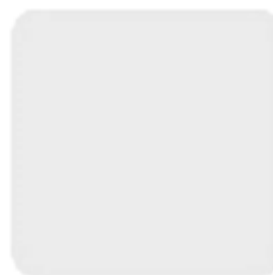


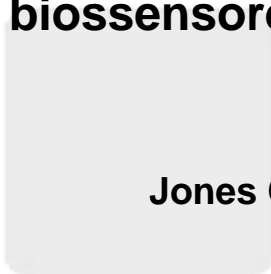
**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Campus João Pessoa**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



Dissertação de Mestrado

**Projeto e desenvolvimento de minibomba
peristáltica usando medição de vazão, aplicada a
biossensores**



Jones Clécio Otaviano Dias Júnior



**João Pessoa - PB
Julho, 2016**

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Campus João Pessoa**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Projeto e desenvolvimento de minibomba
peristáltica usando medição de vazão, aplicada a
biossensores**

Jones Clécio Otaviano Dias Júnior

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como requisito necessário para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Sinais.

Cleumar da Silva Moreira, Dr.
Orientador

Arlindo Garcia de Sá Barreto Neto, Dr.
Co-Orientador

**João Pessoa - PB
Julho, 2016**

**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Campus João Pessoa**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Projeto e desenvolvimento de minibomba
peristáltica usando medição de vazão, aplicada a
biossensores**

Jones Clécio Otaviano Dias Júnior

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em: __/__/2016.

Banca examinadora:

Prof. Cleumar da Silva Moreira, Dr. (IFPB)
Orientador

Prof. Arlindo Garcia Sá de Barreto Neto, Dr. (IFPB)
Co-Orientador

Prof. Cleonilson Protásio de Souza, Dr. (UFPB)
Examinador

Prof. Ilton Luiz Barbacena, Dr. (IFPB)
Examinador

Profa. Silvana Luciene do N. Cunha Costa, Dra. (IFPB)
Examinadora

**João Pessoa - PB
Julho, 2016**

Resumo

A minibomba peristáltica de roletes é uma boa alternativa para sistemas que requeiram o transporte de fluidos de forma laminar, contínua e controlada, como é o caso do sensoriamento biológico baseado na ressonância de plásmons de superfície ou SPR (*Surface Plasmon Resonance*). Nesse sentido, este trabalho apresenta o projeto e desenvolvimento de uma minibomba peristáltica de roletes, acionada por um motor de passo conectado a uma caixa de redução mecânica, associando-os a programação de sua estrutura de acionamento, de modo a possibilitar o ajuste dos parâmetros do motor para um controle em malha aberta da vazão de saída para esses sistemas. Foram desenvolvidos projetos de três diferentes atuadores, com 2, 3 e 4 roletes, usando o *software Solidworks* em plástico ABS, bem como atuadores de nylon com as mesmas características. A implementação utilizou uma impressora 3D usando plástico ABS para a sua prototipagem, e usinagem para os atuadores de nylon. A estrutura da minibomba de roletes possui dimensões de 100 milímetros quadrados em sua superfície e 55 mm de altura, sendo realizados de forma otimizadas em função da vazão volumétrica. Foram realizados testes com água e álcool diluído em água (álcool 20%) com os atuadores de plástico ABS, a uma rotação de 10 a 100 RPM, sendo percebido um melhor comportamento da minibomba à uma de 80 RPM (sendo esta utilizada para ajuste do motor para os tubos de látex e de silicone). Com uso do tubo de látex, obteve-se uma vazão máxima, para 2 roletes, de 22,5 ml/min com água e 20,5 ml/min com álcool diluído na água (álcool 20%, sendo esta a proporção usada para todos os casos), para o atuador com 3 roletes, obteve-se 20,5 ml/min com água e 18,5 ml/min com álcool diluído na água e, para 4 roletes, foi obtido 20,5 ml/min com água e 18,0 ml/min com álcool diluído em água. Uma segunda estrutura foi montada para a obtenção das vazões máximas para os atuadores usando o tubo de silicone, obtendo uma vazão máxima, para 2 roletes, de 27,5 ml/min com água e 22,0 ml/min com álcool diluído em água, com o atuador de 3 roletes, obteve-se 27,5 ml/min com água e 22,5 ml/min com álcool diluído em água e, para 4 roletes, foi obtido uma vazão máxima de 17,5 ml/min com água e 16,0 ml/min com álcool diluído em água. Contudo, para uma rotação superior a 80 RPM, para os dois casos (tubo de látex e silicone) não foram observadas quaisquer variações da vazão para nenhum dos protótipos. O sistema proposto para mensurar a vazão é composto de um microcontrolador para aquisição

e processamento dos dados e circuitos de condicionamento do sinal. Na mesma estrutura também foi desenvolvida uma interface para visualizar e permitir a interação com a minibomba no tocante à indicação da vazão, calibrada em função da rotação do motor. A interface com o usuário é realizada usando um display tipo LCD e botões que permitem indicar a vazão desejada. Foram realizados, ainda, testes com a pressão hidrostática e sua correlação com a vazão medida. Finalmente, a minibomba peristáltica de roletes proposta apresenta características dimensionais que possibilitam a portabilidade e um baixo consumo de potência, pois a fonte utilizada para a alimentação da minibomba é a mesma que alimenta o Arduino, sendo esta uma fonte externa de 12V com uma corrente de 1A, tendo assim uma potência consumida de 12W.

Palavras-chave: Minibomba peristáltica; Sensores Biológicos; Medição de vazão.

Abstract

The peristaltic roller minipump is a good alternative to systems that require the transport of fluids laminar, continuous and controlled, such as the biological sensing plasmon resonance based on surface or SPR (Surface Plasmon Resonance). In this sense, this paper presents the design and development of a peristaltic minipump rollers, driven by a stepper motor connected to a mechanical reduction box, associating them with programming your drive structure, to enable the adjustment of parameters motor for open loop control of the output flow for these systems. Three different actuator designs were developed with 2, 3 and 4 rollers, using SolidWorks software ABS plastic, nylon and actuators with the same characteristics. The implementation used a 3D printer using ABS plastic for their prototyping and machining for nylon actuators. The structure of the minipump rollers has dimensions of 100 square millimeters on the surface and 55 mm in height, being made so optimized as a function of volumetric flow. Tests were carried out with water and alcohol diluted with water (alcohol 20%) as ABS plastic actuators at a rotation of 10 to 100 RPM being perceived better behavior of the minipump at 80 rpm (this being used to adjust motor to latex and silicone tubes). With use of the latex tube, there was obtained a maximum flow to rollers 2, 22.5 ml / min of water and 20.5 ml / min with alcohol diluted in water (20% ethanol, which is the ratio used to all cases), for the actuator roller 3, 20.5 ml / min of water and 18.5 ml / min with alcohol diluted in water and obtained to rollers 4, there was obtained 20.5 mL / min with water and 18.0 ml / min with alcohol diluted in water. A second structure was to obtain the maximum flow rate for the actuators using the silicone tube, achieving a maximum flowrate for two rollers, of 27.5 ml / min of water and 22.0 ml / min with alcohol diluted in water with the actuator roller 3, there was obtained 27.5 ml / min of water and 22.5 ml / min with alcohol diluted in water and to rollers 4, a maximum flow rate of 17.5 ml / min was obtained water and 16.0 ml / min with alcohol diluted in water. However, for a top speed of 80 RPM, for the two cases (latex and silicone tube) were not observed any changes of the flow rate for any of the prototypes. The system proposed for measuring the flow rate comprises a microcontroller for acquisition and processing of data and signal conditioning circuitry. The same structure was also developed an interface to display and allow interaction with the minipump as regards the indication of the flow rate calibrated in engine speed function. The user interface is performed

using an LCD display type and buttons that let you specify the desired flow. Were performed also tests with the hydrostatic pressure and its correlation with the measured flow. Finally, the peristaltic minipump rollers proposal has dimensional characteristics which enable portability and low power consumption because the font used to feed the minipump is the same that feeds the Arduino, which is an external source of 12V with a current 1A, thus having a power consumption of 12W.

Keywords: *Peristaltic minipump; biologic sensors; flow measurement.*

Lista de Siglas e Abreviaturas

SPR - *Surface Plasmon Resonance*

3D - *Três Dimensões*

ABS - *Acrilonitrila Butadieno Estireno*

RPM - *Rotação por Minuto*

LCD - *Liquid Crystal Display*

ELISA - *Enzyme Linked Immunosorbent Assay*

PCR - *Polymerase Chain Reaction*

UFCG - *Universidade Federal de Campina Grande*

IFPB - *Instituto Federal da Paraíba*

DNA - *Deoxyribonucleic Acid*

QCM - *Mircrobalança de Cristal de Quartzo*

CI - *Circuito Integrado*

Lista de Símbolos

μl - *Micro litro*

ml - *Mili litro*

min - *Minutos*

mm - *Milímetro*

mm^2 - *Milímetro quadrado*

cm - *Centímetro*

$^{\circ}\text{C}$ - *Graus Celsius*

cmH_2O - *Centímetro d'água*

Lista de Figuras

1: Estrutura de um biossensor, evidenciando os seus elementos e componentes ..	21
2: Funcionamento da bomba peristáltica de roletes e linear - adaptada de Alindo (2013)	24
3: (a) bomba de seringa, modelo LSP01-1C, fabricada pela "Baoding Longer Precision Pump Co., Ltd.", com taxa de infusão variando de 0; 831 nl/min - 10,84 ml/min, pesando 3,5 kg; (b) modelo nacional, Ligneá BSS 100, fabricado por BIOSENSOR)	25
4: Diagrama do projeto da minibomba peristáltica de roletes	27
5: Desenho técnico com o projeto da base da minibomba	30
6: Engrenagem I para redução mecânica do motor de passo	30
7: Engrenagem II para redução mecânica do motor de passo	30
8: Desenho técnico com o projeto da base para fixação do rotor e do tudo de látex e/ou de silicone	31
9: Desenho técnico com o projeto da base do atuador	31
10: Desenho técnico com o projeto da tampa para o atuador	31
11: Desenho técnico com o projeto da tampa da minibomba	32
12: Montagem da minibomba peristáltica com três roletes a ser desenvolvida	33
13: Diferentes tipos de atuadores - adaptada de Alindo (2013)	34
14: Fixação do Arduino Mega e do drive para o motor de passo	34
15: Fluxograma de funcionamento dos botões da interface de controle da minibomba peristáltica de roletes	36
16: Sequencia de interfaces para controle e acionamento da minibomba (a) Menu Inicial; (b) Menu Sentido e; (c) Menu Volume	37
17: Ilustração do projeto da "caixa" para o controle da vazão (a) e "caixa" para controle após prototipagem (b)	38
18: Descrição do atuador de nylon para a minibomba peristáltica de roletes	38
19: Sistema medidor/controlador de vazão para a minibomba peristáltica de roletes	40
20: Sistema de teste em malha aberta para a minibomba peristáltica de roletes	41

21: Estrutura de teste montada para realização dos testes de vazão máxima e mínima da minibomba peristáltica com os três atuadores (dois, três e quatro roletes)	42
22: Gráfico do desempenho da minibomba para os três atuadores (RMP x ml/min) com indicação da faixa de melhor desempenho, valores não satisfatórios e rotação ótima para funcionamento da minibomba	43
23. Configuração para teste e cálculo da pressão hidrostática de saída da minibomba	45
24: Estrutura para padronização dos testes (mesmo nível; 7,0 cm acima do nível e; 7,0 cm abaixo do nível)	45
25: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de dois roletes com tubo de látex	47
26: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de três roletes com tubo de látex	48
27: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de quatro roletes com tubo de látex	48
28: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de dois roletes com tubo de silicone	49
29: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de três roletes com tubo de silicone	50
30: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de quatro roletes com tubo de silicone	50
31: Fluxograma do funcionamento do software do Arduino	51

Lista de Tabelas

1: Quadro comparativo das características das Bombas Peristálticas Comerciais	26
2: Propriedades dos materiais usados nos testes	39
3: Resultados de medição da altura H e cálculo da pressão	46

Sumário

Capítulo 1: Introdução	15
1.1. Formulação do Problema	15
1.2. Justificativa	16
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo Geral	18
1.3.2. Objetivos Específicos	18
1.4. Sinopse dos Capítulos	19
Capítulo 2: Fundamentação Teórica	20
2.1. Biossensores	20
2.1.1. Características de vazão em aplicações em biossensores	22
2.2. Bombas Peristálticas	22
2.2.1. Bombas Peristálticas Comerciais	25
Capítulo 3: Projetos e Construção Minibomba Peristáltica de Roletes	27
3.1. Diagrama do projeto da minibomba peristáltica de roletes	27
3.1.1. Projeto Mecânico	27
3.1.2. Projeto Eletroeletrônico	27
3.1.3. Manufatura	28
3.1.4. Testes Experimentais	28
3.2. Etapas do Processo de Projeto e Prototipagem da Minibomba Peristáltica de Roletes	28
3.2.1. Projeto e Desenvolvimento da Minibomba Peristáltica de Roletes	29
3.2.1.1. Parte Mecânica	29
3.2.1.2. Sistema de Controle Eletrônico	35
3.2.1.3. Atuadores da Minibomba	37
3.2.1.4. Tubos para sucção - látex e silicone	39
Capítulo 4: Testes Experimentais: Resultados e Discursões	40
4.1. Configuração inicial para realização dos testes	40
4.2. Testes com os atuadores de plástico ABS	41
4.3. Testes com os atuadores de nylon	43
4.4. Medição e cálculo da pressão hidrostática da vazão de saída da Minibomba	44

4.5. Testes e resultados da minibomba com fluidos de diferentes viscosidades.	46
4.6. Ajuste da rotação do motor para controle da vazão	50
Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros	52
Referências Bibliográficas	54

Neste capítulo será apresentada a formulação do problema, evidenciando a mortificação do desenvolvimento desta pesquisa, assim como a justificava e objetivos a serem alcançados, bem como uma sinopse dos capítulos posteriores.

1.1. Formulação do Problema

A procura de dispositivos e/ou sistemas de análise e diagnósticos rápidos destinados a algumas patologias, tem sido foco na área de pesquisa e diagnóstico de doenças virais e bacterianas, tais como, AIDS, Dengue, H1N1, entre outras, no Brasil e no mundo [1]. Entretanto, a maioria dos equipamentos destinados a esse propósito apresentam dimensões, peso e consumo de potência não compatíveis com a portabilidade. Considerando-se o caso do Brasil, país com dimensões continentais, a portabilidade desse tipo de sistemas permitiria desenvolver ações de controle e combate de patologias negligenciadas. Portanto, para o desenvolvimento de um sistema de análise portátil torna-se necessária a redução das dimensões físicas acopladas ao sistema, ou seja, redução física da unidade de aquisição e controle, interface, circuitos de alimentação e condicionamento, estrutura mecânica para suporte e fixação da célula de fluxo, bem como a dimensão do sistema fluídico (sistema de propulsão de fluxo, tubos, conexões e estrutura de fixação) [3].

As bombas peristálticas se constituem no equipamento mais utilizado para movimentar soluções em sistemas de análise. Arlindo (2013) [3], diz que certamente, o fator limitante para a maioria das aplicações da bomba peristáltica está relacionado ao custo do produto e não à ocorrência do regime de fluxo pulsado [3]. Nesse sentido, eis aqui os principais motivos do desenvolvimento e aplicação do projeto proposto, apresentando uma opção para utilização em sistema de medições que necessite de controle de vazão para seu funcionamento.

Ainda, como parte integrante do sistema proposto nesta pesquisa, há a presença dos biossensores. Eles constituem-se em claros exemplos de sistemas para diagnóstico rápido de doenças, dentre os quais àqueles baseados na ressonância de plásmons de superfície ou SPR (*Surface Plasmon Resonance*) estão

em evidência nas últimas duas décadas pela alta sensibilidade, pela simplicidade nos sistemas de processamento e instrumentação eletrônicos requeridos e pela ausência de marcadores [2].

Este trabalho é voltado para o desenvolvimento de um sistema de bombeamento, tendo como elemento propulsor uma minibomba peristáltica portátil e de baixo custo para biossensores SPR desenvolvidos pelo grupo de Sensores e Biossensores Ópticos do IFPB, com estrita colaboração do Laboratório de Biossensores da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) [2].

A minibomba peristáltica desenvolvida apresenta-se constituída por três diferentes atuadores, sendo que estes contêm dois, três e quatro roletes. As três configurações foram utilizadas para os testes, usando fluidos de viscosidades e densidades diferentes. O esmagamento dos tubos de látex e de silicone (materiais utilizando para a condução do líquido) funciona como meio de transporte dos fluidos de testes, pois criam as denominadas ondas viajantes (do inglês: *traveling wave*), que se constituem em qualquer tipo de onda que se propaga numa única direção com alterações insignificantes na forma [3]. Este esmagamento é feito com uso de rolamentos (apresenta a possibilidade de girar ao entrar em contato com o tubo) que tem por finalidade pressionar o tubo na parede da base da minibomba de forma a proporcionar o transporte do fluido de um recipiente a outro. Para verificação dos resultados e testes das configurações paralelas possíveis, desenvolveu-se atuadores de nylon, bem como os roletes fixos para testar a possibilidade da obtenção de um volume maior do que os obtidos com os atuadores de plástico ABS já desenvolvidos.

O sistema possui ainda um dispositivo para aferição e controle de vazão para que a quantidade adequada de fluido seja transportada até o biossensor, para atender aplicações específicas como diagnósticos rápidos de patologias, como já mencionado.

1.2. Justificativa

O tema referente às minibombas e suas aplicações são de extrema relevância no contexto da pesquisa científica mundial, apresentando uma evolução a partir dos anos 90, tendo em vista a evolução de novas tecnologias para manufatura,

associadas ao desenvolvimento de materiais com biocompatibilidade. Dessa forma, as minibombas têm possibilitado aplicações em algumas áreas do conhecimento, a citar: medicina (infusão de drogas), biologia molecular, refrigeração de microcircuitos eletrônicos e dosadores de reagentes [3].

A busca crescente por tecnologias que proporcionem a eficiência necessária, porém com uso de ferramentas e/ou componentes que possam trazer uma simplificação do problema proposto, também é algo a ser considerado. Diante disso, aqui serão adotadas medidas que levam em consideração o uso de dispositivos com baixo custo e de fácil acesso, bem como de plataformas de circuitos elétricos simplificada, como é o caso da plataforma Arduino, extremamente utilizada hoje em dia, por se tratar de uma plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* livre e de placa única.

Nesse sentido, percebe-se que há a necessidade do desenvolvimento de um equipamento de pequenas dimensões que possa oferecer o controle da saída de fluido e, sobretudo, baixo custo para aplicações em biossensores, de forma contínua e controlada, tornando-se, portanto, a minibomba peristáltica uma ótima opção para esta aplicação, visto que a partir dela será possível a obtenção deste controle. A minibomba peristáltica de roletes desenvolvida nesse projeto é considerada como equipamento indispensável para este controle, bem como uma nova opção em uso com experimentos com biossensores, diferenciando-se da minibomba peristáltica de roletes linear desenvolvida anteriormente por Arlindo (2013) [3].

Portanto, é notório que o desenvolvimento desse projeto implicará na ampla aplicação de conhecimentos acerca de diversos assuntos presentes na literatura, pois utilizaremos assuntos referentes à mecânica, pois foram desenvolvidos os projetos e prototipagem, bem como dimensionamento de sistema de redução mecânica para o motor de passo; à eletrônica, com utilização de componentes eletroeletrônicos, como o Arduino Mega e demais circuitos e componentes utilizados para acionamento e controle da vazão da minibomba; à biossensores, pois será apresentado um breve referencial teórico, onde nele é apresentado a necessidade do uso das bombas peristáltica para diversas aplicações, bem como principal meio de transporte de fluxos para diagnóstico de diferentes patologias; por fim à programação, pois todo o *software* foi desenvolvido para o Arduino de modo que proporcionasse a medição e controle da vazão, objetivo principal desse projeto. Então, o presente projeto trata-se de um trabalho com aplicações multidisciplinar.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Realizar o projeto e o desenvolvimento de uma minibomba peristáltica de roletes com três atuadores, sendo estes com dois, três e quatro roletes, a ser utilizada como componente para a movimentação de diferentes fluídos, com viscosidades diferentes, para uso em biossensores, contendo elementos de medição e controle em malha aberta (e fechada?) da vazão fluídica.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Projetar e desenvolver uma minibomba peristáltica com três atuadores - com dois, três e quatro roletes - acionada a partir da utilização de motor de passo acoplado a uma caixa de redução mecânica;
- Projetar e desenvolver o circuito eletrônico com a utilização da plataforma Arduino para controle em malha aberta da vazão do fluído;
- Realizar testes com os três atuadores - com dois, três e quatro roletes - para definição das características e limites de vazão mínimas e máximas que cada um pode propor para o sistema;
- Fazer testes, após definição dos padrões de cada atuador, com diferentes tipos de fluidos para verificação do controle de vazão do transporte de substâncias de viscosidades e características diferentes, a ser utilizada no biossensor.

1.4. Sinopse dos Capítulos

▪ **Capítulo 2 - Fundamentação Teórica**

Neste capítulo serão apresentados conceitos e fundamentos acerca dos Biossensores e das Bombas Peristálticas evidenciando seu histórico, definição e principais aplicações, diagrama do projeto da minibomba peristáltica de roletes, bem como um quadro comparativo entre características de bombas peristálticas comerciais e características da minibomba peristáltica de roletes aqui projetada e desenvolvida.

▪ **Capítulo 3 - Projeto e Construção da Minibomba Peristáltica de Roletes**

Este capítulo apresentará a minibomba peristáltica de roletes projetada e desenvolvida nesse projeto, com uma geometria simples, portátil e de baixo custo, por meio de seu projeto mecânico até sua prototipagem. Seu sistema de controle eletrônico para acionamento e controle da vazão, atuadores e tubos para transporte de fluxo de látex e silicone também serão apresentados. Toda sua estrutura foi projetada e construída no *software Solidworks* seguido de prototipagem em impressora 3D com plástico ABS.

▪ **Capítulo 4 - Testes Experimentais: Resultados e Discursões**

Neste capítulo serão abordados os critérios de projeto, processo de prototipagem na impressora 3D com plástico ABS, a parte eletroeletrônica para seu acionamento, bem como para as medições e controle da vazão de saída. Os testes realizados na minibomba para verificação das vazões máximas e mínimas, pressão hidrostática com fluidos de densidades e viscosidades diferentes também serão apresentados para os três atuadores propostos - com dois, três e quatro roletes - desenvolvidos com o plástico ABS e em nylon também serão apresentados.

▪ **Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros:**

Finalmente serão apresentadas as conclusões e trabalhos futuros aqui propostos.

Fundamentação Teórica

Neste capítulo será apresentado o referencial teórico acerca dos biossensores e das bombas peristálticas, evidenciando seus conceitos, definições e aplicações.

2.1. Biossensores

Os biossensores são dispositivos que convertem uma informação química, como por exemplo, a concentração de um analito, em um sinal de utilidade analítica. Em biossensores o sistema de reconhecimento é realizado através de um mecanismo bioquímico entre o receptor biológico imobilizado na superfície de um transdutor e o analito de interesse [13].

Métodos convencionais de análise e diagnóstico, como os testes ELISA (*Enzyme Linked Immunosorbent Assay*) e PCR (*Polymerase Chain Reaction*), são processos onerosos, realizados em laboratórios bem equipados, com um tempo de análise que varia de dias a semanas e que exigem a participação nos ensaios de profissionais experientes e capacitados para sua operação [1, 2]. Por outro lado, diagnósticos incorretos podem levar à progressão da doença ou da infecção para formas mais severas.

Os biossensores são alternativas que oferecem várias vantagens quando comparados aos métodos tradicionais: ausência de marcadores (como os utilizados no teste ELISA), alta sensibilidade, tempo rápido de resposta e capacidade para desenvolver equipamentos analíticos portáteis e baixo custo e/ou configurados num único encapsulamento [8, 11, 12]. O diagrama de blocos de um biossensor é ilustrado na Figura 1. O mesmo é composto por um transdutor físico-químico, elemento de condicionamento (aquisição, filtragem e amplificação), sistema de processamento do sinal elétrico, sistema fluídico (propulsor de fluxo, célula de fluxo e tubos).

Na fronteira do transdutor físico-químico, devido à imobilização de biorreceptores (por exemplo, DNA, anticorpo, enzima e micro-organismos) adequados, ocorre a adesão do analito (substância de interesse) e a formação da

biocamada. O resultado dessa interação produz mudanças físico-químicas como variação de calor, índice de refração, resistência e capacitância [8].

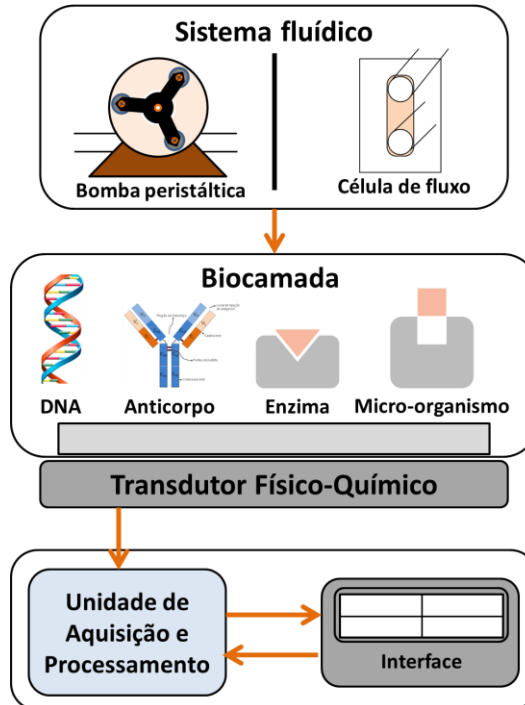


Figura 1: Estrutura de um biossensor, evidenciando seus elementos e componentes.

O analito, a ser identificado, está contido numa amostra que geralmente está na forma fluídica (líquida ou gasosa), sendo transportado por um sistema propulsor de fluxo até a célula fluídica, local onde o analito entra em contato com o bioreceptor. O sistema propulsor de fluxo para aplicações em biossensores SPR deve ser capaz de manter a taxa de fluxo constante ao longo do tempo ou, no máximo, apresentar pequenas oscilações restritivas ao mecanismo de propulsão escolhido. A faixa de operação para um sistema de propulsão de fluxo para biossensores é, normalmente, da ordem de 1 a 800 $\mu\text{l}/\text{min}$, podendo apresentar variações dependendo da aplicação, e deve ser bem projetado para evitar a presença de “bolhas” ou oscilações do fluxo ao longo do canal microfluídico, que pode induzir leituras incorretas. Os dispositivos propulsores de fluxo ou minibombas para uso com biossensores SPR usam, normalmente, o movimento peristáltico [8, 9].

Portanto, podemos descrever como principais mecanismos de transdução usados em biossensores, como sendo os por amperometria e potenciometria, seguido por métodos óticos (fluorescência, ressonância de plasma de superfície,

SPR, e fibra ótica), por gravimetria (microbalança de cristal de quartzo, QCM) e por medidas condutimétricas (capacitância, condutância e impedância) [13].

Nesse sentido o presente projeto tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma minibomba peristáltica de roletes para aplicações em biossensores SPR, proporcionado ao sistema uma vazão suficiente de forma controlada e contínua para aplicações nesses biossensores.

2.1.1. Características de vazão em aplicações em biossensores

Algumas características devem ser levadas em conta na hora das aplicações nos biossensores. Uma delas é o volume a ser transferido para o biossensor. Essa transferência é dada por meio da sucção dos fluidos pela minibomba. No trabalho de Thatiana (2008) [18], usou-se uma vazão de 2,7 ml/min com o fluido a 24°C para as suas aplicações e ensaios. Zhou (2009) [19] desenvolveram uma minibomba com características peristáltica plana, produzindo uma vazão de 490 µl/min até 5,0 ml/min. Arlindo (2013) [3], não explorou a faixa superior caracterizada por entender que em suas aplicações a faixa de operação se encontra de 200 µl/min - 1,0 ml/min. Conclui-se, no entanto, que há sim a possibilidade da bomba, ou meio diferentes meios para transporte de fluido, ter uma capacidade superior aos que normalmente são usados nos biossensores, desde que estes oferecem a vazão mínima para este fim.

2.2. Bombas Peristálticas

Segundo Arlindo (2013) [3], o movimento peristáltico é aquele no qual as paredes de um duto sofrem um movimento sequencial de contração e expansão, com o objetivo de transportar determinada massa fluídica. O movimento do fluido, provocado pelo peristaltismo da fronteira, só pode ocorrer se houver uma diferença de pressão entre as duas extremidades do sistema (entrada/saída).

O movimento da fronteira provoca desequilíbrio das forças viscosas que agem sobre o fluido, tendo como consequência uma variação de pressão. Dessa forma, as forças viscosas são essenciais, pois possibilitam a transmissão da perturbação das paredes sobre a massa fluída e, conseqüentemente, a sua movimentação. Assim, estudar o movimento peristáltico é equivalente a formular um problema de dinâmica

dos fluidos, com condições de contorno variáveis periodicamente (fronteira móvel) [3].

Uma bomba é definida como um dispositivo que transfere energia ao fluido sob a forma de aumento de pressão, velocidade, elevação ou qualquer combinação destas formas de energia, conseqüentemente facilitando o movimento da massa fluídica. Estas podem ser consideradas como equipamento mais utilizado para movimentar soluções em sistemas de análise. Tratam-se de equipamentos versáteis, em geral com múltiplos canais que possibilitam impulsionar ou aspirar soluções, emulsões ou mesmo suspensões, com ampla faixa de viscosidade. Isto se dá sem contato direto do fluido com as partes mecânicas da bomba, com exceção do tubo flexível sobre o qual são aplicados os movimentos peristálticos, por meio do rotor da bomba [3]. Dessa forma, a busca por desenvolvimento de uma bomba que apresente características semelhantes as já existentes nesse sentido, vêm crescendo nos últimos anos, portanto, tornando-se um dos principais objetivos dessa pesquisa.

De acordo com estudos realizados, as primeiras observações feitas sobre o movimento peristáltico resultaram do estudo sobre o corpo humano, mas precisamente do sistema digestivo, onde o movimento peculiar de contração das fibras musculares nas paredes dos órgãos, força seu conteúdo a seguir na direção imposta pelas paredes.

As bombas peristálticas constituem-se no equipamento mais utilizado para movimentar soluções em sistemas de análise em fluxo. São equipamentos versáteis, em geral, com múltiplos canais, que possibilitam impulsionar e/ou aspirar soluções, emulsões ou mesmo suspensões, em ampla faixa de viscosidades, sem contato direto das mesmas com partes mecânicas da bomba, afora o tubo flexível sobre o qual são aplicados os movimentos peristálticos pelo rotor da bomba. As vazões podem ser ajustadas num amplo intervalo, de forma contínua ou em pequenos incrementos, controlando a rotação da bomba e/ou o diâmetro interno dos tubos [3, 14]. Entre as limitações de uso deste sistema propulsor, destaca-se o custo relativamente elevado do próprio equipamento (conforme apresentados na Tabela 1 apresentada na sessão 2.2.1. neste capítulo), bem como dos tubos flexíveis (*Tygon*®, *Neuprene*®) que as bombas mais sofisticadas requerem (principalmente em aplicações biomédicas). Esses tubos flexíveis sofrem pressões intermitentes dos roletes da bomba [3]. Por outro lado, quando submetidos a longos períodos de

operação apresentam queda gradual da vazão devido à fadiga e deformação, além de aumento da permeabilidade a gases. Outra limitação diz respeito ao ajuste da relação entre as vazões dos diferentes canais da mesma bomba, ditadas pela limitada disponibilidade de tubos com diâmetros internos diferentes [3].

Estas bombas apresentam-se basicamente em duas formas: bombas de deslocamento e bombas dinâmicas; o primeiro tipo introduz energia ao fluido de modo não contínuo ou pulsado, enquanto o segundo tipo introduz energia continuamente ao fluido [7].

Na Figura 2 é ilustrado o funcionamento de uma bomba peristáltica de roletes, na qual o esmagamento do tubo é provocado pelo movimento de rotação dos roletes e cria as ondas viajantes (do inglês: *traveling waves*) e uma configuração típica, em macroescala, de uma bomba peristáltica linear, na qual um conjunto de atuadores, do tipo pistão, comprime, ciclicamente, o tubo flexível. Em ambos os casos, o movimento imposto sobre as paredes do tubo induzirá um movimento direcionado sobre a massa fluídica, situando as bombas peristálticas na classe de bombas de deslocamento positivo. Para essas bombas, aumentar o diâmetro do tubo ou a frequência do ciclo de bombeamento, acarretará num incremento da taxa de fluxo [7, 9, 10].

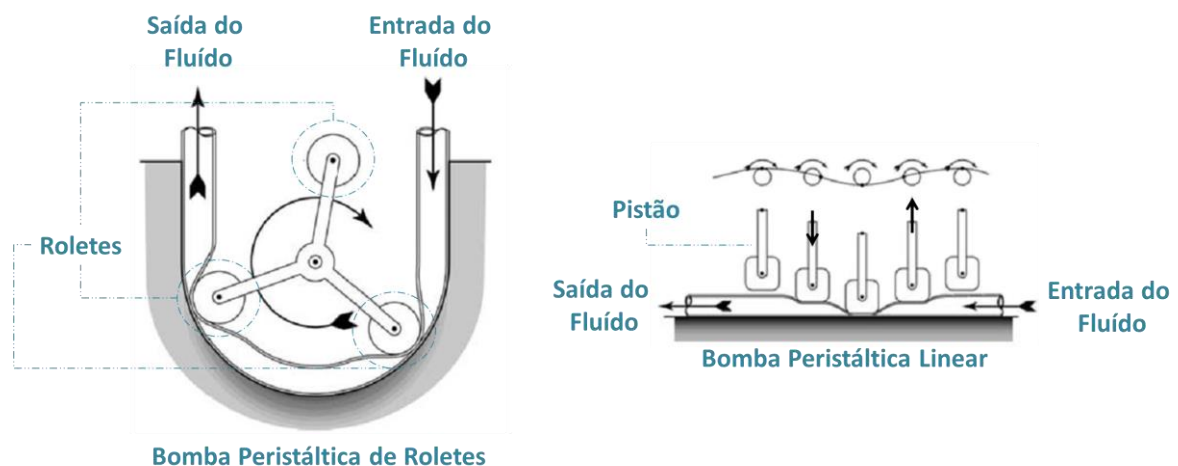


Figura 2: Funcionamento da bomba peristáltica de roletes e linear - adaptada de Alindo (2013) [3]

No movimento peristáltico as paredes de um duto sofrem uma sequência de movimentos de contração e expansão, tem por objetivo transportar fluidos. Nesse sentido, o movimento fluido provocado pelo peristaltismo da fronteira só ocorre quando há uma diferença de pressão entre as duas extremidades do sistema

(entrada/saída). O movimento da fronteira provoca desequilíbrio das forças viscosas que agem sobre o fluido, tendo como consequência uma variação de pressão. Dessa forma, as forças viscosas são essenciais, pois possibilitam a transmissão da perturbação das paredes sobre a massa fluida e, conseqüentemente, a sua movimentação. Assim, estudar o movimento peristáltico é equivalente a formular um problema de dinâmica dos fluidos, com condições de contorno variáveis periodicamente (fronteira móvel) [3].

Alternativas paralelas, como as bombas de pistão ou de seringa e os sistemas pneumáticos acionados por bombas de diafragma ou gás comprimido, entre outros, são apresentadas por Arlindo (ano) [3]. Entretanto, dentre essas, as bombas de seringa apresentam a melhor solução, tanto para infusão de drogas, como para o transporte de analitos em sistemas de análise. Essas bombas apresentam um regime de fluxo livre de pulsações, são capazes de transportar pequenos volumes de líquido e manter um fluxo estável e preciso. Elas são normalmente utilizadas na infusão de medicamentos muito tóxicos, que exigem exatidão na dosagem, ou em sistemas de análise por injeção de fluxo, que necessitam de um regime estável de transporte.

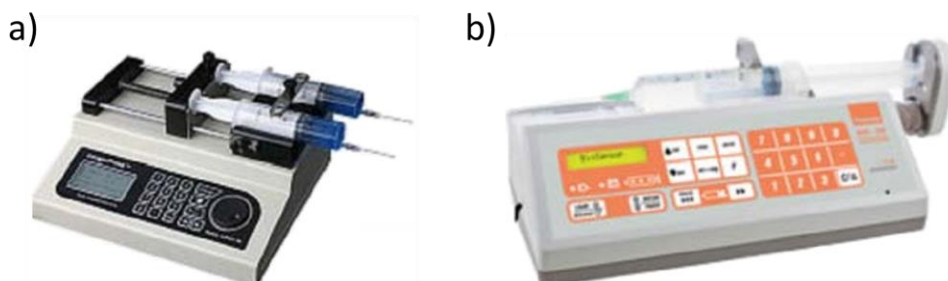


Figura 3: (a) bomba de seringa, modelo LSP01-1C, fabricada pela "Baoding Longer Precision Pump Co., Ltd.", com taxa de infusão variando de 0; 831 nl/min - 10,84 ml/min, pesando 3,5 kg; (b) modelo nacional, Lignea BSS 100, fabricado por BIOSENSOR) [3].

2.2.1. Bombas Peristálticas Comerciais

Conforme já mencionado, as bombas peristálticas são consideradas uma das melhores soluções para sistemas de propulsão de fluido para aplicações em biossensores ou em qualquer outro sistema que necessite transferência de fluidos. No entanto, devido a algumas características, tais como portabilidade, simplificação do circuito elétrico, dimensões e principalmente preço seu uso passa a ser substituído por outras soluções.

Diante disto, na Tabela 1 é apresentado um quadro resumo com características de algumas bombas peristálticas comerciais encontradas que podem ser usadas para aplicações com biossensores, apresentando algumas características, tais como: fabricante, modelo, preço, vazão e pressão máxima e características.

Tabela 1. Quadro comparativo das características das Bombas Peristálticas Comerciais [15, 16].

Fabricante	Modelo	Preço	Vazão Máxima	Pressão Máxima	Características
SHENCHEN	BT300N	US \$400 - 500	0.035 - 1330 ml/min	0.3Mpa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Display para visualizar o valor da vazão; ▪ Pode ser ligada ao computador; ▪ Usa-se em laboratórios.
TOPTION	WT300S	US\$ 199,00	1.8 - 3500 ml/min	Pressão Baixa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Display para visualizar o valor da vazão; ▪ Usa-se em laboratórios.

Nesse sentido, ao observar os dados apresentados na Tabela 1, percebe-se e confirma-se, que realmente um dos grandes problemas no uso desse tipo de mecanismo para transporte de fluidos é o alto custo. Portanto, a minibomba peristáltica aqui apresentada aparece como uma ótima opção para solução dos problemas ocorridos em relação ao uso das bombas peristálticas, pois a mesma oferece um bom controle e, principalmente, baixo custo, portabilidade e simplicidade no que se diz respeito ao seu manuseio.

Portanto, visando à necessidade de apresentar uma solução para os problemas já mencionados, foi projetado e desenvolvido a minibomba aqui proposta. Todas as características do sistema, bem como toda a esquematização realizada para manufatura e execução dos testes serão apresentadas com detalhes no capítulo seguinte.

Projeto e Construção da Minibomba Peristáltica de Roletes

A minibomba peristáltica de roletes aqui proposta tem uma geometria simples, portátil e de baixo custo. Sua estrutura foi projetada e construída no software Solidworks seguido de prototipagem em impressora 3D com plástico ABS, tendo sido, ainda, desenvolvido por meio de processo de usinagem os atuadores de nylon. Aspectos técnicos e detalhes do projeto e construção desta minibomba são a seguir apresentados.

Todo o processo de construção da minibomba peristáltica de roletes, desde o projeto até a prototipagem, e respectivos testes é apresentado nos tópicos a seguir.

3.1. Diagrama do projeto da minibomba peristáltica de roletes

A metodologia para desenvolvimento da minibomba peristáltica de roletes aqui proposta foi realizado de acordo com o apresentado na Figura 4. Nela percebe-se que a primeira atividade foi o projeto mecânico da minibomba, em seguida o projeto eletroeletrônico, a manufatura e por último a realização dos testes.

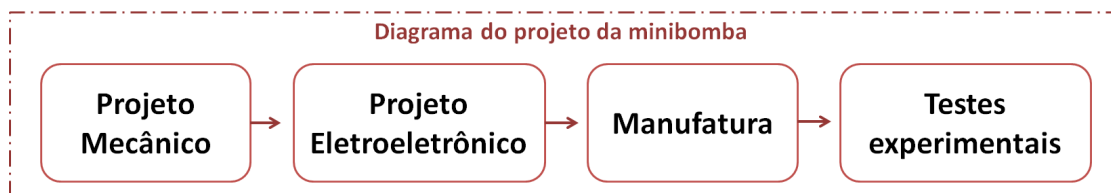


Figura 4: Diagrama do projeto da minibomba peristáltica de roletes.

As subseções a seguir detalharam o que foi realizado em cada uma destas etapas.

3.1.1. Projeto Mecânico

Esta etapa teve os seguintes pontos como principais para realização desta fase do projeto da minibomba peristáltica de roletes.

- Definição da estrutura e suas dimensões;

- Escolha e projeção do atuador com as respectivas quantidades máximas e mínimas de roletes e suas posições da estrutura da minibomba peristáltica de roletes.

3.1.2. Projeto Eletroeletrônico

Aqui foram realizados os seguintes pontos como principais para realização desta fase do projeto:

- Escolha e definição da estrutura eletrônica para a minibomba - Arduino; Motor de passo; Display LCD;
- Simulação do circuito elétrico para ajustes e definições das características elétricas do sistema.

3.1.3. Manufatura

Como parte integrante, e de extrema relevância, pois aqui foi possível “visualizar” todas as etapas já descritas anteriormente, sendo aqui levando em consideração:

- O desenvolvimento prático baseado no projeto mecânico já descrito;
- A prototipagem da minibomba peristáltica, bem como o ajuste e acoplamento do circuito elétrico na minibomba.

3.1.4. Testes Experimentais

Nesta etapa, foi realizado:

- Validação dos projetos já descritos a partir da realização de testes com o funcionamento da minibomba.

3.2. Etapas do Processo de Projeto e Prototipagem da Minibomba Peristáltica de Roletes

Após todo o processo de análise da proposta para desenvolvimento deste projeto, tornou-se necessário o desenvolvimento da minibomba, sendo esta

acionada por um motor de passo conectado a uma caixa de redução mecânica e associado a um mecanismo de controle de vazão.

Inicialmente, foi desenvolvida a minibomba com atuador com três roletes. Porém, após realização de pesquisas e estudos, surgiu a necessidade da confirmação de seu funcionamento de forma satisfatória com outras quantidades de roletes, haja vista a possibilidade de uma real diferença no que se diz respeito à vazão em sua saída. Então projetou-se e desenvolveu-se mais dois atuadores, sendo um com dois e outro com quatro roletes. Para todos estes casos, suas estruturas foram projetadas e confeccionadas a partir do uso o *software Solidworks*. Assim, após a etapa de projeto, foi realizada a construção da minibomba, utilizando-se, para isso, o processo de prototipagem com impressora 3D e plástico ABS. Medições de vazão e pressão foram realizadas para esta configuração e os resultados são apresentados no Capítulo 4.

3.2.1. Projeto e Desenvolvimento da Minibomba Peristáltica de Roletes

Aqui são apresentadas as dimensões de cada parte da minibomba possibilitando um melhor entendimento no que se diz respeito ao seu processo de projeto e prototipagem.

3.2.1.1. Parte Mecânica

Para melhor entendimento da ideia do projeto aqui proposto, a seguir serão ilustradas algumas figuras que mostram os aspectos dimensionais de cada uma das partes que compõem a minibomba.

- **Base para fixação do motor de passo**

Esta parte do projeto da minibomba servirá para o encaixe do motor, bem como o Arduino MEGA e o drive para acionamento do motor com o circuito integrado CI ULN2003A.

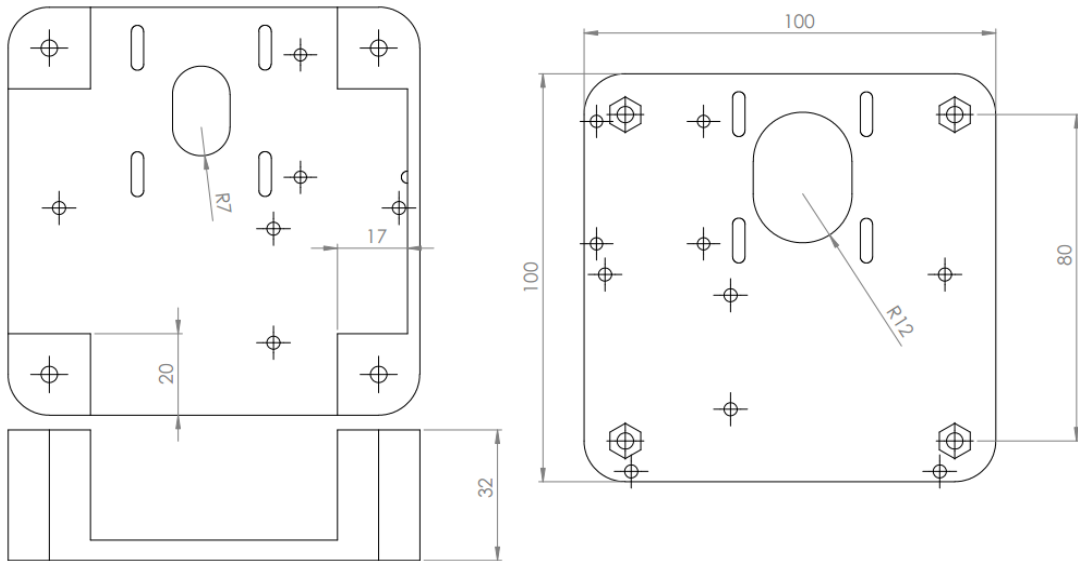


Figura 5: Desenho técnico com o projeto da base da minibomba.

- **Sistema engrenagens para redução mecânica do motor**

Estas engrenagens fizeram-se necessárias devido ao fato do motor de passo não apresentar um torque suficiente para girar o rotor com o tubo de látex e/ou de silicone, sendo a relação entre eles de 1/16.

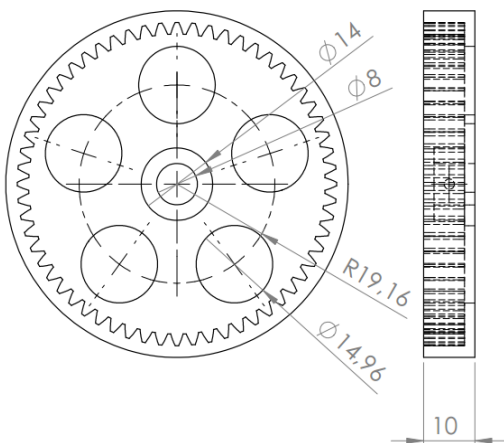


Figura 6: Engrenagem I para redução mecânica do motor de passo.

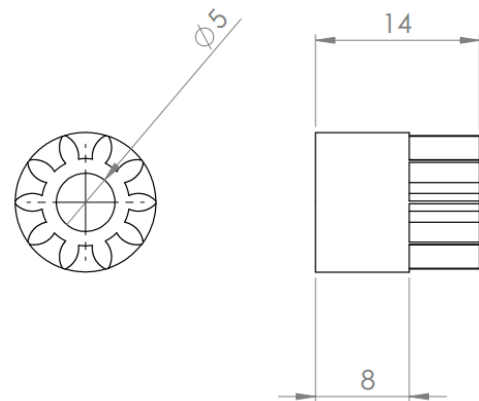


Figura 7: Engrenagem II para redução mecânica do motor de passo.

- **Base para fixação do rotor e do tubo de látex e/ou de silicone**

Esta peça foi desenvolvida para receber o tubo de látex e/ou de silicone, bem como o rotor com sua base rolamentos (roletes) e tampa.

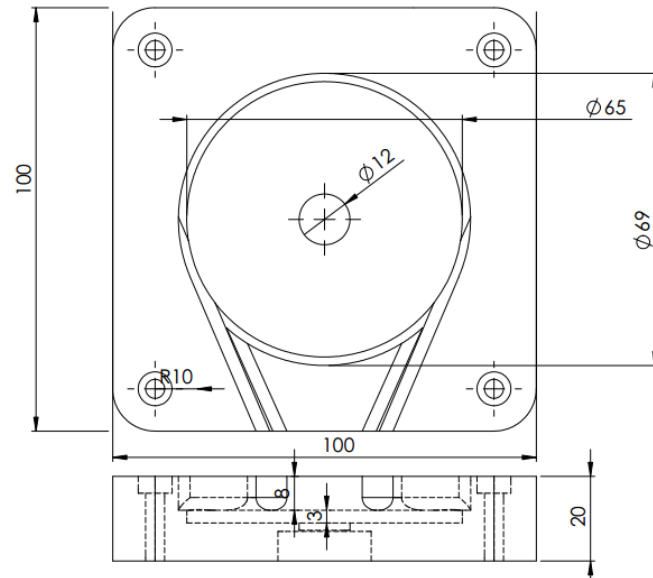


Figura 8: Desenho técnico com o projeto da base para fixação do rotor e do tudo de látex e/ou de silicone.

- Atuadores para esmagamento do tubo de látex e/ou silicone nas extremidades da base para fixação do rotor

Foram desenvolvidas três diferentes peças para com esta mesma característica, sendo uma para dois roletes (separando-os em 180°), outra para três roletes (separando-os em 120°) e outra para quatro (separando-os em 90°). Na Figura 9 é ilustrado o desenho técnico da base do atuador para três roletes com todo dimensionamento do mesmo, já na Figura 10 apresenta-se o desenho técnico da tampa para o atuador de três roletes, fixando-os à base do atuador.

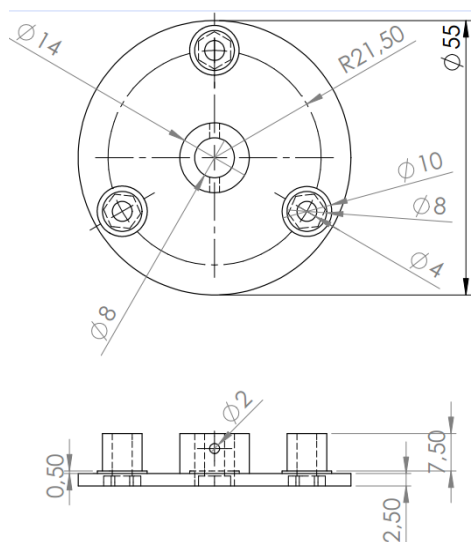


Figura 9: Desenho técnico com o projeto da base do atuador.

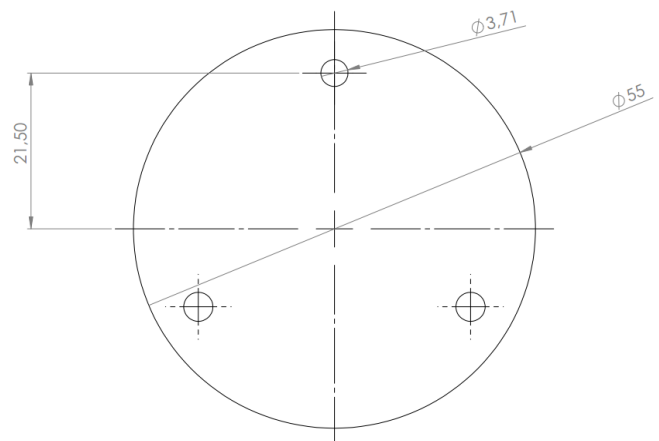


Figura 10: Desenho técnico com o projeto da tampa para o atuador.

▪ Tampa da minibomba

Além de facilitar a colocação do tubo de látex e/ou de silicone na base para fixação do rotor sem esta tampa, ela ainda servirá como apoio para total acomodação do tubo de látex e/ou de silicone com as extremidades da minibomba com o esmagamento desse tubo por meio dos rolamentos.

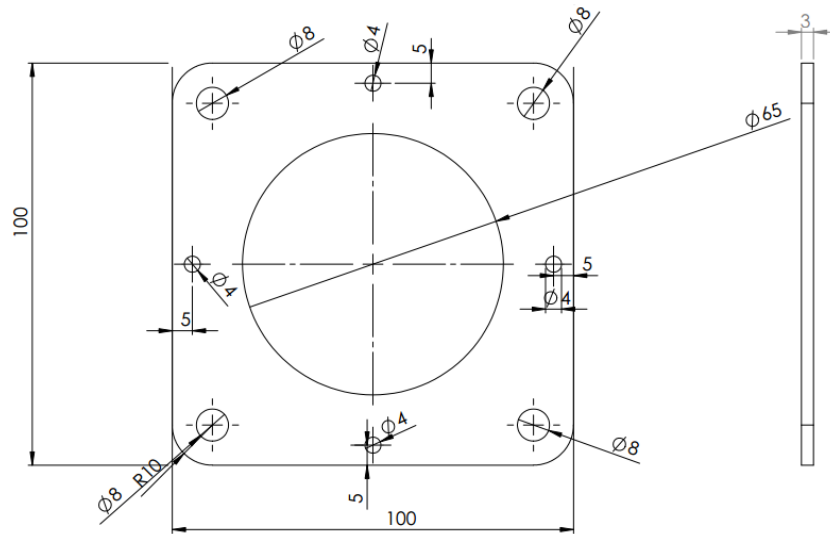


Figura 11: Desenho técnico com o projeto da tampa da minibomba.

Após o desenvolvimento do projeto da minibomba apresentada acima, foi iniciado o processo de prototipagem da mesma com uso do processo de impressão 3D. Feito isso, pode-se chegar aos seguintes resultados.

O conjunto de peças e componentes que compõem a minibomba peristáltica de roletes é ilustrado na Figura 12. A dimensão da minibomba projetada possui dimensões de 100 mm² em sua superfície e altura de 55 mm.

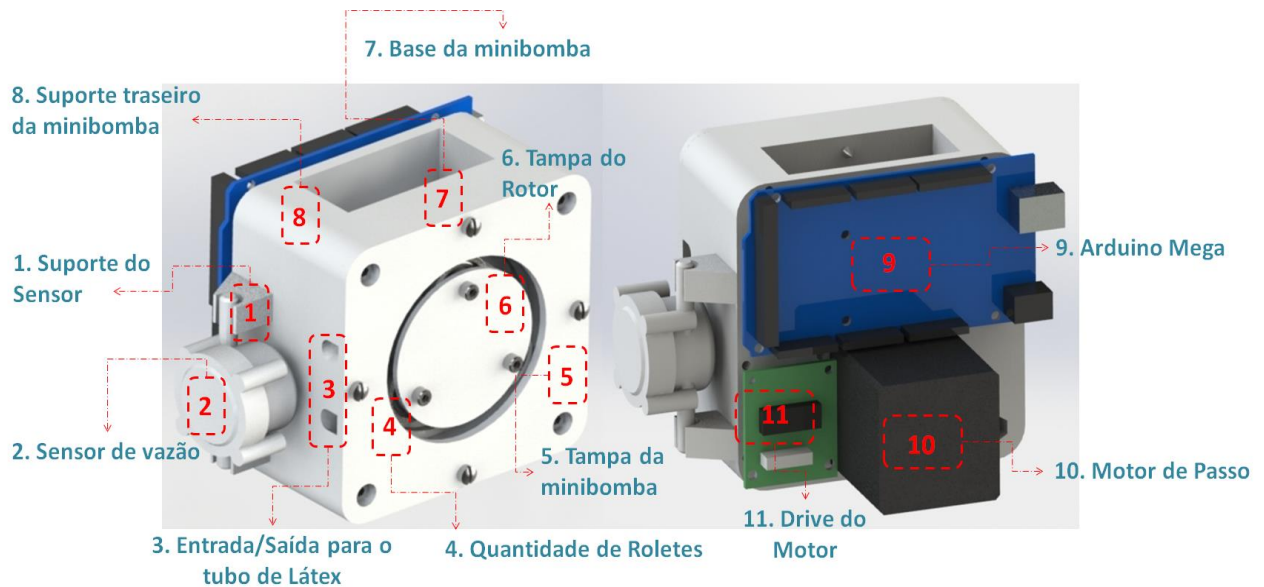


Figura 12: Montagem da minibomba peristáltica com três roletes a ser desenvolvida.

O suporte para o sensor foi desenvolvido visando à praticidade para fixação do sensor de vazão utilizado no sistema, de modo a acoplá-lo à minibomba. No ponto 3, são apresentadas a entrada e a saída do tubo de látex e/ou de silicone, no qual circularão os fluidos de testes. O ponto 4 ilustra a quantidade de roletes escolhidas para o rotor da minibomba, ou seja, dois, três ou quatro roletes. Os pontos 5 e 6 apresentam, respectivamente, as tampas para a minibomba e para o rotor, sendo estas acopladas à minibomba através de parafusos. No ponto 7 é apresentado a base da minibomba, que foi desenvolvida para receber o tubo de látex, bem como o rotor, sua base, rolamentos (roletes) e tampa. O suporte traseiro, indicado no ponto 8, servirá para o encaixe do motor de passo (indicado no ponto 10). Há, também, o acoplamento para o micro controlador Arduino MEGA (indicado no ponto 9) e o circuito para acionamento do motor de passo, baseado no circuito integrado CI ULN2003A (indicado no ponto 10).

Em relação aos atuadores, Arlindo (2013) [3], diz que a função desses em uma bomba é transformar uma entrada de energia (elétrica, térmica) em trabalho (mecânico), como resposta. Idealmente, os atuadores devem ter simplicidade na construção, sendo capazes de gerar grandes forças, grandes deslocamentos, rápidos tempos de respostas, com baixo consumo de potência. Dentre as características destes atuadores, temos: densidade de energia; magnitude da força; amplitude de deslocamento e; tempo de resposta.

Esses atuadores podem aparecer em diferentes métodos de atuação, sendo estes divisíveis em algumas categorias, as quais são apresentadas na Figura 13.

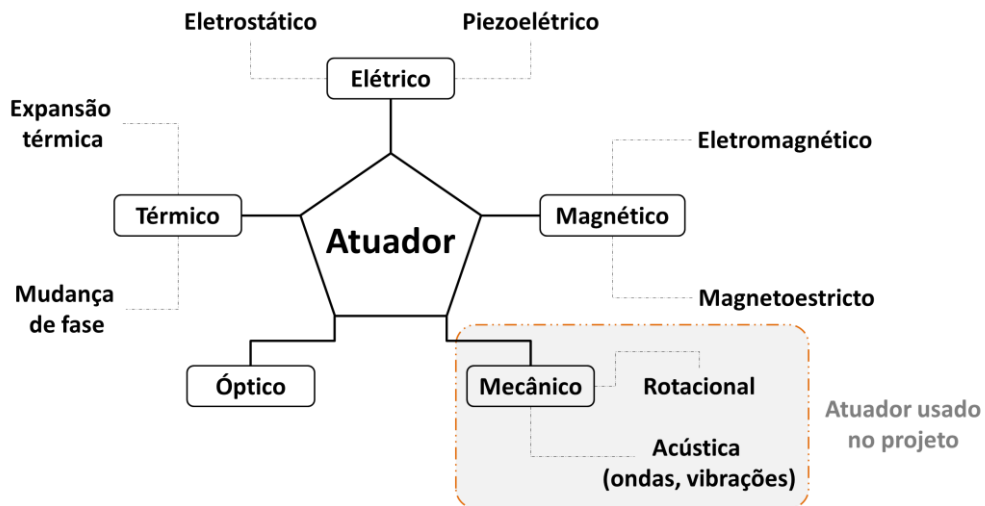


Figura 13: Diferentes tipos de atuadores - adaptada de Alindo (2013) [3].

Para esta aplicação utilizou-se o atuador mecânico rotacional, pois esses são aqueles cuja energia de saída é a mecânica, ou seja, produzem movimento, e nesse caso, movimento de rotação. O motor de passo, utilizado para acionamento da minibomba peristáltica aqui apresentada, tem seu princípio de funcionamento semelhante com os de outros motores elétricos, sendo sua principal diferença em termo de sua alimentação de entrada que é feita por pulsos e não continuamente. Assim, conforme os pulsos são acionados ao circuito de alimentação, este oferece correntes aos enrolamentos certos para fornecer o deslocamento desejado.

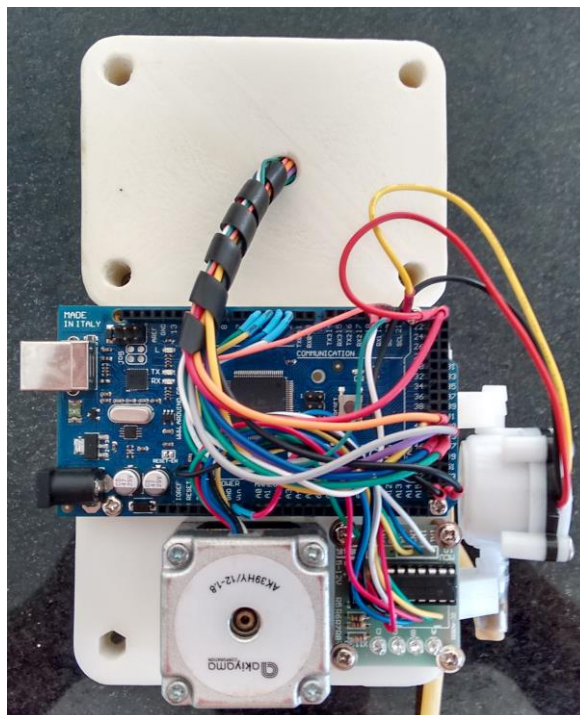


Figura 14: Fixação do Arduino Mega e do drive para o motor de passo.

Para o controle e medição da vazão é necessário que se faça uso de circuitos eletrônicos. Dessa forma, para esta aplicação, como já mencionado, será utilizada a plataforma Arduino. Foi escolhido o Arduino Mega por apresentar uma quantidade maior de terminais a serem utilizados, possibilitando uma maior conectividade em relação à eletrônica no projeto. Sua fixação no sistema foi apresentada na Figura 14. Nela é possível observar ainda que já está projetado o local para fixação do drive para acionamento do motor de passo.

A alimentação do sistema está sendo feita a partir da fonte de alimentação do Arduino que fornece uma tensão DC de 12V / 1A, sendo esta uma configuração suficiente para acionar o motor de forma adequada para a aplicação, bem como tornando desnecessária a adição de outra fonte de energia para o sistema, como por exemplo, baterias ou fontes externas.

3.2.1.2. Sistema de acionamento e controle eletrônico

Como ideia para tornar a minibomba aqui apresenta ainda mais portátil, percebeu-se a necessidade da criação de uma interface para controle e visualização da vazão de saída, tornando possível uma interação entre o homem e a minibomba de forma mais simples e prática. Então foi projetada uma “caixa” composta por um display LCD e três botões. Para isto, também foi utilizado o *software Solidworks* para o projeto e posterior prototipagem na impressora 3D com uso do plástico ABS desta “caixa”.

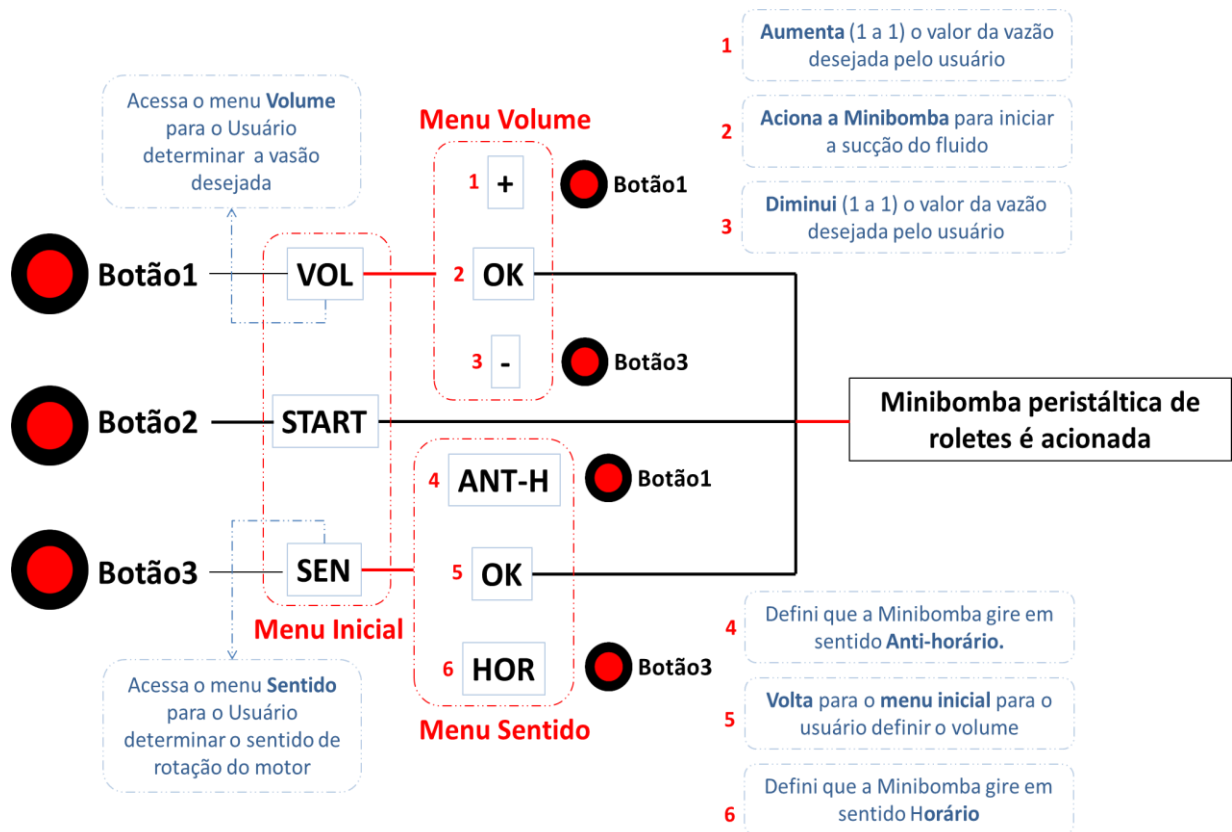


Figura 15: Fluxograma de funcionamento dos botões da interface de controle da minibomba peristáltica de roletes.

De acordo com o apresentado na Figura 15, os botões tem um papel indispensável para amplo funcionamento da minibomba de roletes no que se diz respeito o controle da vazão. Através deles, e por uma visualização do menu no LCD, o usuário pode navegar no menu principal da interface podendo assim definir os parâmetros a serem utilizados na minibomba. Dentre os parâmetros a serem configurados, destacam-se:

- No Menu Inicial o usuário visualizará no LCD as funções VOL, START e SEN, sendo, respectivamente, o Menu Volume, Acionamento da Minibomba e Menu Sentido;
- No Menu Volume o usuário tem a opção para definir o volume a ser transferido pela minibomba, usando o botão 1 para aumentar, botão 3 para diminuir um a um o volume a ser medido em ml/min e botão 2 para acionar a minibomba;
- No Menu Sentido o usuário tem a possibilidade de definir se a minibomba girará no sentido horário ou anti-horário, sendo usando o botão 1 para anti-horário, botão 3 para horário e botão 2 para voltar ao Menu Inicial.

A parte de fiação e ligação dos componentes dos botões, LCD, motor de passo e drive do motor estão acoplados à estrutura apresentada na Figura 14, onde nessa é indicado a fixação do Arduino Mega e toda parte de circuito eletrônico de acionamento e controle da Minibomba Peristáltica de Roletes.

Na utilização da interface o usuário fará o controle, baseado no diagrama apresentado na Figura 15, e verá a sequencia de acionamento e controle conforme ilustrado na Figura 16a que mostra a interface do Menu Inicial (o usuário escolhe em quando dos menus ele deseja configurar através dos botões); 16b mostra a interface do Menu Sentido (o usuário define o sentido de rotação do motor); e 16c onde apresenta o Menu Volume (o usuário configura o volume de saída desejado para minibomba).

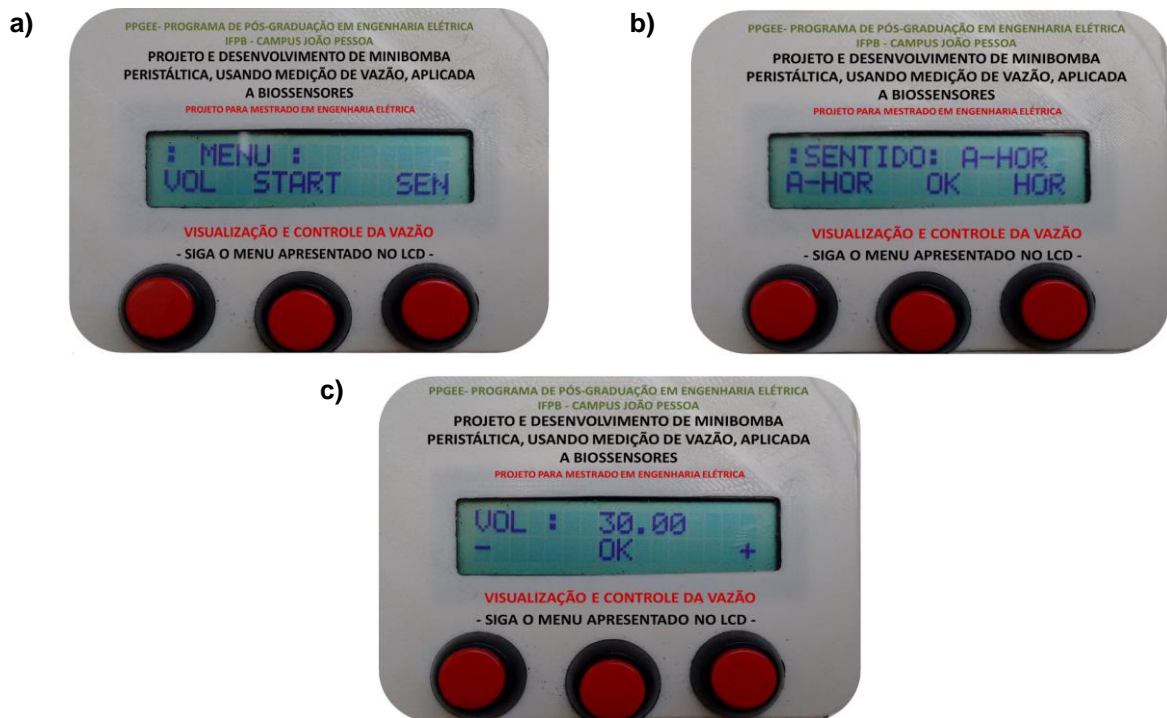


Figura 16: Sequencia de interfaces para controle e acionamento da minibomba (a) Menu Inicial; (b) Menu Sentido e; (c) Menu Volume.

3.2.1.3. Atuadores da minibomba peristáltica de roletes

Nesse projeto, a quantidade de roletes varia de acordo com o atuador escolhido, sendo possível uma configuração com dois, três e até quatro roletes. Verifica-se que a alteração do número de roletes é simples para a minibomba proposta, sendo necessária a troca dos atuadores, como exibidos na Figura 17a e 17b.

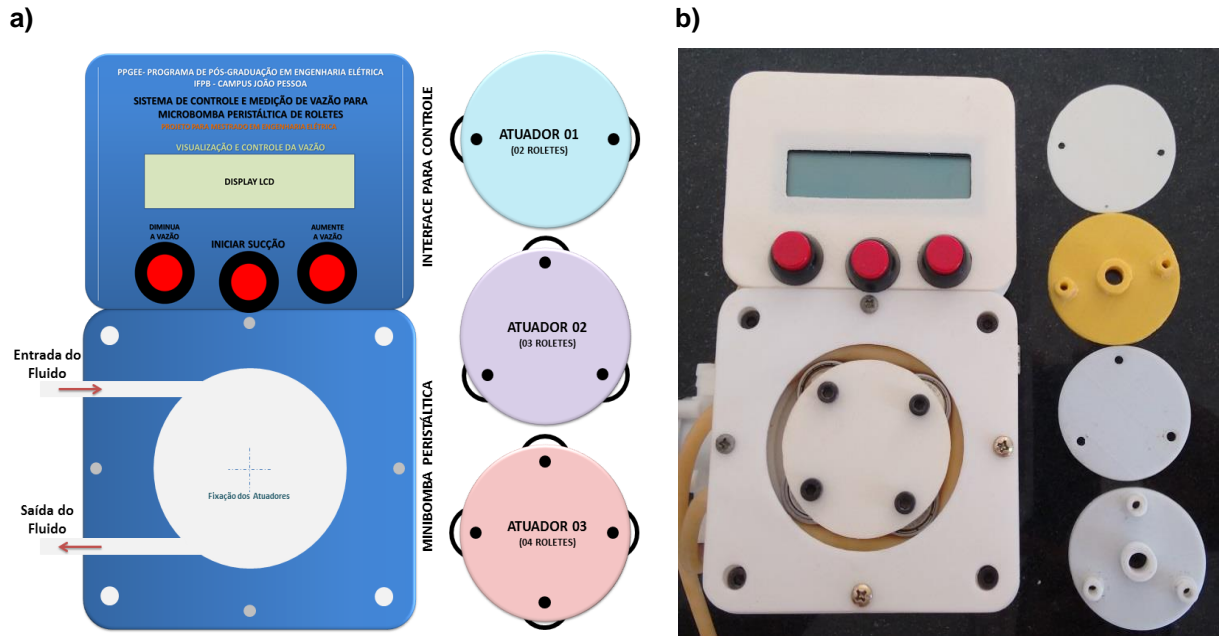


Figura 17: Ilustração da minibomba completa com os três diferentes atuadores (a) e minibomba completa e atuadores após o processo de prototipagem (b).

Para efeito de testes e análise, verificou-se que era necessário o desenvolvimento de atuadores em outro material, diferente do proposto inicialmente desenvolvido em plástico ABS e com rolamentos como roletes. Então foram usinados os atuadores e roletes em nylon com as mesmas características e dimensões dos atuadores desenvolvidos em plástico ABS.



Figura 18: Descrição do atuador de nylon para a minibomba peristáltica de roletes.

3.2.1.4. Tubos para sucção - látex e silicone

A plataforma de teste para a minibomba peristáltica de roletes será a mesma para uso dos tubos de látex e de silicone. Para este fim, foi dimensionado na base para fixação do rotor e do tudo de látex e/ou de silicone (Figura 8) um espaço para adicionar o tubo de modo que ao passar os roletes este tubo seja esmagado o suficiente para o transporte do fluido de um recipiente ao outro.

Tabela 2: Propriedades dos materiais usados nos testes.

Material	Propriedades		
Látex	Módulo de elasticidade:	1,65	MPa
	Coefficiente de Poisson:	0,45	
	Densidade:	920	kg/m ³
Silicone	Módulo de elasticidade:	3,9	MPa
	Coefficiente de Poisson:	0,45	
	Densidade:	1120	kg/m ³
Água	Densidade:	998	kg/m ³
	Viscosidade:	$1,0030 \times 10^{-3}$	Pa.s
Álcool	Densidade:	789	kg/m ³
	Viscosidade:	$0,248 \times 10^{-3}$	Pa.s

Os testes e simulações foram realizados de acordo com o exposto na seção 4.3. para o tubo de látex. Os parâmetros dos materiais usados nas simulações, tais como: látex, silicone, água e álcool, são ilustrados na Tabela 2.

Assim, a partir da realização dos testes da minibomba peristáltica de roletes proposta neste trabalho, será feita a verificação do seu comportamento em relação a variação do fluido. Esses resultados serão apresentados no Capítulo 4.

Testes Experimentais: Resultados e Discussões

Considerando os critérios de projeto apresentados no capítulo anterior, a minibomba peristáltica de roletes foi construída usando o processo de prototipagem em impressora 3D com plástico ABS, bem como a parte eletroeletrônica para seu acionamento. Feito isso, iniciou-se os testes da minibomba para os três atuadores propostos, com dois, três e quatro roletes, tanto para os desenvolvidos com o plástico ABS, quanto para os desenvolvidos com nylon. Estes testes e considerações serão apresentados a seguir.

4.1. Configuração inicial para realização dos testes

O sistema aqui proposto tem como principal objetivo o desenvolvimento de um protótipo que apresente características dimensionais que possibilitem a portabilidade, o controle integrado da vazão e um baixo consumo de potência. Portanto, torna-se necessário que haja uma ampla sincronização entre o que há disponível e o que se deseja para a obtenção dos objetivos propostos. Isso é referendado pelo fluxo ilustrado na Figura 19 ilustrada abaixo.

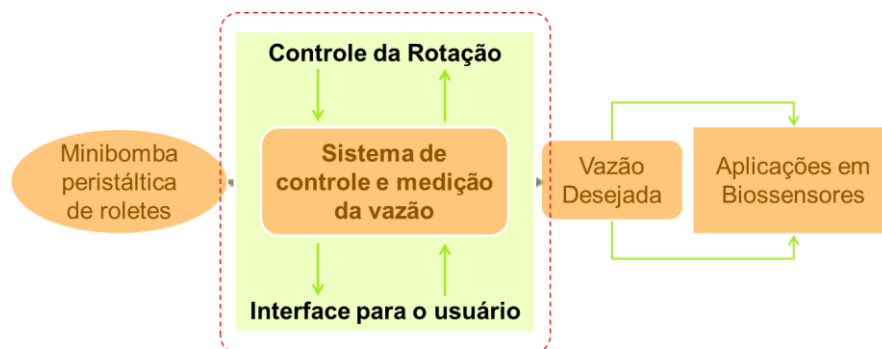


Figura 19: Sistema medidor/controlador de vazão para a minibomba peristáltica de roletes.

A partir desse fluxo percebe-se que o foco desse projeto encontra-se no que se diz respeito ao controle da vazão desta minibomba para posteriores aplicações em Biossensores. Considerando assim, passa-se a ter a necessidade da realização de testes para que se determinem os valores máximos de vazão da minibomba para

cada um dos atuadores. Para tanto, testes foram realizados considerando as configurações e arranjos descritos no tópico seguinte.

4.2. Testes com os atuadores de plástico ABS

De acordo com Arlindo (2013) [3] em seu estudo para tese de doutorado, foram realizadas análises para perceber a influência da temperatura no bombeamento, sendo necessário que fossem definidas as grandezas físicas associadas à variação térmica, para serem implementadas em seu modelo de simulação. Assim, a variação de temperatura altera parâmetros físicos da água (densidade e viscosidade) e características dos tubos de silicone, como o módulo de elasticidade. Concluiu-se, portanto, após a realização dos testes, que a maior sensibilidade à temperatura está relacionada ao módulo da elasticidade do material, ou seja, as características mecânicas. O autor conclui que: de fato, isso não se constitui numa grande surpresa, pois, aumentando o valor do módulo de elasticidade e considerando a mesma pressão aplicada, resultaria num menor deslocamento da parede do tubo e, conseqüentemente, implicaria em uma redução do fluxo transportado.

Portanto, para os testes iniciais foi realizado o bombeamento de água, na temperatura de aproximadamente 25°C, para os três diferentes atuadores, conforme a configuração ilustrada na Figura 20.

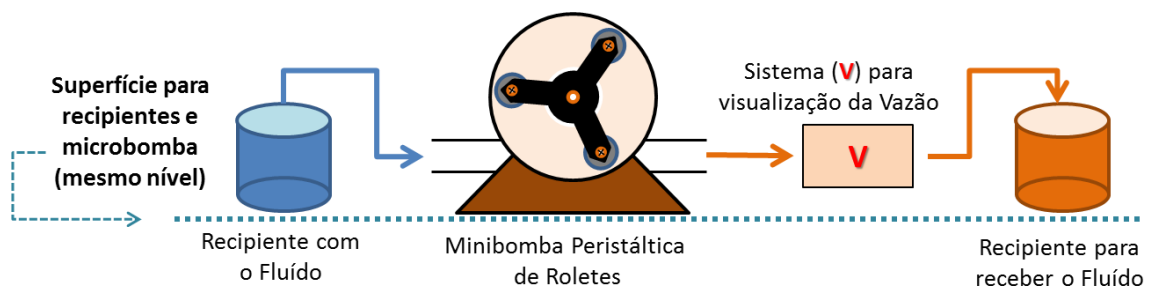


Figura 20: Sistema de teste em malha aberta para a minibomba peristáltica de roletes.

O sistema apresentado acima está em malha aberta e, para essa condição, foi medida a vazão máxima para os três atuadores propostos. O objetivo dessa medição foi verificar a vazão máxima e o efeito de bombeamento considerando os três atuadores diferente. Para estes testes foram utilizados dois recipientes, um com um volume de 200 ml de água para sucção, e o outro para entrada do fluido após

sucção da minibomba, bem como pipeta para verificação dos valores de vazão no recipiente de saída.

A sequencia desses testes e a estrutura da Figura 20 montada são apresentados na Figura 21. Os resultados da aplicação desses testes são apresentados no gráfico ilustrado na Figura 22.

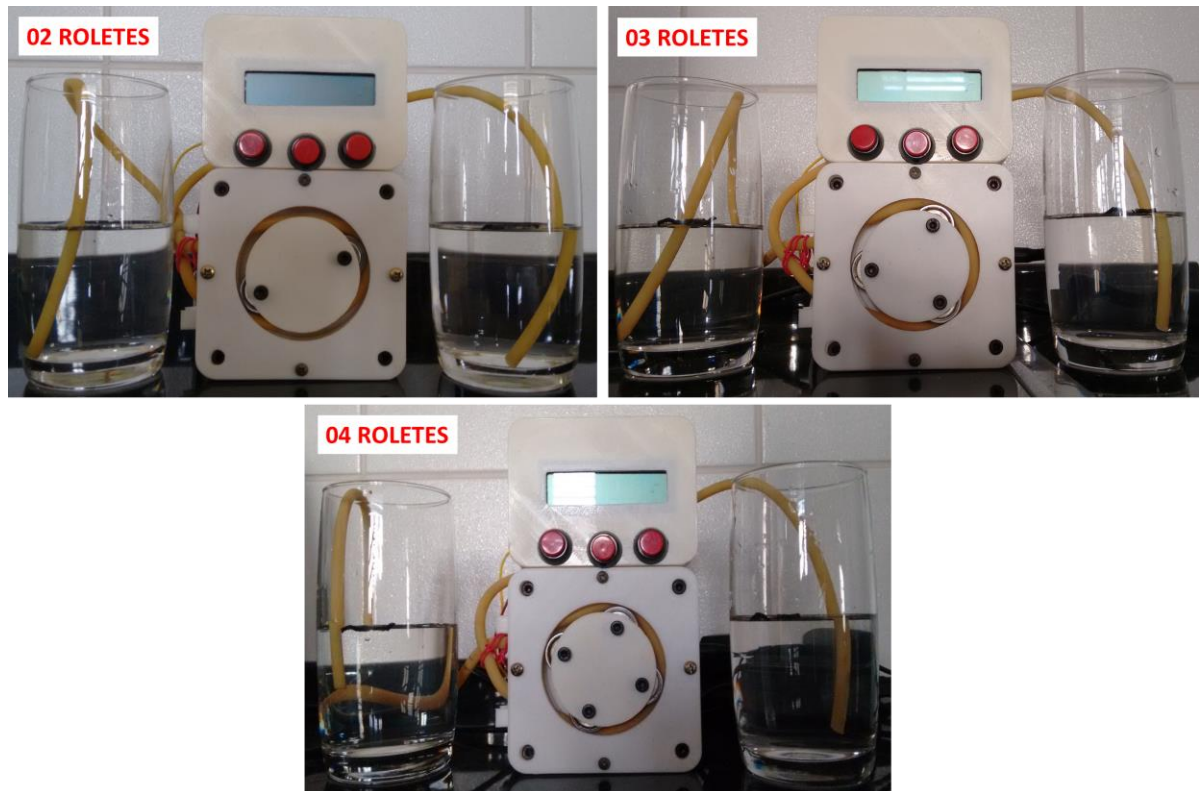


Figura 21: Estrutura de teste montada para realização dos testes de vazão máxima e mínima da minibomba peristáltica com os três atuadores (dois, três e quatro roletes).

Nele é possível concluir que a partir dos testes realizados alterando os valores de rotação do motor em uma taxa de variação de 10 a 110RPM, que foi obtida uma vazão máxima, considerando uma rotação de 80RPM, de 33,5 ml/min para uma configuração usando dois roletes, de 22,1 ml/min para uma configuração usando três roletes e de 24,8 ml/min para uma configuração com quatro roletes.

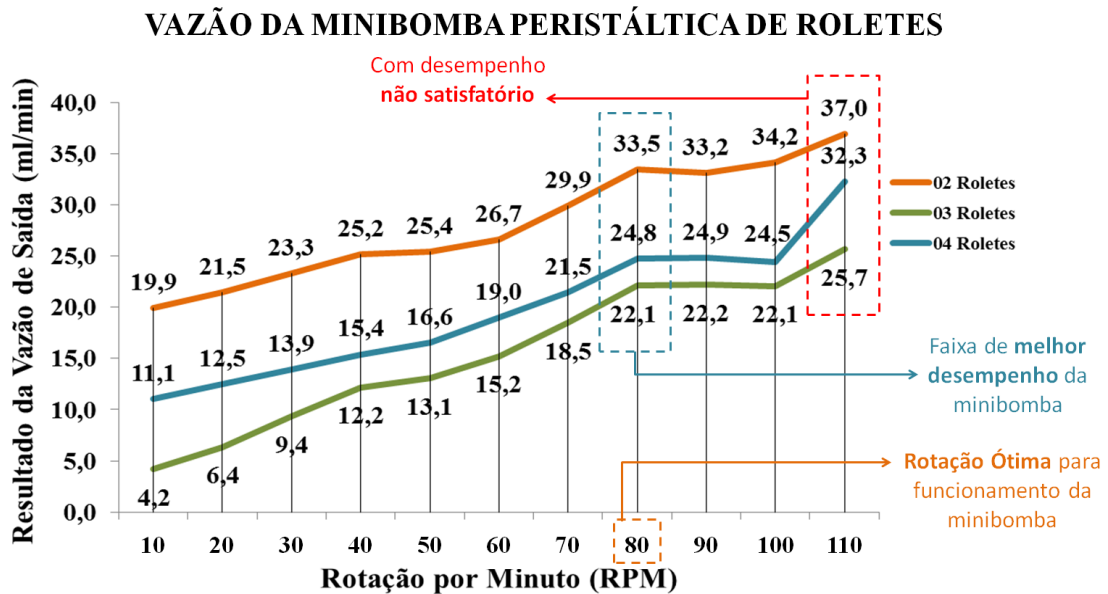


Figura 22: Gráfico do desempenho da minibomba para os três atuadores (RMP x ml/min) com indicação da faixa de melhor desempenho, valores não satisfatórios e rotação ótima para funcionamento da minibomba.

Testes com outras velocidades foram realizados e foi observado que para uma rotação superior a 80 RPM e inferiores a 100 RPM as variações da vazão foram mínimas e para valores maiores que 100 RPM, os resultados foram insatisfatórios e desconsiderados. Além disso, observou-se que o aumento da velocidade do motor de passo levava ao aumento da vazão até que a velocidade de 80 RPM foi alcançada.

4.3. Testes com os atuadores de nylon

A partir da realização dos testes com o atuador de plástico ABS surgiu à necessidade da verificação dos resultados com o uso roletes de nylon. Nesse sentido foram desenvolvidas as peças usinadas em nylon indicados na Figura 18. O principal objetivo nesse experimento seria verificar o comportamento da minibomba com uso de roletes fixos, pois como nos atuadores de plástico ABS foram utilizados rolamentos como roletes, esses deslizavam pelo tubo de látex, proporcionando, portanto, um funcionamento satisfatório da minibomba. No entanto, ao iniciar os testes com o atuador de nylon, com os atuadores fixos, chegou-se as seguintes conclusões:

- Há uma maior pressão sobre o tubo de látex, ocasionando assim um maior desgaste no mesmo;
- Os roletes travam para as três configurações - dois, três e quatro roletes, levando a um travamento do mecanismo de atuação (o motor não gira), portanto, não é realizado a sucção dos fluidos;

Assim, conclui-se que com o uso de atuadores, e principalmente os roletes, de nylon a minibomba peristáltica de roletes não funciona. Sendo, portanto, necessário o uso dos atuadores de plástico ABS e roletes de rolamentos.

4.4. Medição e cálculo da pressão hidrostática da vazão de saída da Minibomba

Para caracterizar a capacidade de transporte de fluido da minibomba peristáltica de roletes aqui apresentada, considerou-se um volume 200 ml de água a ser depositado em um recipiente. Esse teste, como já mencionado, foi realizado inicialmente com a estrutura ilustrada na Figura 21 (recipientes e minibomba no mesmo nível) e os resultados apresentados na seção 4.2. Em um segundo momento, a minibomba e o recipiente de saída estão em um plano mais elevado. Esta configuração torna-se interessante, pois permite determinar a pressão hidrostática do sistema, isto é, a altura mínima na qual deixa de haver transporte de fluido [3].

A configuração foi montada para a medição da pressão hidrostática na saída do sistema, ilustrada na Figura 23. O objetivo foi verificar a capacidade de bombeamento, considerando os três atuadores utilizados. Novamente, o fluido de testes foi água à temperatura ambiente. A estrutura para padronização desses testes foi montada e é apresentada na Figura 24.

Para os três atuadores propostos foi utilizado um tempo de acionamento de cinco minutos e a altura do líquido em estado inicial foi de 7,0 cm. Os resultados obtidos pela medição da altura H e o cálculo da pressão hidrostática são exibidos na Tabela 3. Observou-se que os valores calculados foram bem próximos e a capacidade de bombeamento para as condições apresentadas foram equivalentes.

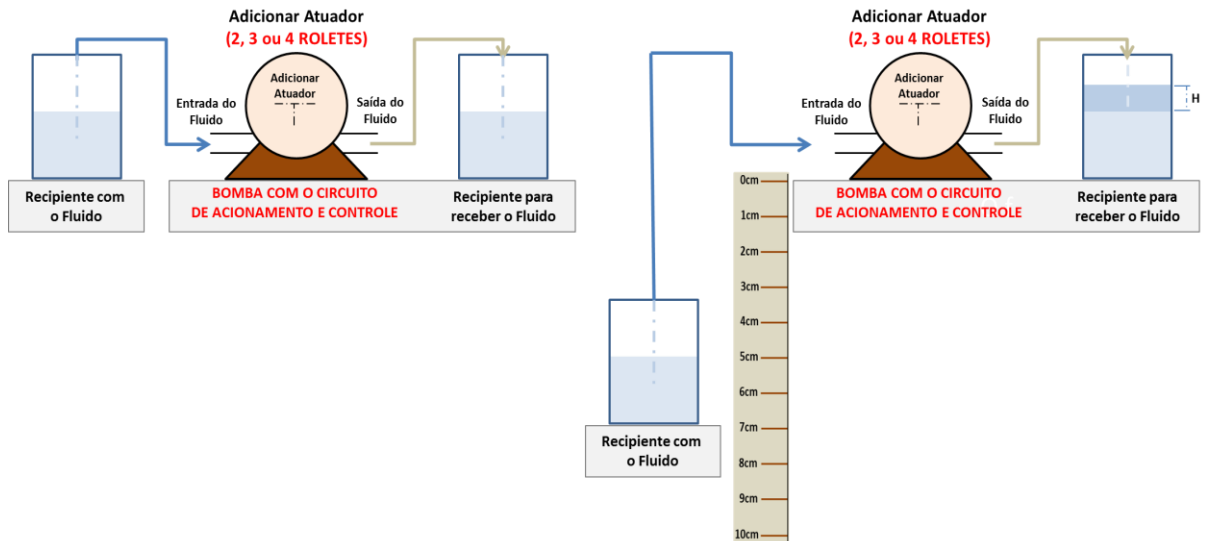


Figura 23: Configuração para teste e cálculo da pressão hidrostática de saída da minibomba.

Os valores obtidos pelos testes com a vazão máxima e a pressão hidrostática indicam que os atuadores desenvolvidos para a minibomba peristáltica proposta podem propiciar valores adequados para o projeto com biossensores SPR. Verifica-se que, embora a vazão máxima tenha sido obtida para a minibomba com o atuador de dois roletes, a altura máxima (pressão hidrostática) foi obtida para a minibomba de três roletes. Conclui-se que essas configurações podem ser usadas de forma intercambiável e adequadas quando água, a uma temperatura de 25° C, for utilizada como o fluido.

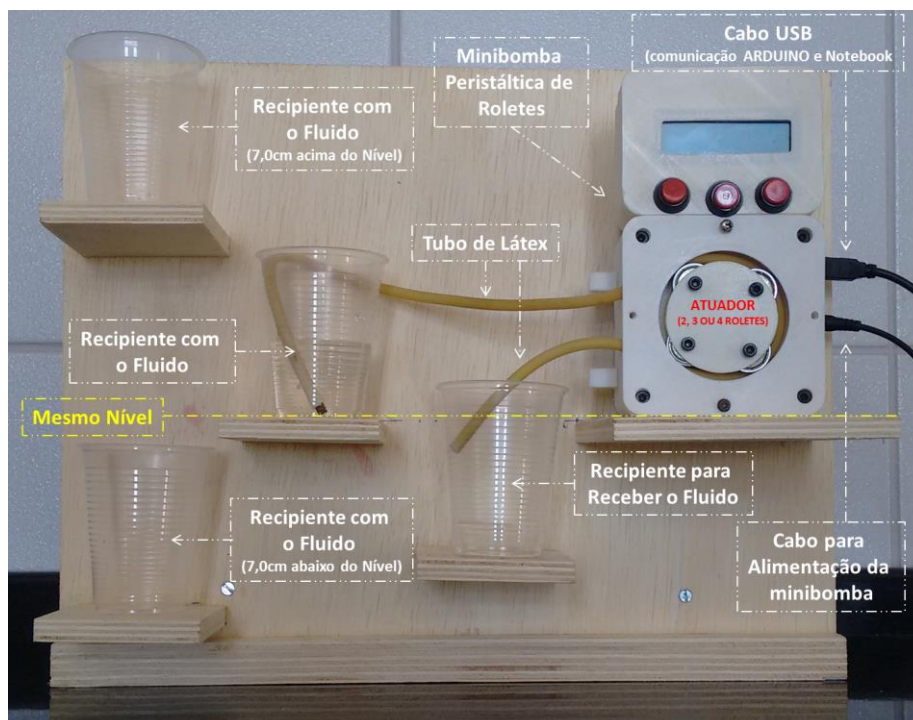


Figura 24: Estrutura para padronização dos testes (mesmo nível; 7,0 cm acima do nível e; 7,0 cm abaixo do nível).

Percebe-se, de acordo com a Figura 24, que testes foram realizados também com o recipiente com o fluido em um nível 7,0 cm acima do nível da minibomba. Percebeu-se nesse ensaio que o fluxo na saída da minibomba é maior, pois há a presença da componente física gravidade, daí o volume é maior.

Tabela 3. Resultados de medição da altura H e cálculo da pressão.

Atuador	Altura H	Pressão Calculada
2 roletes	2,0 cm	10199,2 cmH ₂ O
3 roletes	2,8 cm	10200 cmH ₂ O
4 roletes	2,4 cm	10199,6 cmH ₂ O

4.5. Testes e resultados da minibomba com fluidos de diferentes viscosidades

Em sua tese, Arlindo (2013) [3] afirma que no escoamento de fluidos existe a ação de forças dissipativas, devido à resistência que suas moléculas oferecem ao seu movimento relativo. A viscosidade é a propriedade do fluido que caracteriza o atrito interno, sendo quantificada pela viscosidade dinâmica [3].

Para um fluido real, as forças que atuam entre as camadas são tangentes à direção do seu movimento. As camadas mais próximas da parede travam as camadas superiores dando uma forma parabólica para o perfil de velocidade. As forças de atrito, que surgem entre as camadas em movimento, podem ser determinadas pela fórmula de Newton para o cisalhamento [3].

De modo geral, fluidos biológicos são mais viscosos do que a água, no entanto, nos procedimentos de análise esses fluidos biológicos não são usados na sua forma bruta, sendo, normalmente, submetidos aos processos de centrifugação e de diluição [3].

Neste sentido, como proposta do trabalho aqui apresentado, foram realizados testes com outras substâncias com viscosidade e/ou densidades diferentes do da água testada inicialmente. Para isso usou-se o álcool diluído na água, sendo adicionado um volume total de 100 ml, sendo 80 ml de água e 20 ml de álcool, e observou-se o comportamento da minibomba com os três atuadores para rotações do motor de 20, 40, 60, 80 e 100 RPM. Na realização desses testes foi utilizado o tubo de látex com 6,0 mm (d.e.) x 3,0 mm (d.i.) e o tubo de silicone com 5,0 mm

(d.e.) x 3,0 mm (d.i.), com atuadores de plástico ABS, verificando, então a vazão máxima para cada acionamento da minibomba para sucção somente de água e da combinação de água com álcool. Foram realizados cinco testes com a minibomba acionada por dois minutos e, por fim, realizou-se uma média estatística dos valores obtidos para cada atuador. Os resultados obtidos com os tubos de látex e de silicone são apresentados a seguir.

▪ Tubo de Látex

Para o atuador de dois roletes, foi possível obter uma vazão máxima de 25,0 ml/min para sucção de água (100%) e, 24,0 ml/min para sucção de álcool diluído na água (20% álcool e 80% água) a uma rotação de 100 RPM, porém, como já mencionado, será considerado uma rotação de referência para o motor de 80 RPM, pois quando aplicada rotações superiores a este valor a variação do fluxo é mínima, além de obter um funcionamento não satisfatório da minibomba. Logo, para o atuador de dois roletes, temos uma vazão de referência de 22,5 ml/min para sucção da água (100%) e, 20,5 ml/min para sucção de álcool diluído na água (20% álcool e 80% água). Percebe-se que, de acordo com as curvas traçadas no gráfico, a vazão de saída apresenta uma pequena variação em relação ao fluido usado nos testes. Isso se dá devido às características químicas desses fluídos, pois de acordo com o exposto na Tabela 2, o álcool e a água apresentam-se com viscosidade e densidade diferentes. Por esse motivo, as curvas dos resultados da vazão de saída para os casos apresentados a seguir, apresentam-se com uma pequena variação em seus valores.

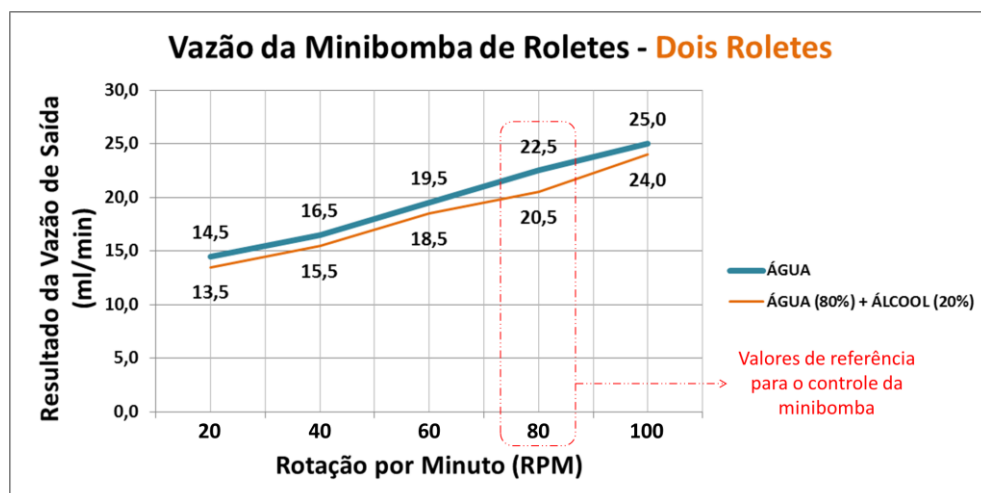


Figura 25: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de dois roletes com tubo de látex.

Com o mesmo princípio de análise, obteve-se, para a rotação de referência (80 RPM), uma vazão máxima de 18,5 ml/min para sucção de água e 20,5 ml/min para sucção de álcool diluído na água (20% álcool) para uma configuração de três roletes conforme ilustrado no gráfico apresentado na Figura 26.

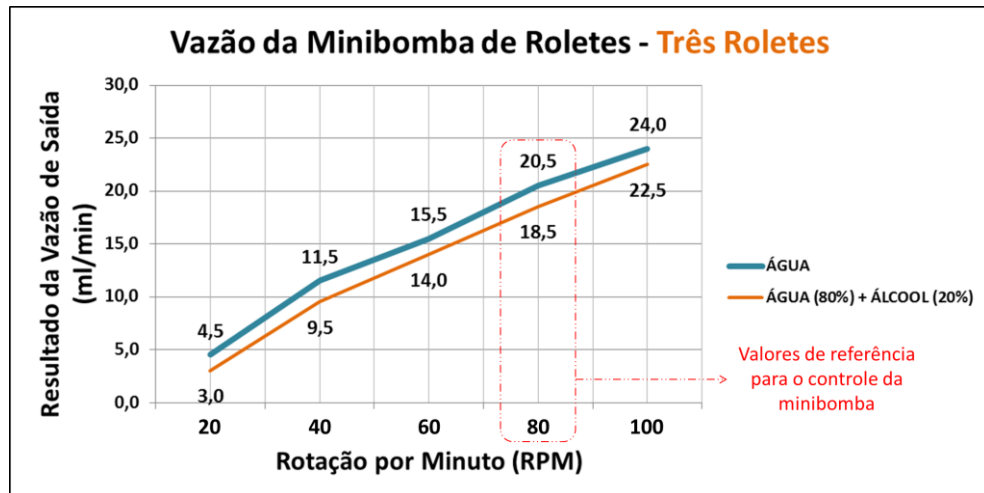


Figura 26: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de três roletes com tubo de látex.

Por fim, para uma configuração de quatro roletes, usando o mesmo princípio de análise, obteve-se uma vazão máxima de 20,5 ml/min para sucção de água e 18,0 ml/min para sucção de álcool diluído na água (20% álcool) conforme ilustrado no gráfico apresentado na Figura 27.

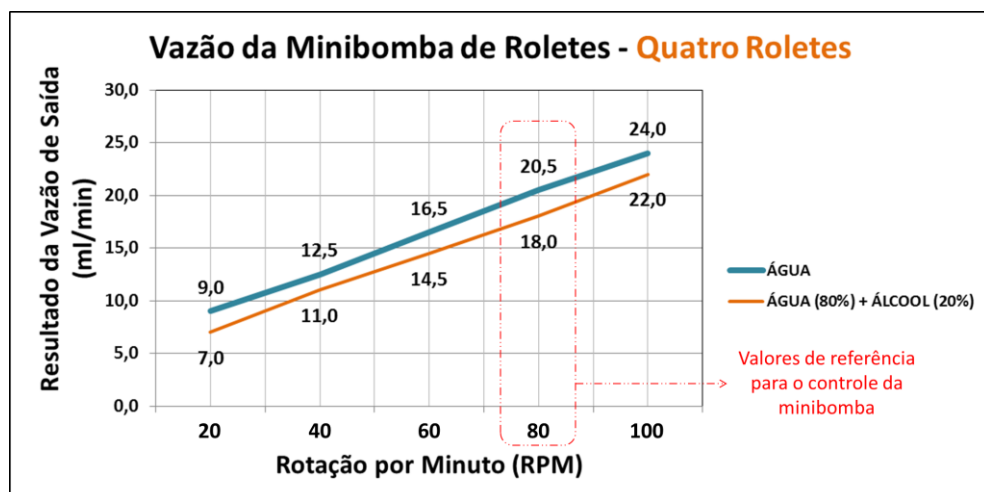


Figura 27: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de quatro roletes com tubo de látex.

Para os três casos, com valores menores de RPM os resultados apresentam-se crescentes e contínuos para todas as configurações, conforme indicado nos gráficos anteriormente apresentados.

▪ Tubo de Silicone

Considerando a rotação de referência (80 RPM), com o atuador de dois roletes, obteve-se uma vazão máxima de 27,5 ml/min para sucção de água e 22 ml/min para sucção de álcool diluído na água (20% álcool). As vazões máximas obtidas nos ensaios com as demais rotações são apresentados no gráfico ilustrado na Figura 28.

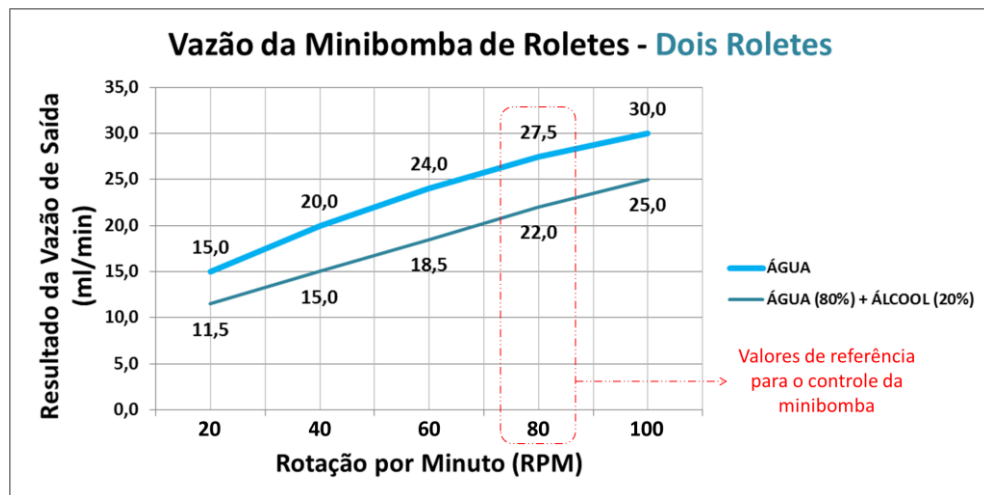


Figura 28: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de dois roletes com tubo de silicone.

Para o atuador com três roletes foi obtido uma vazão máxima de 27,5 ml/min para sucção de água e 22,5 ml/min para sucção de álcool diluído na água (20% álcool) conforme ilustrado no gráfico apresentado na Figura 29.

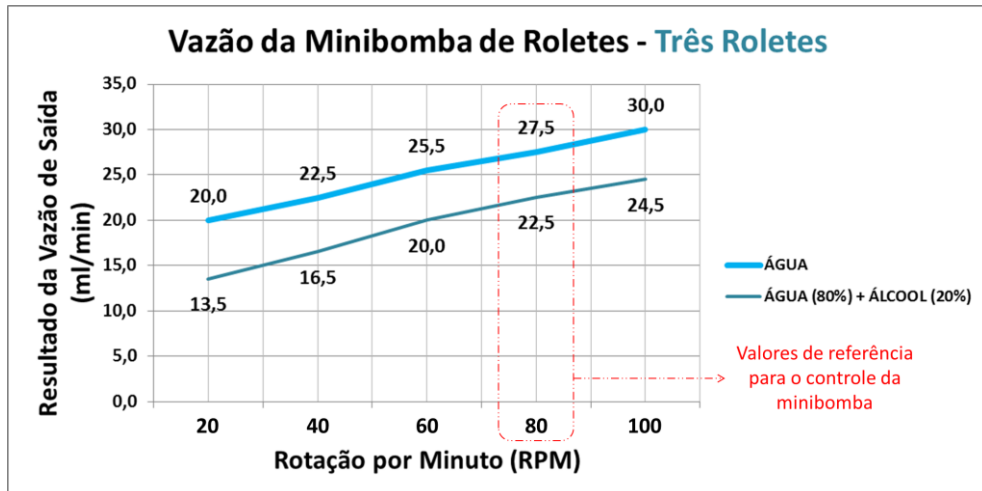


Figura 29: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de três roletes com tubo de silicone.

Usando o mesmo princípio de análise, obteve-se uma vazão máxima de 17,5 ml/min para sucção de água e 16,0 ml/min para sucção de álcool diluído na água (20% álcool) para o atuador de 4 roletes, conforme ilustrado no gráfico apresentado na Figura 30.

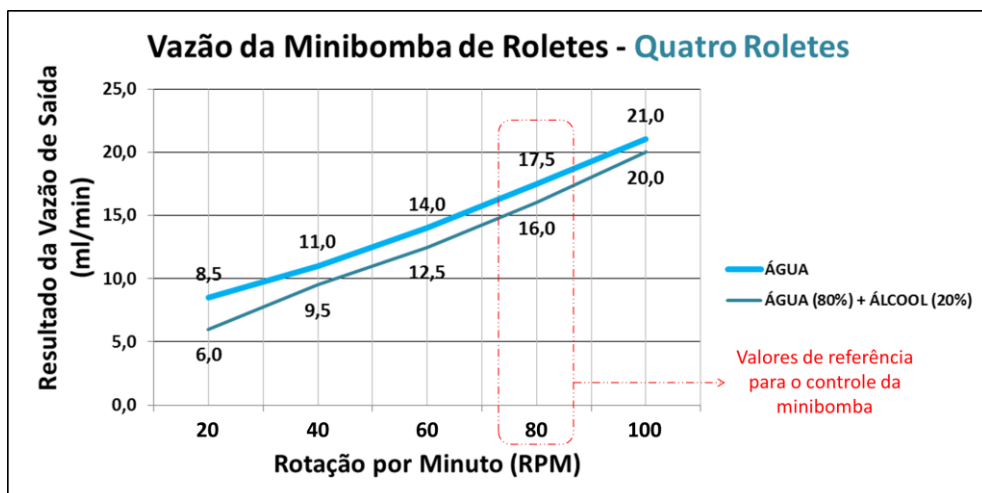


Figura 30: Resultado da sucção de água e álcool da minibomba com o atuador de quatro roletes com tubo de silicone.

4.6. Ajuste da rotação do motor para controle da vazão

A vazão pode ser ajustada num amplo intervalo, de forma contínua ou em pequenos incrementos, controlando-se a rotação da bomba ou o diâmetro interno dos tubos [3]. Nesse sentido, visando à aplicação aqui apresentada (com o sistema em malha aberta), iniciou-se o processo de verificação e ajuste da rotação do motor para medição do volume de saída para cada um dos três atuadores (dois, três e

quatro roletas). Feito isso, os parâmetros de rotação poderão ser ajustados, via *software*, configurando o número de voltas que o motor dará para que seja obtida a vazão desejada pelo usuário após a utilização da interface de controle do sistema já apresentadas na sessão 3.2.1.2.

Na Figura 31, observa-se o fluxograma do funcionamento da minibomba em relação à programação do Arduino. Em malha aberta, após a observação feita na relação rotação e vazão de saída, foi ajustada uma variável para definição do número de rotação necessária para a obtenção da rotação desejada pelo usuário. Multiplicando assim esse valor pelo número de passos do motor.

Chegou-se a esses valores considerando a rotação definida como padrão (80 RPM), número de passos do motor, relação da caixa de redução mecânica e vazão máxima (valores obtidos nos testes apresentados na sessão 4.5.).

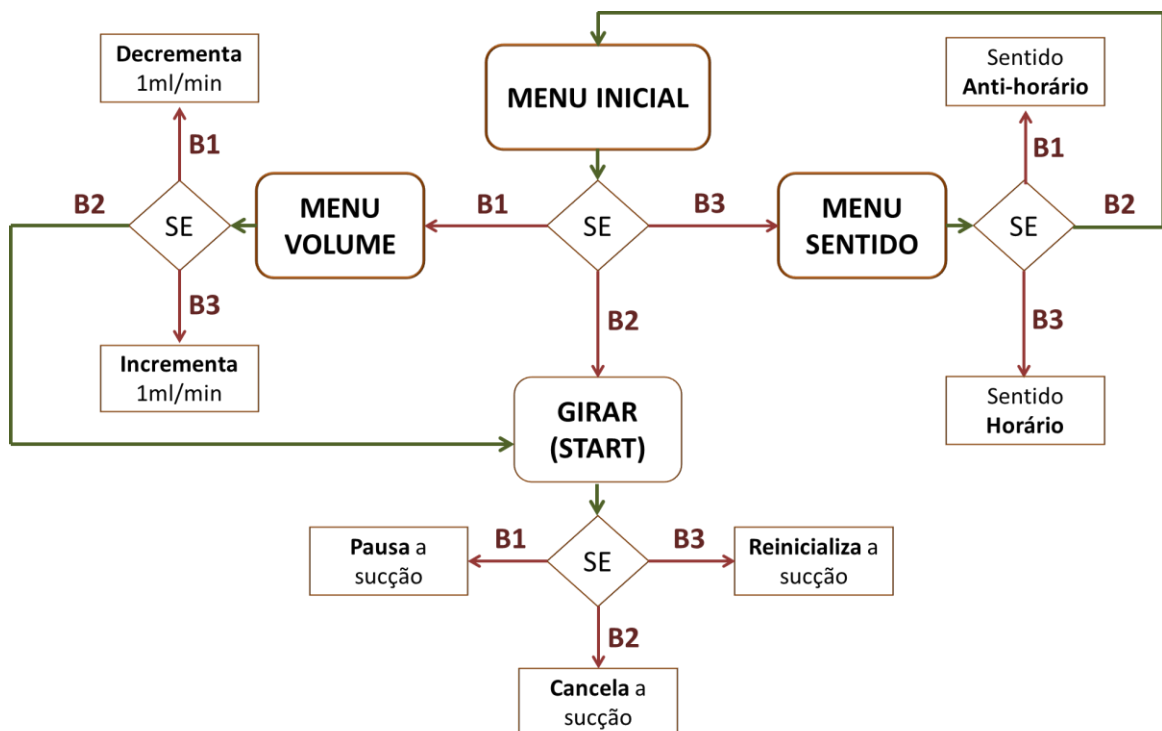


Figura 31: Fluxograma do funcionamento do *software* do Arduino.

De acordo com o exposto, é necessário apenas um pequeno ajuste dessa constante, dependendo do atuador e do líquido usado, por meio da programação no Arduino.

Conclusões e Trabalhos Futuros

Nesse trabalho, apresentou-se o projeto e desenvolvimento de uma minibomba peristáltica de roletes com três diferentes atuadores, com dois, três e quatro roletes, com medição e controle de vazão e fluido. Nele foi desenvolvida ainda uma interface de hardware para definição e controle da vazão produzida pela minibomba, bem como realizados testes em diferentes situações com configurações e componentes distintos. Foram testados atuadores produzidos em plásticos ABS (com dois, três e quatro roletes, sendo rolamentos usados como roletes), assim como em nylon (com dois, três e quatro roletes, sendo toda a peça desenvolvida em nylon e com os roletes fixos). Com esta última configuração não foi possível à obtenção de resultados, pois como indicado na sessão 4.3 a minibomba não apresentou resultados satisfatórios para as aplicações propostas nesse projeto. Ainda foram testados os tubos para sucção dos fluidos, utilizando-se tubos de látex e silicone. Os fluidos com características diferentes, tais como densidades e viscosidade, também foram devidamente testados, sendo testados água e álcool.

Por fim, considera-se que a minibomba peristáltica aqui apresentada trata-se de uma boa alternativa para sistemas que requeiram o transporte de fluidos de forma laminar, contínua e controlada, como é o caso do sensoriamento biológico baseado na ressonância de plásmons de superfície ou SPR (*Surface Plasmon Resonance*) que necessitam desse tipo de mecanismo. Além de atender e superar as características das bombas comerciais apresentadas na Tabela 1, sendo a bomba peristáltica de roletes aqui desenvolvida capaz de atender todas as necessidades já citadas, bem como apresenta a possibilidade de melhoramento, isso em relação à adição das técnicas e recursos descritos a seguir como trabalhos futuros.

Diante do trabalho apresentado e resultados e discussões já citadas neste trabalho, pode-se citar as seguintes propostas de continuidade:

- Realizar novos testes experimentais com diferentes estruturas da minibomba, bem como com outros diferentes atuadores (alterando assim o número de roletes);

- Aplicar técnicas de controle sem fio, com utilização de dispositivos eletrônicos, tais como smartphones e tablets, para acionamento e controle da minibomba aqui apresentada.

Referências Bibliográficas

- [1] OLIVEIRA, Leiva Casemiro. **Sistema computacional para biossensor baseado na ressonância de plasmas de superfície**. 2011. 132 f. Dissertação, UFCG Campina Grande - PB, 2011.
- [2] MOREIRA, Cleumar da Silva. **Projeto e realização de um biochip óptico para aplicações biológicas baseado no princípio de ressonância de plásmons de superfície**. 2010. 136 f. Tese, UFCG Campina Grande - PB, 2010.
- [3] NETO, Arlindo Garcia de Sá Barreto. **Contribuição ao Projeto de Sistemas de Propulsão de Fluidos**. 2013. 230 f. Tese, UFCG Campina Grande - PB, 2013.
- [4] DAZZO, J. J.; HOUPIS, C. H. **Análise e projeto de sistemas de controle lineares**. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 2002.
- [5] OGATA, K. **Engenharia de controle moderna**. 4ª edição, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 2003.
- [6] Barreto Neto, A. G. S.; Lima, A. M. N.; Neff, H.; GomesS, C. L.; Moreira, C. **Linear peristaltic pump driven by three magnetic actuators: simulation and experimental results**. I2MTC 2011 : IEEE International Instrumentation And Measurement Technology, v. 134,n. 2, p. 555 – 564, 2011.
- [7] Barreto Neto, A. G. S. **Contribuição ao Projeto de Sistemas de Propulsão de Fluidos**. 2013. 230 f. Tese de doutorado, UFCG, Campina Grande - PB, 2013.
- [8] Homola, J (2006). **Surface Plasmon Resonance Based Sensors**. Springer-Verlag, Berlin.
- [9] Jaffrin, M. Y.; Shapiro, A. H. Peristaltic pumping. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 3, n. 1, p. 13–37, 1971.
- [10] Laser, D. J. and Santiago. **A review of micropump**, Journal of Micromechanics and Microengineering, v. 14, p. 35-64, 2004.
- [11] Neff, H; Zong, W.; Lima, A. M. N.; Borre, M. and Holzhüter, G (2006). **Optical properties and instrumental performance of thin gold films near the surface plasmon resonance**. Thin Solid Films, v. 496, pp. 689-697.
- [12] Rich, R. L.; Myszka, D. G (2005). **Survey of the year 2004 commercial optical biosensor literature**. Journal of Molecular Recognition, v. 18, pp. 431–478.

[13] OLIVEIRA, J.E.; CONSOLIN-FILHO, N.; PATERNO, L. G.; MATTOSO, L. H. V. e MEDEIROS, E. S. **Uso de polímeros condutores em sensores. Parte 3: Biossensores.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.8.1, 2013.

[14] MATOS, Renato C.; GUTZ, Ivano G. R.; ANGNES, Lúcio; FONTENELE, Rinaldo S. e; PEDROTTI, Jairo J. **Propulsor Pneumático Versátil e Isento de Pulsção para Sistemas de Análise em Fluxo.** Química Nova, Vol. 24, 2001.

[15] SHENCHEN (BT300N) - *Peristaltic Pump*. <http://www.alibaba.com>. Acessado em 13 de Junho 2016.

[16] TOPTION (WT300S) - *Peristaltic Pump*. <http://www.alibaba.com>. Acessado em 13 de Junho 2016.

[18] TUMOLO, Tathyana Cristina. **Desenvolvimento de biossensores de membranas e caracterização da interação entre citocromo c e biocamadas híbridas por Ressonância Plasmônica de Superfície.** 2008. 217 f. Tese, Universidade de São Paulo - Instituto de Química, 2008.

[19] DU, M.; YE, X.; WU, K.; ZHOU, Z. **A peristaltic micro pump driven by a rotating motor with magnetically attracted steel balls.** Sensors, v. 9, n. 4, p. 2611-2620, 2009.