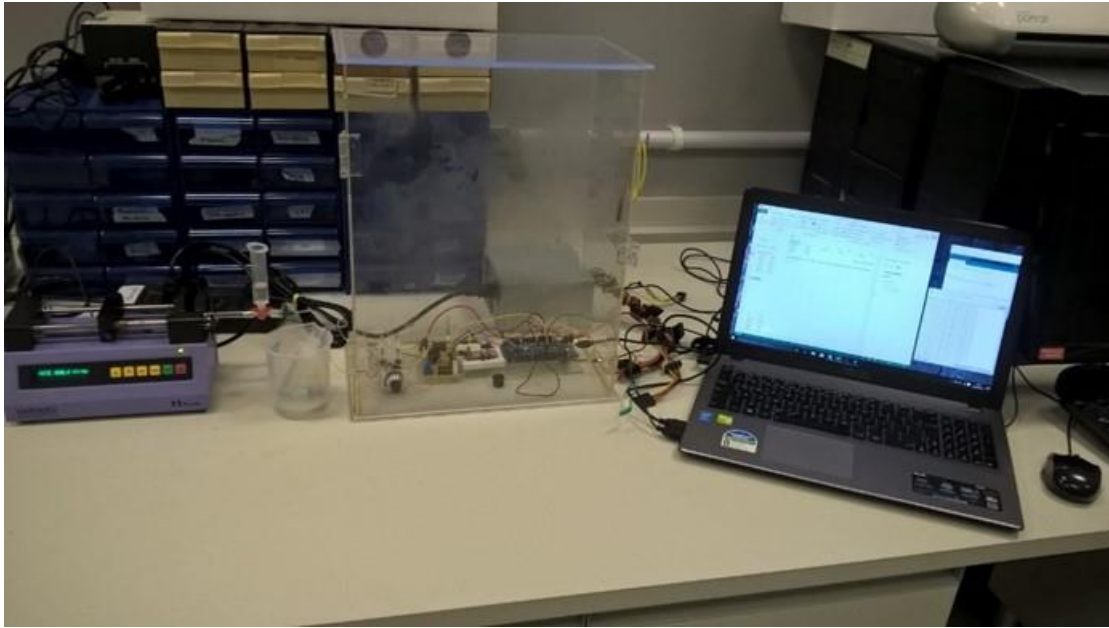


Figura 48: Montagem experimental para os testes de infusão.

3.4. MODELAMENTO A UM VOLUME DE CONTROLE

O sistema que compõe o sensor de vazão foi modelado a um volume de controle, que simplifica os cálculos em especial devido as características geométricas.

Um volume de controle é um volume arbitrário no espaço através do qual o fluido escoa. A fronteira geométrica do volume de controle é conhecida como superfície de controle, esta pode ser real ou imaginaria, pode estar em repouso ou em movimento. É sempre importante tomar cuidado em selecionar a superfície de controle, pois essa escolha tem como efeito a formulação matemática das leis físicas (FOX, MCDONALD & PRICHARD, 2010 e MASSOUD, 2005).

As equações que modelam o volume de controle são deduzidas a partir das leis de conservação de massa, quantidade de movimento e energia.

3.4.1. CONSERVAÇÃO DE MASSA

A superfície de controle pode ser atravessada por massa, assim como, por calor e trabalho. Para aplicar a lei de conservação de massa ao volume de controle é necessário conhecer todas as entradas e saídas que possibilitam fluxos de massa. E a taxa de variação mássica do sistema é dada por

$$\frac{dM}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (19)$$

Onde:

M : é a massa contida no volume de controle;

\dot{m}_e : é o fluxo mássico de entrada no volume de controle;

\dot{m}_s : é o fluxo mássico de saída do volume de controle.

Caso em que a massa do volume de controle é constante a taxa de variação mássica é igual a zero, portanto a somas das vazões mássicas de entrada é igual à soma das vazões mássicas de saída.

3.4.2. CONSERVAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO

A conservação da quantidade de movimento para o volume de controle é relacionada com a equação de Navier-Stokes que define o comportamento do escoamento. Para identificar qual é o comportamento do escoamento que atravessa o volume de controle é calculado o número de Reynolds e o de Péclet.

O número de Reynolds é importante para determinar se o escoamento tem caráter laminar ou turbulento, o número de Péclet é relacionado com as trocas de calor por condução e convecção. Números de Péclet tipicamente maiores de 100 o efeito da convecção se torna mais significativo, ou seja, no caso do sensor de vazão calorimétrico a troca de calor é basicamente por convecção térmica, e em números menores o efeito da condução térmica se torna significativo aparece então um fluxo de calor contrário ao escoamento.

O volume de controle definido para o sensor de vazão considera apenas a região central de aquecimento delimitada pelos termopares e as camadas que delimitam o canal microfluídico conforme em destaque na Figura 49.

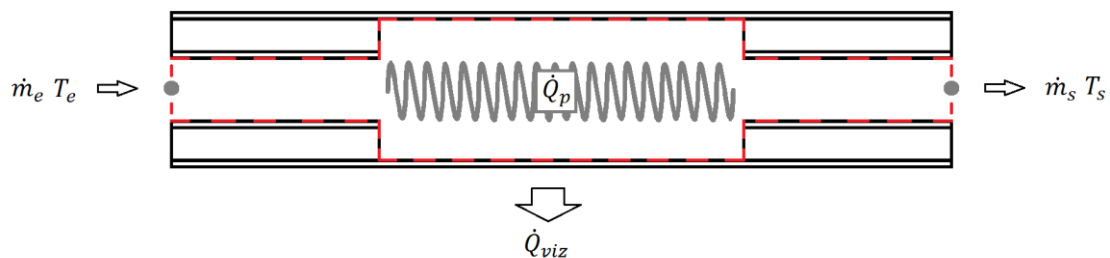


Figura 49: Esquema simplificado do Volume de controle.

Considerando que o microcanal de acesso e o de saída apresentam 1mm de largura, 200 μm de altura e os termopares estão espaçados 1mm da resistência, a velocidade característica para um microcanal com secção retangular é a velocidade média calculada pela equação 20.

$$v = \frac{\text{vazão}(\frac{\text{m}^3}{\text{s}})}{\text{área}(\text{m}^2)} \quad (20)$$

Na Tabela 3 encontra-se os valores para o número de Reynolds e Péclet para quatro vazões distintas aplicáveis ao sensor de vazão.

Tabela 3: Números de Reynolds e Péclet

Vazão ($\mu\text{L}/\text{min}$)	Re	Pe
3	0,25	1,7
15	1,2	8,7
60	5,0	35,9
120	10,0	69,7

3.4.3. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA PARA UM VOLUME DE CONTROLE

Como foi visto a superfície de controle permite a troca de calor assim como permite que o sistema sofra ou realize trabalho sobre a vizinhança (MASSOUD, 2005). A primeira lei da termodinâmica é o enunciado da conservação de energia para um sistema,

$$\delta Q - \delta W = dE, \quad (21)$$

esta equação pode ser escrita em forma de taxa

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{sistema}} = \dot{Q} - \dot{W}. \quad (22)$$

A energia total do sistema é a soma da energia interna U mais as energias cinética EC e potencial do sistema EP , que é dada por

$$E_{\text{sistema}} = U + EC + EP \quad (23)$$

e pode ser descrita na sua forma específica

$$e = u + \frac{v^2}{2} + gz \quad (24)$$

Na equação (22), \dot{Q} é a taxa total de transferência térmica pela superfície de controle com a vizinhança; \dot{W} é a taxa total de trabalho. Na equação (24), u

é a energia interna específica, v é a velocidade do sistema, g é a gravidade, e z a altura (relativa a uma referência conveniente).

A Figura 49 esquematiza um volume de controle com uma entrada de fluido e uma saída, um elemento fonte de calor que fornece \dot{Q}_p de potência para o sistema, uma taxa de transferência de calor para vizinhança \dot{Q}_{viz} e por apresentar baixo número de Péclet tem que levar em conta a taxa de calor conduzido pelo fluido \dot{q} , que alterará a temperatura da entrada do volume de controle, essa taxa é dada pela equação (25) onde k é a condutividade térmica do fluido e A_s é a área da secção transversal do microcanal.

$$\dot{q} = \frac{-kA_s \nabla T}{dx} \quad (25)$$

A taxa total de trabalho para o volume de controle em questão, com volume constante, é dada pela massa que escoar para dentro do volume de controle, para que isso ocorra, a vizinhança exerce pressão sobre a massa que está entrando. O trabalho realizado nesse caso é pela vizinhança sobre o volume de controle (trabalho negativo), com pressão local e uma velocidade, equação (26). E de modo semelhante ocorre no escoamento para fora do volume de controle, onde, o volume de controle exerce pressão sobre uma massa empurrando para vizinhança, neste caso o trabalho realizado pelo volume de controle (trabalho positivo) sobre a vizinhança (MASSOUD, 2005).

$$\dot{W} = p\dot{V} = \frac{p}{\rho}\dot{m} \quad (26)$$

Substituindo os termos na equação (22) pelos dotados neste exemplo, temos

$$\frac{dE}{dt} = (\dot{Q}_p - \dot{Q}_{viz} + \dot{q}) + \dot{W}_e - \dot{W}_s + \dot{m}_e e_e - \dot{m}_s e_s \quad (27)$$

os termos e e s são referentes a entrada e saída respectivamente. Aplicando conservação de massa ($\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$) e substituindo as equações (24), e (26) na equação (27), temos

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} = & (\dot{Q}_p - \dot{Q}_{viz} + \dot{q}) + \dot{m} \left(\frac{p_e}{\rho} + u_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) \\ & - \dot{m} \left(\frac{p_s}{\rho} + u_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \end{aligned} \quad (28)$$

A equação (27) apresenta a primeira lei da termodinâmica para o volume de controle em questão. Podemos então fazer algumas considerações: as áreas da secção transversal dos canais são iguais, por consequência as velocidades também serão. Considerando $u + p/\rho = c_p T$ pela definição de entalpia, temos

$$\frac{dE}{dt} = (\dot{Q}_p - \dot{Q}_{viz} + \dot{q}) + \dot{m}c_p T_e - \dot{m}c_p T_s \quad (29)$$

Para regime transiente temos

$$\frac{dE}{dt} = M c_p \frac{dT}{dt} \quad (30)$$

A equação diferencial para temperatura de saída do volume de controle é dada por:

$$\frac{dT}{dt} = \{\dot{Q}_p + \dot{q} + UA(T_{viz} - T) + \dot{m}c_p(T_{entrada} - T)\}/M c_p, \quad (31)$$

onde;

\dot{Q}_p é a potência no aquecedor;

\dot{q} é a taxa de transferência de calor por condução pelo fluido;

U é o coeficiente global de perdas térmicas até na saída;

A é a área lateral do volume de controle que permite troca de calor;

\dot{m} é a vazão mássica;

c_p é o calor específico do fluido a pressão constante;

M é a massa total de fluido dentro do volume de controle;

T_{viz} é a temperatura da vizinhança do volume de controle;

T é a temperatura do fluido na saída do volume de controle e

$T_{entrada}$ é a temperatura do fluido na entrada do volume de controle.

4. CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO

Os resultados serão apresentados de acordo com a sequência dos testes realizados, cujos modelos foram apresentados nas sessões anteriores. Essa sequência também contempla a evolução dos modelos e o aperfeiçoamento do sistema de controle e aquisição de dados.

4.1. CALIBRAÇÃO DO AD595AQ

O teste para calibração do amplificador operacional CI AD595AQ serviu para a conferência do fator de conversão ($10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$) indicado no *datasheet*. Preparou-se um béquer com água, elevou-se a temperatura até quase o ponto de ebulição e, com um termômetro de álcool, foi monitorado o resfriamento da água simultaneamente às medidas realizadas pelo termopar, lidas pelo CI. A curva de tensão de saída, lida pelo conversor AD, pela temperatura, está apresentada no gráfico da Figura 50.

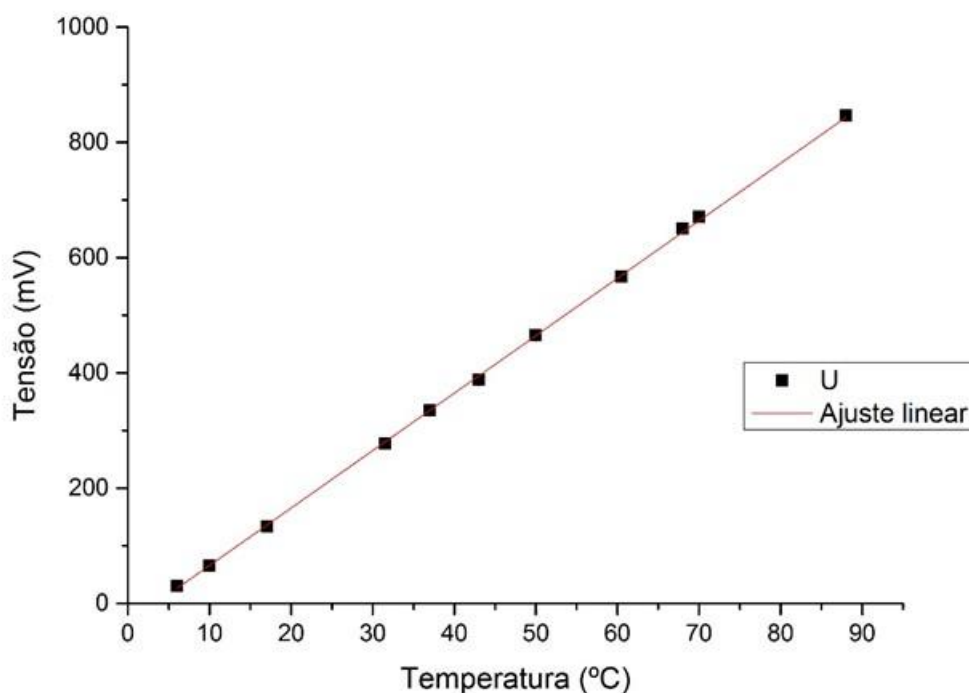


Figura 50: Curva da tensão U pela temperatura, para calibração do CI AD595AQ.

Os coeficientes gerados no ajuste linear dos pontos do gráfico da Figura 50 estão representados na Tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes gerados pelo ajuste linear obtido pelo software Origin.

Coeficiente angular		Coeficiente linear	
Valor	Erro	Valor	Erro
9,99	0,05	-34	2

O significado do valor obtido para o coeficiente angular é a resolução da tensão por grau Celsius. Comparando-o com o valor indicado no *datasheet* do CI AD595AQ, constata-se que os valores estão de acordo.

4.2. TESTE DE VAZÃO POR INFUSÃO

Nesse teste o fluido é bombeado com vazão programável pela bomba de seringa da Harvard Apparatus 11Plus. Esse teste foi empregado em todo o processo de caracterização e validação de cada modelo de protótipo, mas só a partir do modelo 3 é que apresentou resultados significativos que ajudaram a definir a estrutura microfluídica e o princípio de funcionamento do dispositivo. Os testes realizados com os protótipos de modelos 1 e 2 serviram para identificar falhas na vedação e apontar possíveis soluções para a escolha de materiais e técnicas, assim como, elaborar um passo a passo para a construção desses dispositivos.

4.2.1. RESULTADOS REFERENTES AO MODELO 3

O protótipo de modelo 3 é equipado com três termopares, um logo na entrada do dispositivo (T_e), outro no reservatório de aquecimento (T_m) e o último na saída do dispositivo (T_s). Para esse modelo foram realizados testes ditos transientes, em que é emitido um pulso de potência no resistor durante um intervalo de tempo com duração de $5,33 \pm 0,03$ s, enquanto é monitorada a temperatura nos três pontos. Foram feitas medidas para duas vazões, de $60 \mu\text{l}/\text{min}$ e $120 \mu\text{l}/\text{min}$, e para cada uma dessas vazões foram realizados três testes dos quais foi feita uma média dos valores obtidos. Nos gráficos das Figuras 51 e 52 são apresentados os resultados das médias das temperaturas obtidas nos três termopares em função do tempo.

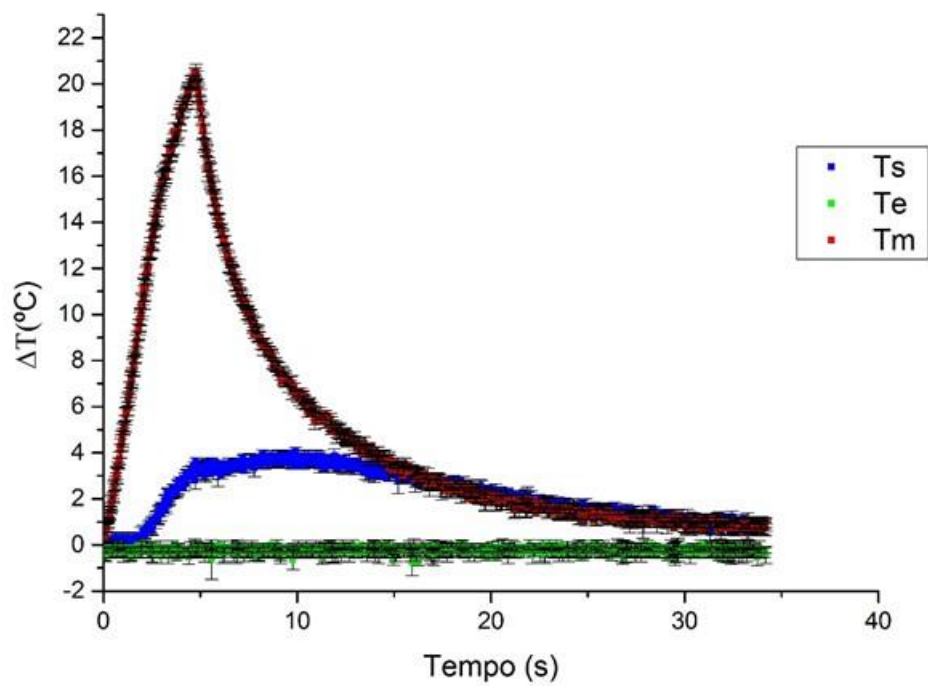


Figura 51: Gráfico do teste transiente para vazão de 60 $\mu\text{l}/\text{min}$, onde Ts são os dados para temperatura registrada na saída, Te são os dados para temperatura registrada na entrada e Tm são os dados para temperatura registrada no reservatório.

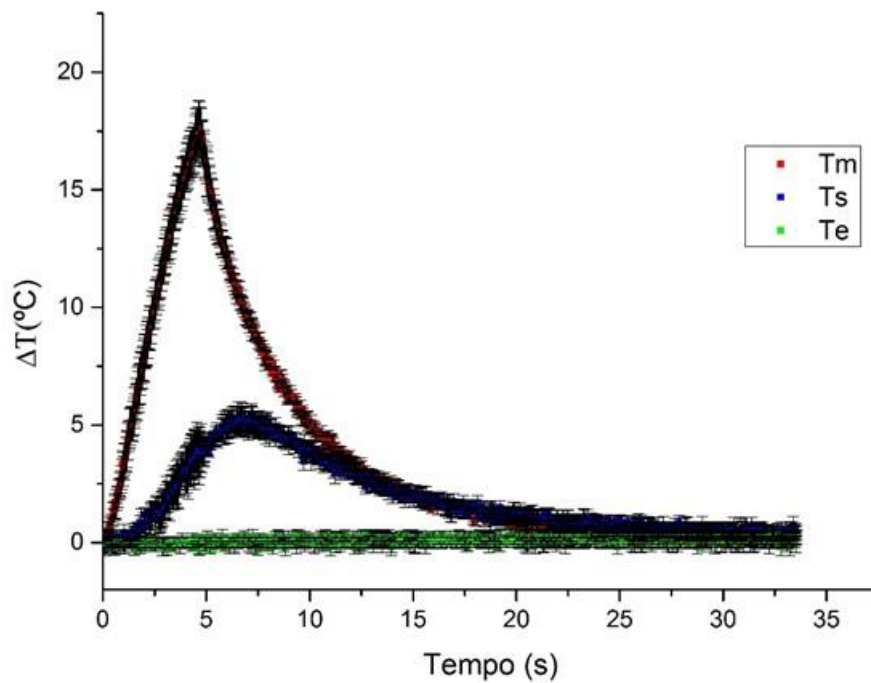


Figura 52: Gráfico do teste transiente para vazão de 120 $\mu\text{l}/\text{min}$, onde Ts são os dados para temperatura registrada na saída, Te são os dados para temperatura registrada na entrada e Tm são os dados para temperatura registrada no reservatório.

4.2.2. RESULTADOS REFERENTES AO MODELO 4

Devido aos resultados apresentados pelo modelo 3, surgiu a necessidade de se desenvolver um modelo com a finalidade de diminuir a possibilidade de vazamentos e se evitar a formação de bolhas no reservatório. Dessa maneira foi concebido o modelo 4, o qual contou também com outras melhorias, como a diminuição do diâmetro do termopar e do fio de níquel-cromo.

Para melhorar a precisão da medida de temperatura utilizou-se a placa Arduino DUE e desenvolveu-se um circuito que possibilita o monitoramento da potência no aquecedor.

Com esse modelo foram realizados testes ditos permanentes, durante os quais foi verificada a temperatura em dois pontos, na entrada do reservatório de aquecimento e na saída. A Figura 53 apresenta o gráfico do teste com vazão de 30 $\mu\text{l}/\text{min}$, com o qual se verificou um efeito até então não observado nos protótipos anteriores: a medida de temperatura apresentou uma oscilação periódica, com períodos de aproximadamente 20 segundos, para esta vazão.

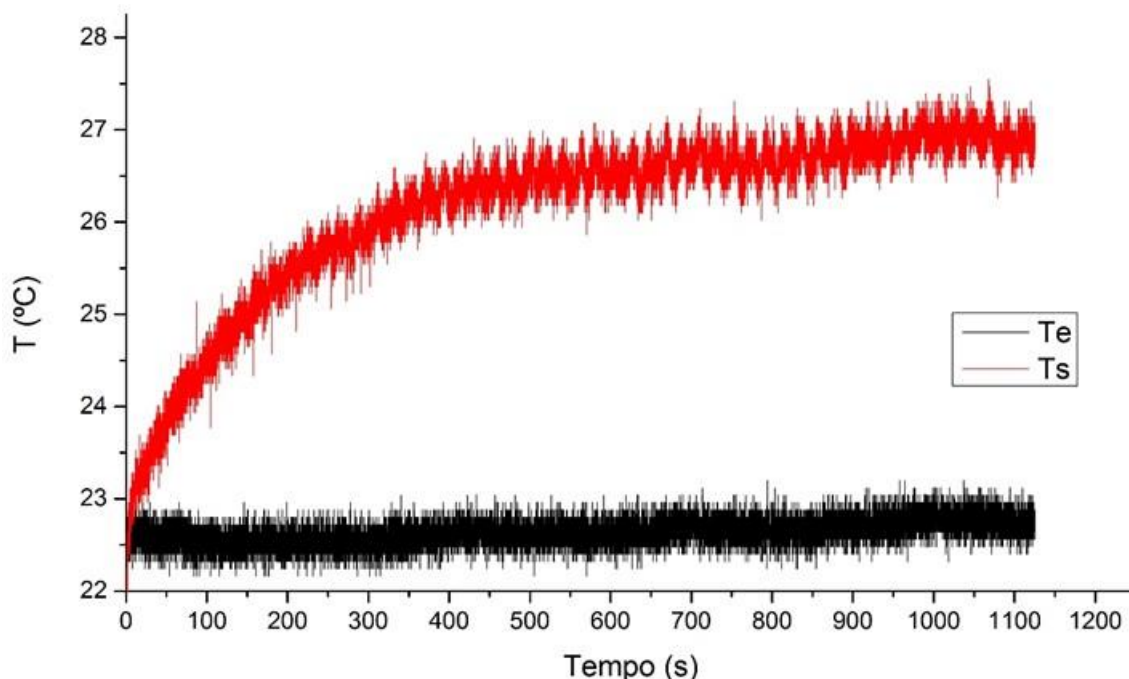


Figura 53: Gráfico do teste em regime permanente para vazão de 30 $\mu\text{l}/\text{min}$, onde Te são os dados para temperatura na entrada e Ts são os dados para temperatura na saída do reservatório.

Na Figura 54 é apresentada uma ampliação de um trecho do gráfico da Figura 53, que permite observar o comportamento oscilatório da temperatura.

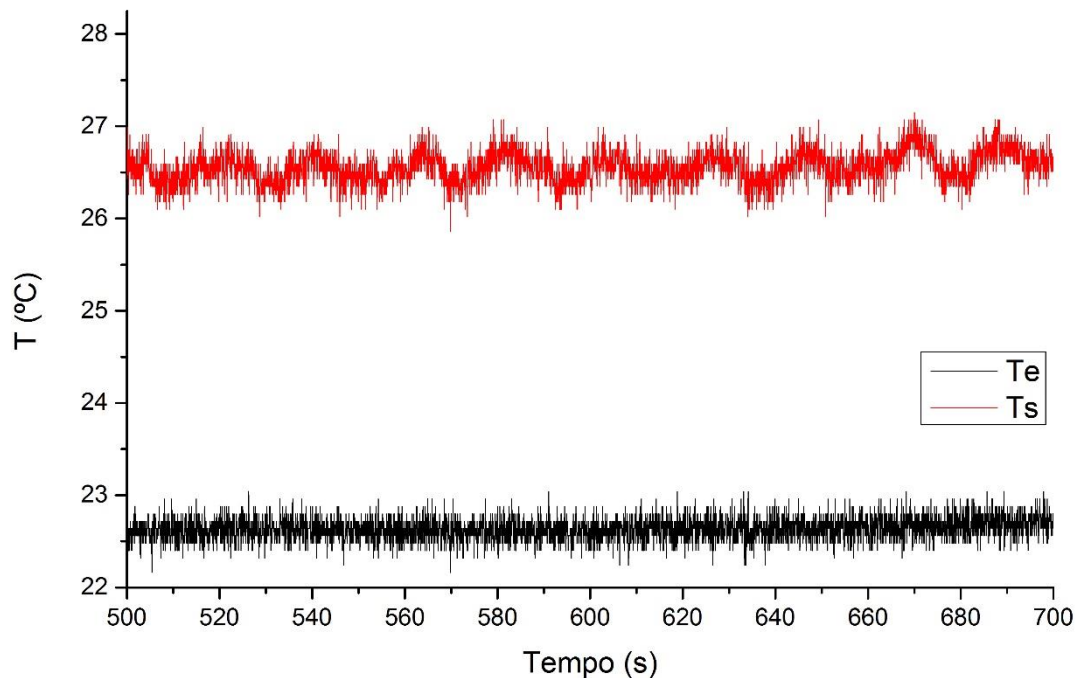


Figura 54: Ampliação do gráfico da Figura 53.

Para verificar esse efeito, realizaram-se quatro novos testes consecutivos para a mesma vazão e observou-se que o comportamento oscilatório se manteve. Esses testes foram realizados todos nas mesmas condições que o primeiro e os resultados são apresentados no gráfico da Figura 55. A diferença nos resultados é explicada pela presença de bolhas de ar no reservatório. O teste T1 foi o primeiro, por isso que não teve influência de bolhas, registrando assim um comportamento mais estável que nos demais testes.

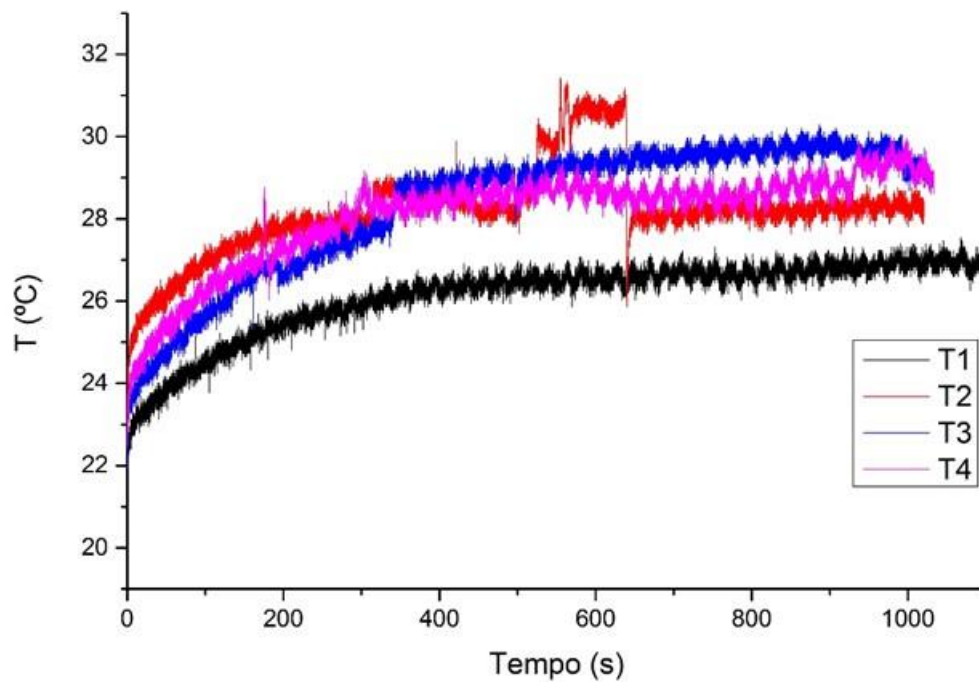


Figura 55: Gráfico para testes com vazão de 30µl/min, para o modelo 4.

Na Figura 56 são apresentados dois gráficos: um da temperatura na saída do reservatório e outro da potência dissipada no aquecedor em função do tempo.

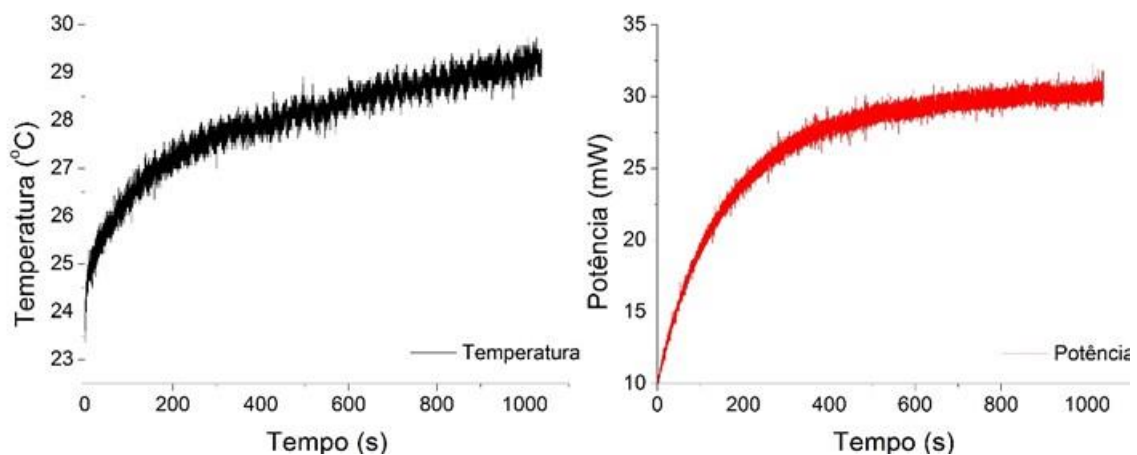


Figura 56: Gráficos da temperatura na saída do reservatório e da potência do aquecedor.

Como verificado no segundo gráfico (Figura 56), a potência não é constante, varia em torno de 300 % do seu valor inicial. Isso se deve ao fato de

que, no circuito elétrico transistorizado, da forma em que foi feita a ligação, qualquer variação da resistência no emissor do transistor varia a tensão aplicada na base do mesmo, que por sua vez, libera mais corrente e, desta forma, a potência no resistor aumenta.

4.2.3. RESULTADOS REFERENTES AO MODELO 5

O modelo 5 foi o último protótipo desenvolvido e com esse modelo foram realizados testes para verificação da faixa de vazão de funcionamento do dispositivo. O circuito desenvolvido para alimentação do resistor garantiu estabilidade na potência fornecida ao aquecedor, apresentando flutuações máximas de 0,5 %. Dessa maneira, manteve-se a potência no aquecedor constante em 10 mW, a menor potência testada com intuito de não aquecer o fluido a ponto de fazê-lo entrar em ebulição e, por consequência, gerar bolhas no interior do reservatório de aquecimento.

No gráfico da Figura 57, estão representadas duas curvas para o teste com vazão de 7,2 $\mu\text{l}/\text{min}$: a que explicita os dados obtidos para a diferença de temperatura entre os termopares (o da entrada e o da saída do microcanal) em função do tempo e a respectiva curva de potência no aquecedor em função do tempo.

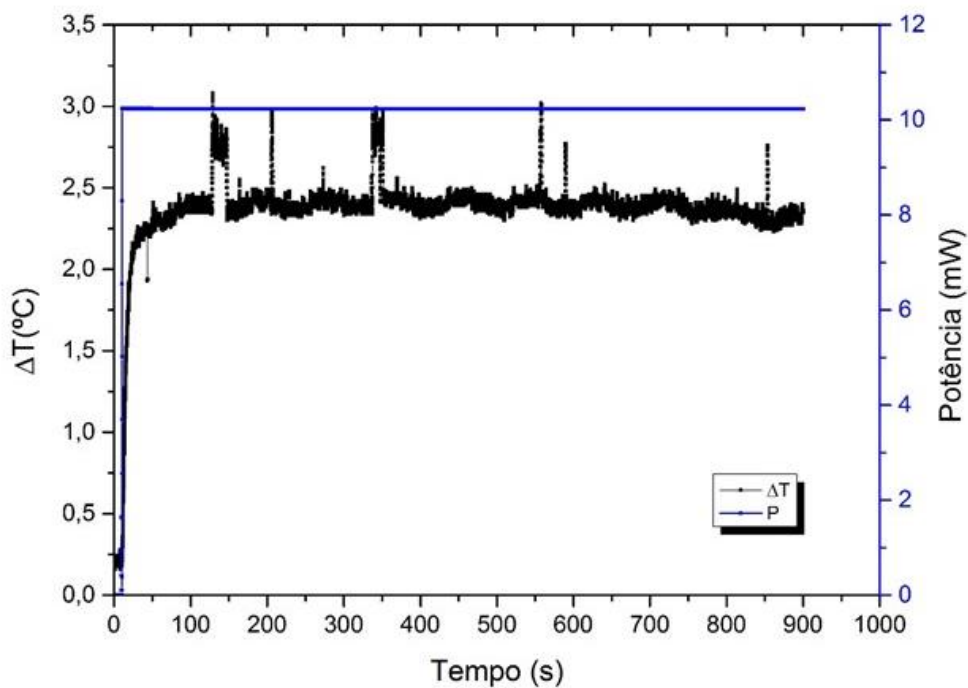


Figura 57: Gráfico da variação de temperatura para vazão de 7,2 $\mu\text{l}/\text{min}$ em função do tempo e da potência no aquecedor em função do tempo.

Foram feitas outras medidas da variação de temperatura nos termopares para vazões de 0,2 $\mu\text{l}/\text{min}$ a 10 $\mu\text{l}/\text{min}$. Nestes testes utilizou-se a seringa de 50 μl de volume. O gráfico da Figura 58 apresenta os resultados obtidos.

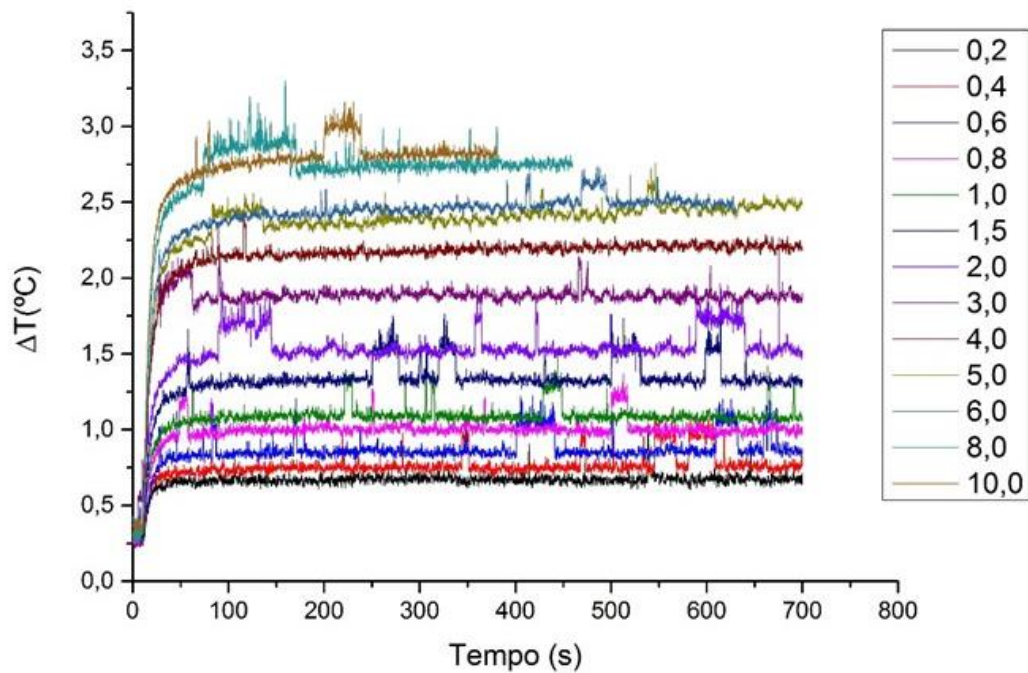


Figura 58: Curvas da variação de temperatura para testes realizados com a seringa de 50 μl , nas vazões indicadas na legenda, em $\mu\text{l}/\text{min}$.

A partir desses dados, calculou-se, para cada vazão, a média do valor da variação de temperatura após a estabilização do sistema, que ocorre depois de 100 segundos, o erro associado a cada valor da média é calculado pelo valor da dispersão dos deltas de temperaturas. A partir disso, construiu-se o gráfico da Figura 59, que apresenta os valores de ΔT para cada vazão.

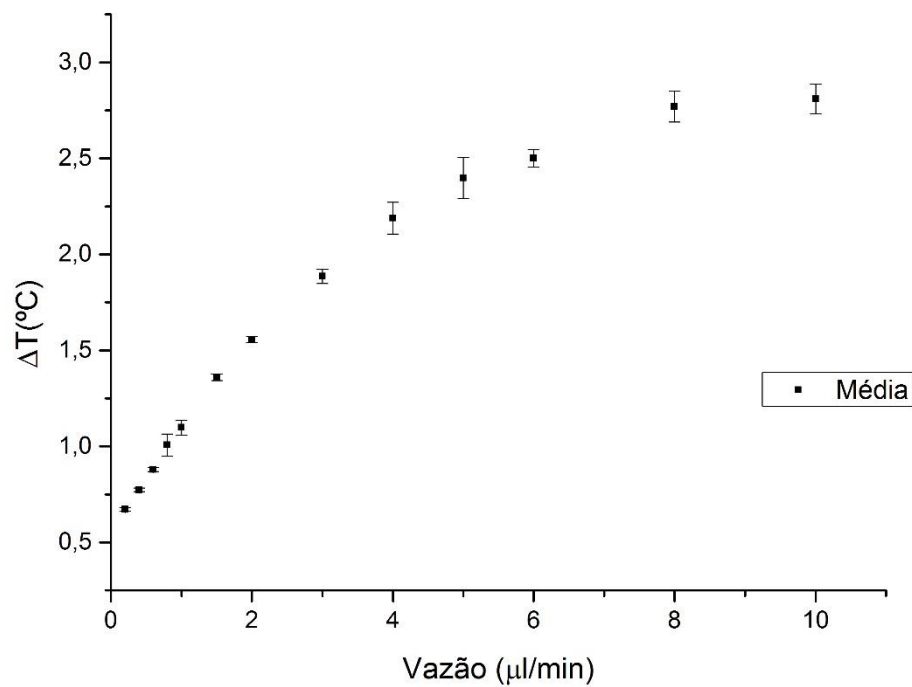


Figura 59: Curva das médias dos ΔT para cada vazão, utilizando a seringa de 50 μl .

Essa curva obtida para o sensor de vazão proposto (Figura 59) mostra um comportamento semelhante aos resultados obtidos por Dijkstra *et al.* (2008), Schöler *et al.* (2004) e Patsis *et al.* (2012). Apenas para baixas vazões é relatada uma tendência linear para o comportamento da variação da temperatura em função da vazão, permitindo um ajuste linear e, assim, uma relação $\Delta T \times \text{Vazão}$ (\dot{V}) para a faixa de 0,2 a 3,0 $\mu\text{l}/\text{min}$, conforme mostra a Figura 60.

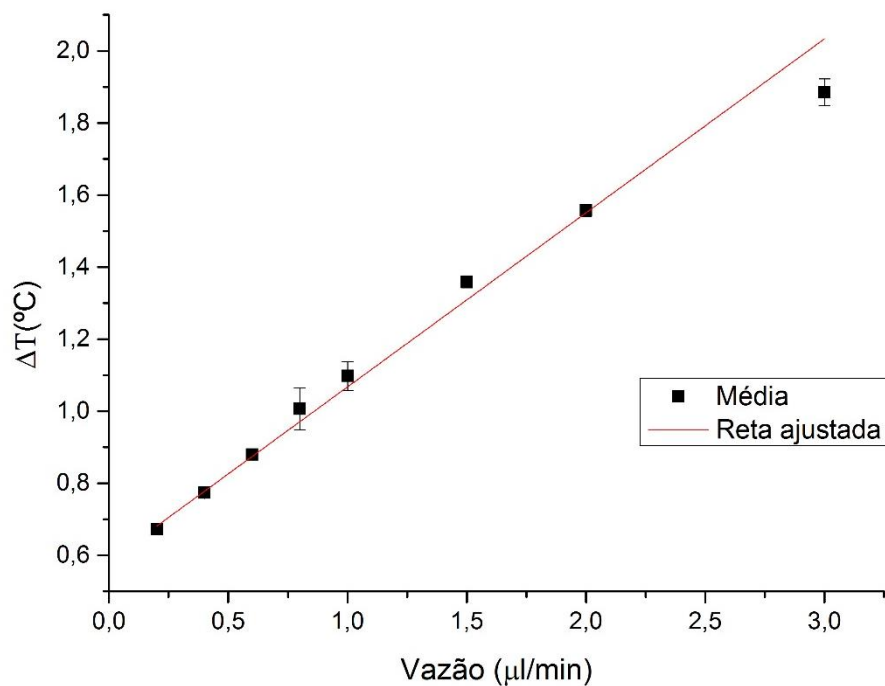


Figura 60: Gráfico da variação da temperatura em função da vazão para a faixa de 0,2 a 3,0 μl/min e ajuste linear dos dados.

Os coeficientes da equação da reta ajustada para a parte cujo comportamento é linear encontram-se na Tabela 4.

Tabela 5: Coeficientes da reta ajustada aos valores do gráfico na Figura 63.

Y=AX+B	Valor	erro
A	0,584	0,015
B	0,483	0,016

Partindo disso, podemos escrever a equação característica do sensor calorimétrico para esta faixa de vazão.

$$\Delta T = 0,584 \cdot \dot{V} + 0,483 \quad (32)$$

Assim a vazão pode ser calculada por:

$$\dot{V} = 1,712 \cdot \Delta T - 0,827 \quad (33)$$

Na Figura 61 está o gráfico da vazão calculada pela equação (33) pela vazão programada na bomba de infusão.

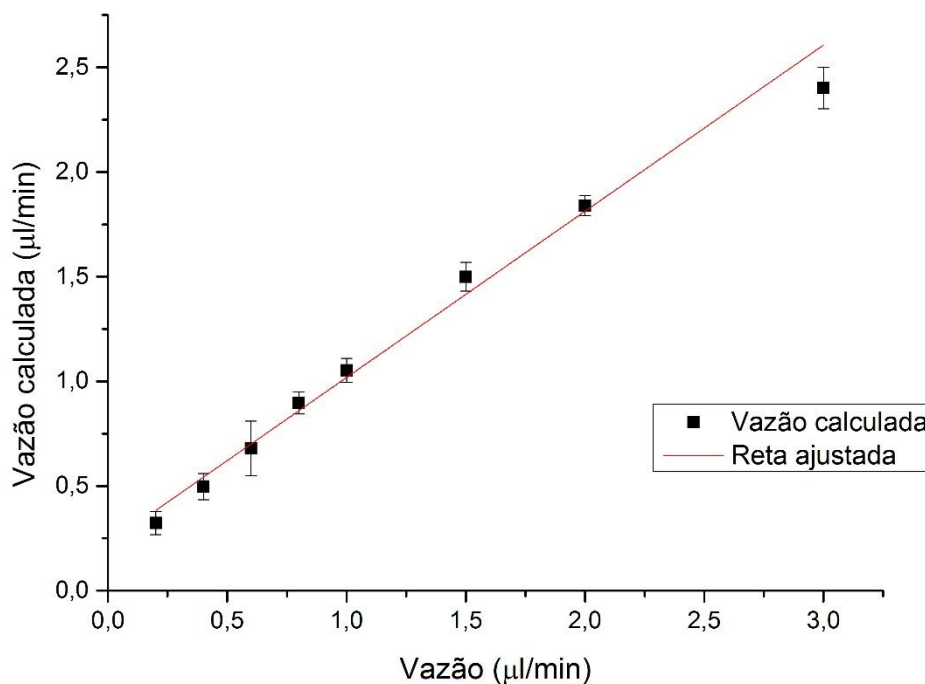


Figura 61: Gráfico da vazão calculada pela vazão proveniente da bomba de infusão.

O ajuste linear obtido no gráfico da vazão calculada pela vazão programada (Figura 61) evidencia a eficiência do dispositivo proposto para medir vazões na faixa de 0,2 a 3,0 µl/min, com erro de fundo de escala menor que 10%.

Da mesma forma, foram feitas medidas da variação de temperatura para vazões maiores, utilizando-se a seringa de 500 µl, a partir das quais obtém-se o gráfico da Figura 62, que contém as curvas para as vazões de 10 a 100 µl/min.

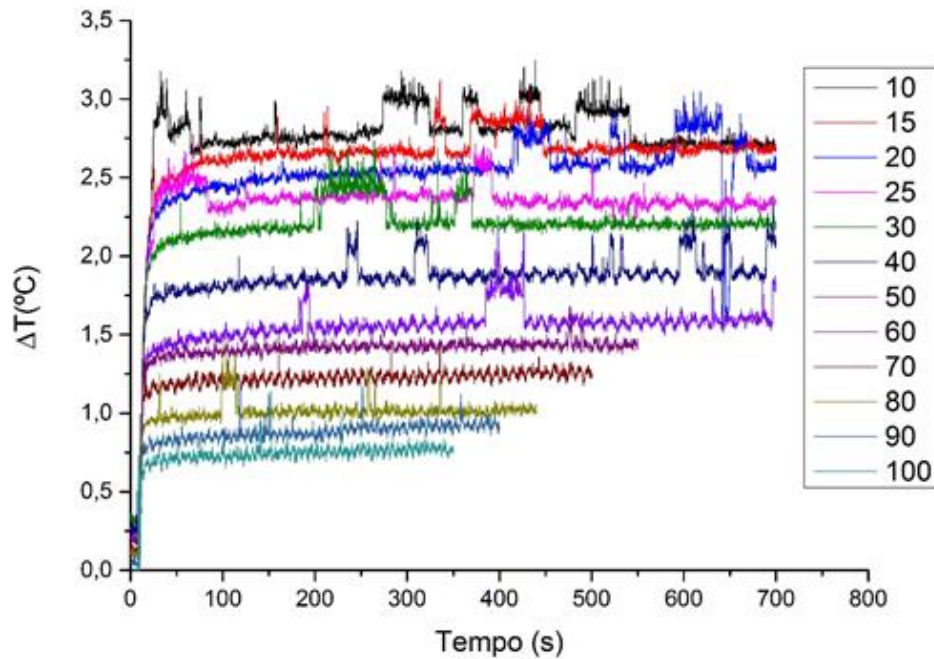


Figura 62: Curvas da variação de temperatura para as vazões indicadas na legenda, em $\mu\text{l}/\text{min}$. Valores obtidos para teste realizado com a seringa de $500 \mu\text{l}$.

De maneira semelhante ao que foi feito com o resultado dos testes com a seringa de $50 \mu\text{l}$, calculou-se, para cada vazão, a média do valor da variação de temperatura após a estabilização do sistema, ou seja, posterior a 100 segundos. Também os valores de cada ΔT com a sua respectiva vazão encontram-se representados no gráfico da Figura 63.

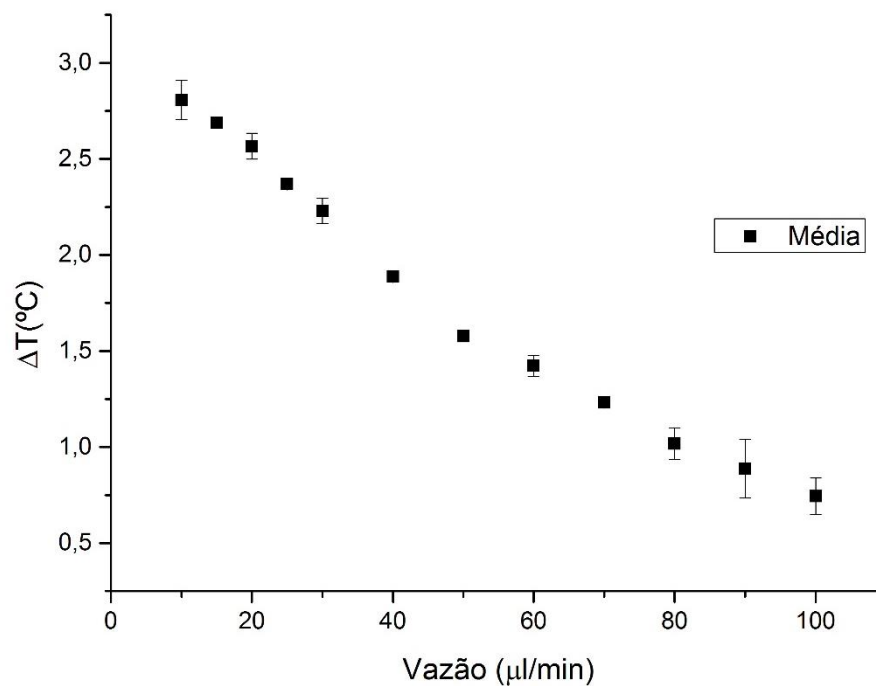


Figura 63: Gráfico da média da variação de temperatura para os testes realizados com a seringa de 500 μl .

Para todos os dados já apresentados, obtidos nos testes com o modelo 5, as faixas de medidas de vazão consideradas são apenas aquelas que apresentam erro de fundo de escala menor que 10 %. As medidas que apresentaram erro maior do que 10 % foram descartadas.

Em relação aos dados de variação de temperatura obtidos para a faixa de vazão de 10 a 100 $\mu\text{l}/\text{min}$, já foi identificado um indício sobre o comportamento térmico do sensor, como mostra no gráfico da Figura 64.

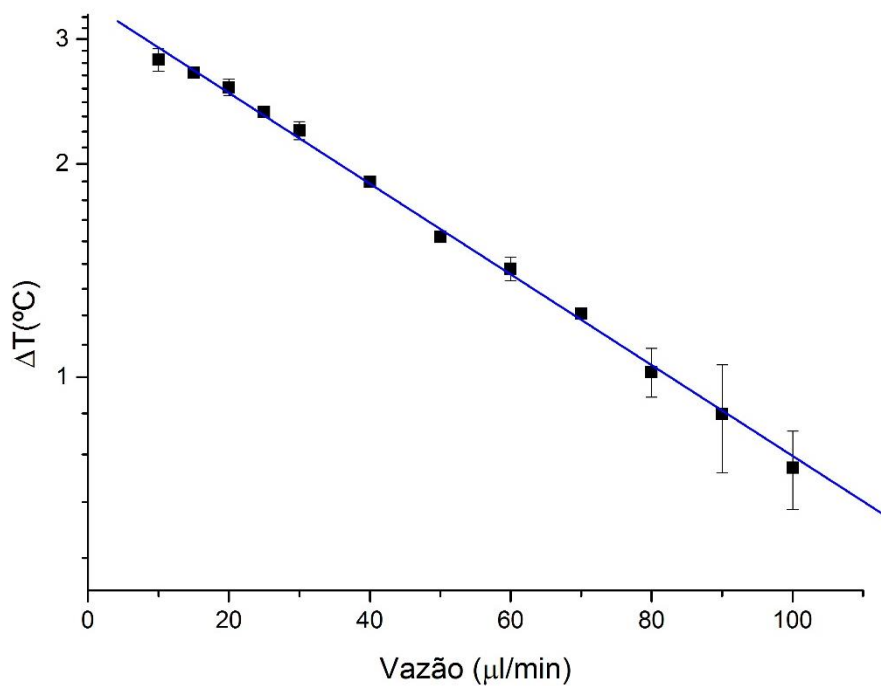


Figura 64: Gráfico do indício de um comportamento exponencial para a dependência da variação de temperatura em função da vazão.

Juntando os resultados dos testes da seringa de 50 μl (Figura 59) com os da seringa de 500 μl (Figura 63), obtém-se a curva característica do sensor vazão (Figura 65).

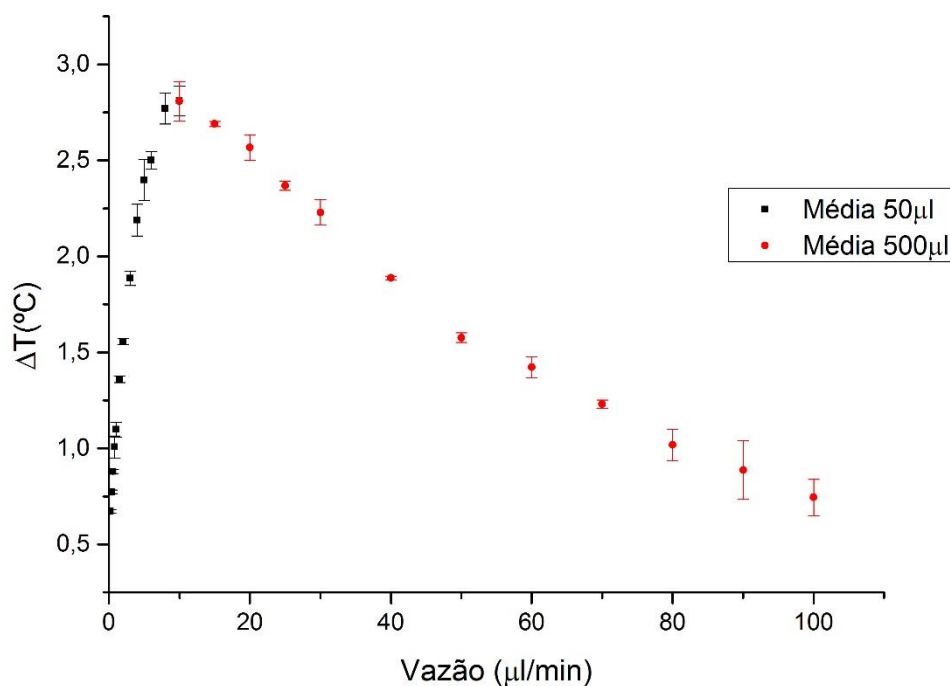


Figura 65: Curva característica do sensor de vazão.

A razão deste comportamento está diretamente associada à faixa de vazão e tem muito a ver com o número de Peclet, isto é, com os processos de transporte de calor que dominam em vazões reduzidas e em vazões elevadas.

Em vazões muito reduzidas o número de Peclet também é reduzido, o que significa que os processos de condução de calor, associados à difusão do calor no fluido, dominam o transporte de calor. Sendo assim o calor se propaga por condução na direção do sensor da entrada (contra a vazão do fluido) e eleva sua temperatura, reduzindo o ΔT medido. Em vazões elevadas o número de Peclet é elevado, o que significa que o transporte de calor ocorre por transporte de massa. Se a vazão é muito elevada o aquecedor não tem tempo para aumentar a temperatura do fluido em relação à sua temperatura inicial, e por isto o ΔT cai com o aumento da vazão. Na região intermediária existe uma competição entre os mecanismos de transporte o que produz o máximo da curva, em uma condição onde o processo condução de calor contra a vazão do fluido se reduz e a vazão ainda é reduzida o suficiente para que ocorra o aumento da temperatura do fluido no elemento aquecedor.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sensor de vazão calorimétrico para aplicação em sistemas microfluídicos, utilizando materiais poliméricos de baixo custo em sua estrutura.

Na concepção do protótipo foram verificados os parâmetros principais para garantir a confiabilidade do sensor térmico de vazão. Mediante um estudo breve da literatura da área, foram identificados três elementos fundamentais para melhoramento do funcionamento do sensor térmico de vazão; são eles: o isolamento térmico, o sensor de temperatura e o elemento aquecedor.

A seleção dos materiais para a confecção do sensor proposto foi pensada para garantir esses três parâmetros, aliando um baixo custo. Para o isolamento térmico propôs-se uma combinação de fita de laminação da 3M, de 50 μm de espessura, associada a filme de polipropileno, de 10 μm de espessura, de maneira a se obter cavidades vazias para se reduzir a transferência de calor por condução. O aquecedor foi elaborado de forma a garantir maior transferência de calor para o fluido, ficando suspenso numa região do canal adaptada para não haver nenhum contato entre o aquecedor e as paredes do microcanal. A forma geométrica adotada para o elemento aquecedor foi a helicoidal, forjada utilizando-se fio de níquel-cromo com diâmetro de 56 μm , apresentando diâmetro interno de 78 μm , diâmetro externo de 190 μm e comprimento de 2,5 mm, dimensões estas compatíveis com a do microcanal do dispositivo. Os termopares da marca OMEGA do tipo K, com 13 μm de diâmetro e com tempo de resposta inferior a 2 ms, garantiram sensibilidade menor que 0,05 $^{\circ}\text{C}$ ao sensor de temperatura.

Além disso, o sistema de aquisição de dados escolhido é composto pela placa Arduino DUE, que oferece um grande poder de processamento com *clock* de 84 MHz, e, associado a um conversor AD de 16 bit de resolução, permitiu realizar medidas de temperatura com resolução de 0,005 $^{\circ}\text{C}/\text{bit}$.

O sistema de bombeamento do fluido prejudicou a precisão dos testes, oferecendo flutuações na vazão durante tais testes. Essa flutuação fica evidente nos resultados obtidos com os modelos 4 e 5.

Os testes para a caracterização do sensor térmico de vazão revelaram dois comportamentos distintos, um para baixas vazões (menores que 10 $\mu\text{l}/\text{min}$)

e outro para vazões maiores que 10 $\mu\text{l}/\text{min}$. Para vazões reduzidas o número de Peclet também é reduzido ($Pe < 1,7$), o que significa que os processos de condução de calor, associados à difusão, dominam o transporte do mesmo. Sendo assim o calor alcança o sensor de entrada e eleva sua temperatura, reduzindo o ΔT medido. Em vazões mais elevadas o número de Peclet ($1,7 < Pe < 36$) aumenta e o transporte de calor ocorre por condução, contra e a favor o fluxo, assim como por transporte de massa, a favor do fluxo. Neste caso os ΔT medidos são mais elevados e atingem um valor máximo. Em vazões muito elevadas ($Pe > 36$) a transferência de calor é dominada pelo transporte de massa, e devido ao baixo tempo de interação entre fluido e aquecedor, o ΔT se reduz novamente.

REFERÊNCIAS

- 3M, Fitas e Adesivos Industriais 3M do Brasil Ltda, Fita Adesivo Transferível para Laminação 3M -YR-9767, Dados Técnicos, ed. 4, 2011.
- ABGRALL, P. e GUE, A. M. Lab-on-a-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem – A review. *J. Micromech. Microeng.*, n. 17, R15-R49, 2007.
- BATCHELOR, G.K. An introduction to fluid dynamics. USA: Cambridge University Press, (Reprinted 2002).
- BEEBY, S. et al. MEMS Mechanical Sensors. Boston: Artech House Inc., 2004.
- BRUUS, H. Theoretical Microfluidics, N.Y: Oxford University Press, 2008.
- ĆERIMOVIĆ, S.; TALIC, A.; KOHL, F.; BEIGELBECK, R.; SCHALKO, J.; JACHIMOWICZ, A., Micromachined Flow Sensors Enabling Electrocalorimetric and TOF Transduction. *Procedia Chemistry*, Vol 1, p. 132–135, (2009)
- CHUNG, W. Y. A New Design of a Micro Flow Sensor for Wide-Range Flow Sensing. *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 49, No. 3, p. 1225-1228, 2006.
- COLLINS, J.; LEE, A. P., Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics – Flow Rate Measurements, Methods, p. 708-718, 2008.
- COLTRO, W. K. T. et al. Microsistemas de análises químicas. Introdução, tecnologias de fabricação, instrumentação e aplicações. *Química Nova*, Vol. 8, n. 30, 2007.
- DALRI, G. A. Desenvolvimento de um dispositivo para medição de vazão em sistemas microfluídicos. 21º EVINCI, UFPR, vol. 1, p. 48, 2013.
- DE MELLO, A.J. Control and detection of chemical reactions in microfluidic systems. *Nature*, v.442, n.27, p. 394-402, 2006.
- DIJKSTRA, M.; DE BOER, M.J.; BERENSCHOT, J.W.; LAMMERINK, T. S. J.; WIEGERINK, R.J.; ELWENSPOEK, M., Miniaturized thermal flow sensor with planar-integrated sensor structures on semicircular surface channels. *Sensors and Actuators A* 143, p.1–6, 2008.

- DITTRICH, P.S.; MANZ, A. Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery. *Nature Reviews Drug Discovery*, v. 5, n. 3, p. 210-218, 2006.
- DORNELAS, K. L. Fabricação de dispositivo microfluídicos a base de papel utilizando materiais de baixo custo. Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas da UFMG. Dissertação de Mestrado. 2013.
- FILHO, S. S. M. Microfabricação de um analisador em fluxo-batelada (micro flow-batch) à base de polímero fotocurável uretano-acrilato. João Pessoa, Programa de pós-graduação em química, UFPB. Dissertação de mestrado, 2010.
- FONSECA, A. Construção e avaliação de microssistemas para análise em fluxo. Campinas, Programa de pós-graduação em química, Unicamp. Tese de doutorado, 2008.
- FOX, R. W. MACDONALD, A. T. PRITCHARD, P. J. Introdução à mecânica dos fluidos. SP: Editora LTC. ed.7, 2010.
- FUNG, C. K. M.; SIN, M. L. Y.; LEI, T. K. F.; CHOW, W. W. Y.; LAI K. W. C.; LI, W. J., Flow Rate Measurement Inside Polymer Microfluidic Systems Using Carbon Nanotube Sensors – IEEE, p. 541-544, 2005.
- GRAVESEN, P. Microfluidics: a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, England, v.3, p. 168-182, 1993.
- JANASEK, D.; FRANZKE, J.; MANZ, A. Scaling and the design of miniaturized chemical analyses systems. *Nature*, v. 447, n. 27, p. 374-380, 2006.
- JUN, C. H. et al., Fabrication of highly sensitive thermal microflow sensor with surface-micromachined vacuum platform for gas and liquid applications, *Micromachining and Microfabrication Process Technology VII*, Proceedings of SPIE Vol. 4557, 2001.
- KIM, T. H.; KIM, S. J. Development of a micro-thermal flow sensor with thin-film thermocouples. *J. Micromech. Microeng.*, Vol 16, p. 2502–2508, 2006.
- KOIZUMI, H. A micro flowmeter based on the measurement of a diffusion temperature rise of a locally heated thermal flow in a Hagen–Poiseuille flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 34, p. 19-26, 2013.

- KOPPARTHY, V. et al., Highly sensitive continuous flow microfluidic chip sensor with integrated bi/sb thermopile for biochemical applications, *Journal of the Mississippi Academy of Sciences*, v. 59, p. 387-390, 2014.
- KOVARIK, M. L.; GACH, P. C.; ORNOFF, D. M.; WANG, Y.; BALOWSKI, J.; FARRAG, L.; ALLBRITTON, N. L. Micro Total Analysis Systems for Cell Biology and Biochemical Assays. *Analytical Chemistry*, v. 84, p. 516–540, 2012.
- KUO, J. T. W.; YU, L.; MENG, E. Micromachined Thermal Flow Sensors—A Review, *Micromachines*, v. 3, p. 550-573, 2012.
- LAMMERINK, T. S. J.; TAS, N.R.; ELWENSPOEK M.; FLUITMAN, J. H. J., Micro-liquid flow sensor. *Sensor Actuat A Phys* p.37–38, p. 45–50, 1993.
- MADOU, M. J. *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*. CRC PRESS. Washington, USA. 2^a ed. 2002.
- MALUF, N.; WILLIAMS, K. *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. Norwood: Artech House Inc., 2004.
- MASSOUD, M. *Engineering Thermofluids. Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- MIELLI, M. Z., *Sensor de Vazão para Aplicação em Sistemas Microfluídicos*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, São Paulo, 2012.
- MIRALLES, V. et al., A Review of Heating and Temperature Control in Microfluidic Systems: Techniques and Applications, *Diagnostics*, v. 3, p. 33-67, 2013.
- MORAN, M. J. & SHAPIRO, H. N. *Princípios de termodinâmica para engenharia*. LTC, Rio de Janeiro, ed. 6, 2009.
- NGUYEN, N. T.; WERELEY, S. *Fundamentals and applications of microfluidics*. 3. s.l. : Artech House, 2002.
- OOSTERBROEK, R. E.; BERG, A. V. D. *Lab-on-a-chip miniaturized systems for (bio)chemical analysis and synthesis* . s.l. : Elsevier, 2003.

- PATSI, G. P.; PETROPOULOS, A.; KALTSAS G., Modelling and evaluation of a thermal microfluidic sensor fabricated on plastic substrate. *Microsyst Technol*, ed. 18, p.359-364, 2012.
- PETROPOULOS, A. & KALTSAS, G., Study and Evaluation of a PCB-MEMS Liquid Microflow Sensor, *Sensors*, v. 10, p. 8981-9001, 2010.
- REYES, D. R. et al. Micro total analysis systems.1.Introduction,theory and technology. *Anal.Chem.* 74, 2002.
- SANTANA, P. P.; SEGATO, T. P.; CARRILHO, E.; LIMA, R. S.; DOSSI, N.; KAMOGAWA, M. Y.; GOBBI, A. L.; PIAZZETA, M. H.; PICCIN, E. Fabrication of glass microchannels by xurography for electrophoresis applications. *Analyst*, v. 138, p.1660 – 1664, 2013.
- SILVESTRI, S. & SCHENA, E., Micromachined Flow Sensors in Biomedical Applications – Review. *Micromachines*, v. 3, p. 225-243, 2012.
- SCHNEIDER, L. B. Desenvolvimento de um chip microfluídico para diagnóstico em saúde pública: prova de conceito. 153 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- SCHÖLER, L.; LANGE, B.; SEIBEL, K.; SCHÄFER, H.; WALDER, M.; FRIEDRICH, N.; EHRHARDT, D.; SCHÖNFELD, F.; ZECH, G.; BÖHM M., Monolithically integrated micro flow sensor for lab-on-chip applications. *Microelectronic Engineering*, ed. 78–79, p.164-170, 2005.
- TANAKA, Y. et al., Micro Flow Sensor for Microreactor, Yokogawa Technical Report English Edition No. 47, 2009.
- VASCONCELOS, S. & SAUL, C. K. Real Time Water Specific Heat Capacity Measurement System for Environmental Applications. In: 6th Ibero-American Congress on Sensors IBERSENSOR 2008, São Paulo. p. 348-353, 2008.
- WEBSTER, J. G. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, CRC PRESS, 1999.
- WEIGAND, B. *Analytical Methods for Heat Transfer and Fluid Flow Problems*. Springer, Berlim, 2004.

WHITE, F. M. *Viscous Fluid Flow*. McGraw-Hill, ed.3, New York, 2006.

WHITESIDES, G. M. The origins and the future of microfluidics. *Nature*, v. 442, n. 27, p. 368-373, 2006.

YAGER, P. et al. Microfluidic diagnostic technologies for global public health. *Nature*, v. 442, n. 27, p. 412-418, 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Código do programa para placa Arduino Due.

```
#include <Wire.h>
#include <Nanoshield_ADC.h>
#include <math.h>
#include <Servo.h>

Servo myservo;
Nanoshield_ADC16 adc;

int a;

float vx, vy, vz, vw, xi, yi, zi, x, y, z, w, amp, p, ti, tx;

int onPin = 7;

const int numLeitura = 10;           // define o número de medidas para média.
int divisor = numLeitura - 1;
int ind = 0;

float Leituras[numLeitura], Leiturasx[numLeitura], Leiturasy[numLeitura], Leiturasz[numLeitura];
float totalx = 0, totaly = 0, totalz = 0, totalw = 0;
float mediax = 0, mediay = 0, mediaz = 0, mediaw = 0;
float subx[numLeitura], suby[numLeitura], subz[numLeitura], subw[numLeitura];
float somasubx = 0, somasuby = 0, somasubz = 0, somasubw = 0;
float argumentox = 0, argumentoy = 0, argumentoz = 0, argumentow = 0;
float desvipadx = 0, desvipady = 0, desvipadz = 0, desvipadw = 0;

int escrevenaserial (float x, float vx, float y, float vy, float z, float w, float amp, float p, float tx) {
  Serial.print(x, 3); Serial.print(" "); Serial.print(vx, 3); Serial.print(" ");
  Serial.print(y, 3); Serial.print(" "); Serial.print(vy, 3); Serial.print(" ");
  Serial.print(z, 4); Serial.print(" "); Serial.print(w, 4); Serial.print(" ");
  Serial.print(amp, 6); Serial.print(" "); Serial.print(p, 5); Serial.print(" ");
  Serial.println(tx, 0);
  return 1;
}

void setup(){
  Serial.begin(38400);
  pinMode(onPin, OUTPUT);
  digitalWrite(onPin, LOW);
}
```

```

myservo.attach(9);
myservo.write(0);
adc.begin();
adc.setSampleRate(860);
for ( int zerador = 0; zerador < numLeitura; zerador++) {
  Leiturax[zerador] = 0; Leituray[zerador] = 0; Leituraz[zerador] = 0; Leituraw[zerador] = 0;
  subx[zerador] = 0; suby[zerador] = 0; subz[zerador] = 0; subw[zerador] = 0;
}
Serial.println(" Digita um valor:");          // valor pode ser de 0 a 9 depende do numero de while
Serial.println("0 - nao executa nada");
Serial.println("1 - executa teste estacionario com 2 termopares");
Serial.println("2 - executa teste estacionario com 2 termopares");
Serial.println("3 - executa teste troca de fluido com 2 termopares com duracao 3min");
delay (1000);
}
void loop(){
  if (Serial.available()) {
    digitalWrite(onPin, LOW);
    byte executa;
    executa = Serial.read();
    a = map(executa, 48, 57, 0, 9);          // define valor de 0 a 9 do teclado para 0 a 9 inteiro
    tx = 0;
    ind = 0;
    while (a != 0) {
      analogReadResolution(12);
      int currentMillis = millis();
      ti = currentMillis;
      while (a == 1) {                      // Executa teste estacionário com 2 termopares e controle de potência 3,3V
        if (tx < 10000) {
          digitalWrite(onPin, LOW);
        }
        else if (tx >= 10000) {
          digitalWrite(onPin, HIGH);
        }
        totalx = totalx - Leiturax[ind];    // subtrai o antigo valor da leitura para temp
        Leiturax[ind] = adc.readVoltage(0)+0.02; // grava o atual valor da leitura
        totalx = totalx + Leiturax[ind];    // soma os valores das leituras
      }
    }
  }
}

```

```

mediax = totalx / numLeitura;    // calcula a média da leitura para tempX
somasubx = somasubx - subx[ind]; // subtrair o antigo valor da subtração leitura - média
subx[ind] = Leiturax[ind] - mediax; // grava em subx a atual subtração leitura - média
subx[ind] = subx[ind] * subx[ind]; // grava em subx o valor do quadrado da subtração leitura - média
somasubx = somasubx + subx[ind]; // soma os valores do quadrado da subtração leitura - média
argumentox = somasubx / divisor; // calcula o argumento da raiz quadrada
desvipadx = sqrt(argumentox);    // calcula o valor do desvio padrão em tempX
x = mediax * 100;                // temperatura Referencia de 3,3V e 10mV/°C
vx = desvipadx * 100;           // desvio padrão na leitura da temperatura em °C
totaly = totaly - Leituray[ind]; // subtrair o antigo valor da leitura para tempY
Leituray[ind] = adc.readVoltage(1); // grava o atual valor da leitura
totaly = totaly + Leituray[ind]; // soma os valores das leituras
mediay = totaly / numLeitura;    // calcula a média da leitura para tempY
somasuby = somasuby - suby[ind]; // subtrair o antigo valor da subtração leitura - média
suby[ind] = Leituray[ind] - mediay; // grava em suby a atual subtração leitura - média
suby[ind] = suby[ind] * suby[ind]; // grava em suby o valor do quadrado da subtração leitura - média
somasuby = somasuby + suby[ind]; // soma os valores do quadrado da subtração leitura - média
argumentoy = somasuby / divisor; // calcula o argumento da raiz quadrada
desvipady = sqrt(argumentoy);    // calcula o valor do desvio padrão em tempY
y = mediay * 100;                // temperatura Referencia de 3,3V e 10mV/°C
vy = desvipady * 100;           // desvio padrão na leitura da temperatura em °C
totalz = totalz - Leituraz[ind]; // subtrair o antigo valor da leitura
Leituraz[ind] = adc.readVoltage(2); // grava o atual valor da leitura
totalz = totalz + Leituraz[ind]; // soma os valores das leituras
mediaz = totalz / numLeitura;    // calcula a média da leitura
somasubz = somasubz - subz[ind]; // subtrair o antigo valor da subtração leitura - média
subz[ind] = Leituraz[ind] - mediaz; // grava em subz a atual subtração leitura - média
subz[ind] = subz[ind] * subz[ind]; // grava em subz o valor do quadrado da subtração leitura - média
somasubz = somasubz + subz[ind]; // soma os valores do quadrado da subtração leitura - média
argumentoz = somasubz / divisor; // calcula o argumento da raiz quadrada
desvipadz = sqrt(argumentoz);    // calcula o valor do desvio padrão
z = mediaz;                      // tensão Referencia de 3,3V
vz = desvipadz;                  // desvio padrão na leitura da tensão V
totalw = totalw - Leituraw[ind]; // subtrair o antigo valor da leitura
Leituraw[ind] = adc.readVoltage(3); // grava o atual valor da leitura
totalw = totalw + Leituraw[ind]; // soma os valores das leituras
mediaw = totalw / numLeitura;    // calcula a média da leitura

```

```

somasubw = somasubw - subw[ind]; // subtraí o antigo valor da subtração leitura - média
subw[ind] = Leituraw[ind] - mediaw; // grava em subz a atual subtração leitura - média
subw[ind] = subw[ind] * subw[ind]; // grava em subz o valor do quadrado da subtração leitura - média
somasubw = somasubw + subw[ind]; // soma os valores do quadrado da subtração leitura - média
argumentow = somasubw / divisor; // calcula o argumento da raiz quadrada
desvipadw = sqrt(argumentow); // calcula o valor do desvio padrão
w = mediaw; // tensão Referencia de 3,3V
vw = desvipadw; // desvio padrão na leitura da tensão V
amp = ( z - w ) / 28.7;
p = amp * w ;
ind = ind + 1;
tx = millis() - ti; // atualiza o valor do tempo
int ok = escrevenaserial (x, vx, y, vy, z, w, amp, p, tx);
if (ind >= numLeitura) {
    ind = 0;
}
} //end while a==1
while (a == 2) { // Executa teste troca de fluido
    if (tx < 10000) {
        digitalWrite(onPin, LOW);
        myservo.write(0);
    }
    if (tx >= 10000 & tx < 200000) {
        digitalWrite(onPin, HIGH);
        myservo.write(0);
    }
    if (tx >= 200000 & tx < 400000) { // regulagem do tempo da troca de fluido
        digitalWrite(onPin, HIGH);
        myservo.write(90);
    }
    if (tx >= 400000 & tx < 600000) { // regulagem do tempo da troca de fluido
        digitalWrite(onPin, HIGH); // Controle de Potência
        myservo.write(0);
    }
    if (tx >= 600000) {
        digitalWrite(onPin, LOW);
        myservo.write(0);
    }
}

```

```

    tx = 0;
    Serial.println(" Aperte RESET ");
    delay (1000);
  }
// Repetição do trecho da linha (totalx = totalx - Leiturax[ind]; ) até a linha (vw = desvpadw; )
  amp = ( z - w ) / 28.7;
  p = amp * w ;
  ind = ind + 1;
  tx = millis() - tj;      // atualiza o valor do tempo
  int ok = escrevenaserial (x, vx, y, vy, z, w, amp, p, tx);
  if (ind >= numLeitura) {
    ind = 0;
  }
} //end while a==2
while (a == 3) {          // Executa teste estacionário
  if (tx < 10000) {
    digitalWrite(onPin, LOW);
    myservo.write(0);
  }
  if (tx >= 10000 & tx < 75000) {
    digitalWrite(onPin, HIGH);
    myservo.write(0);
  }
  if (tx >= 75000 & tx < 150000) { // regulagem do tempo da troca de fluido
    digitalWrite(onPin, HIGH);
    myservo.write(90);
  }
  if (tx >= 150000 & tx < 225000) { // regulagem do tempo da troca de fluido
    digitalWrite(onPin, HIGH); // Controle de Potencia
    myservo.write(0);
  }
  if (tx >= 225000) {
    digitalWrite(onPin, LOW);
    myservo.write(0);
    tx = 0;
    Serial.println(" Aperte RESET ");
    delay (1000);
  }
}

```

```
    }  
    // Repetição do trecho da linha (totalx = totalx - Leiturax[ind]; ) até a linha (vw = desvipadw; )  
    amp = ( z - w ) / 28.7;  
    p = amp * w ;  
    ind = ind + 1;  
    tx = millis() - ti;      // atualiza o valor do tempo  
    int ok = escrevenaserial (x, vx, y, vy, z, w, amp, p, tx);  
    if (ind >= numLeitura) {  
        ind = 0;  
    }  
} //end while a==3  
} //end while a!=0  
} // end if(Serial.available())tempo  
} // end Loop
```