

ANGELINE RODRIGUES DOS SANTOS
MARC LUCAS HALLAK NEILSON

**BOMBA PERISTÁLTICA DE DUTO FLEXÍVEL: REPROJETO E
MELHORIAS**

São Paulo
2008

ANGELINE RODRIGUES DOS SANTOS
MARC LUCAS HALLAK NEILSON

BOMBA PERISTÁLTICA DE DUTO FLEXÍVEL: REPROJETO E MELHORIAS

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo como parte
do Projeto de Conclusão de Curso

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Angeline Rodrigues dos

**Bomba peristáltica de duto flexível : reprojeto e melhorias /
A.R. dos Santos, M.L.H. Neilson. -- São Paulo, 2008.
p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.**

**1.Bombas hidráulicas 2.Coração artificial 3.Eletromagnetismo
I. Neilson, Marc Lucas Hallak II.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e
de Sistemas Mecânicos III.t.**

Preço algum é alto demais para o
privilégio de ser dono de si mesmo.

(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo e reprojetado de uma bomba peristáltica linear, denominada Bomba Peristáltica de Duto Flexível (BPDF), anteriormente projetada no Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da USP (PIRES, 2007).

A bomba, completamente desprovida de válvulas, consiste principalmente em um duto flexível que é comprimido de forma sincronizada e sucessiva por atuadores eletromagnéticos de forma a mimetizar movimentos peristálticos e, dessa forma, estabelecer vazão.

O reprojetado desta bomba se dá pela implementação de um sistema oscilatório para amplificação do movimento dos atuadores de forma a aumentar seu desempenho em termos de vazão e pressão desenvolvidas.

Os resultados obtidos devido à implementação do sistema oscilatório foram promissores, garantindo vazão média de aproximadamente 30 mL/s e pressão manométrica média de aproximadamente 400 Pa, na melhor configuração estudada. Tais resultados aproximam o desempenho da BPDF, em termos de vazão e pressão, aos das bombas comerciais estudadas. Este trabalho apresenta as principais modificações implementadas e sugere novas ações para o aprimoramento geral da BPDF.

Palavras-chave: Bomba peristáltica linear. Coração artificial. Atuador eletromagnético. Solenóide bi-direcional. Onda progressiva.

ABSTRACT

The aim of project is to study and redesign a linear peristaltic pump, called here Flexible Duct Peristaltic Pump (FDPP); previously designed at the Mechatronics Engineering Department of the Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PIRES, 2007).

The pump in question uses no valves whatsoever, and consists mainly of a flexible duct which is compressed in a synchronized manner by electromagnetic actuators, mimicking peristaltic movements in order to establish liquid flow.

This redesign implements an oscillatory system in order to amplify the actuator's displacement and increase the pump's overall performance, especially its output pressure and flow rate.

Results obtained with the oscillatory system were promising, guaranteeing with good repeatability an average output flow rate of approximately 30 mL/s (0.0011 cu ft/s) and average output pressure of approximately 400 Pa (0.06 psi) at its best configuration. These results bring the FDPP's performance closer to commercial varieties.

This study presents the main implemented modifications, and suggests new venues for the FDPP's overall improvement.

Keywords: Linear peristaltic pump. Artificial heart. Electromagnetic actuator. Bidirectional solenoid. Progressive wave.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bomba peristáltica de roletes	13
Figura 2 – Bomba de roletes de Michael DeBakey, e seu uso em transfusão sanguínea.....	13
Figura 3 - Espiral de projeto	16
Figura 4 – Exemplo de seqüência de acionamento da BPDF e esquematização de uma célula fluida	19
Figura 5 – Esquema da BPDF e bancada de ensaio	20
Figura 6 – Representação esquemática do sistema de recalque.....	20
Figura 7 – Representação esquemática do sistema mecânico	21
Figura 8 – Acionamento dos osciladores.	21
Figura 9 – Protótipo inicial (Protótipo 0)	23
Figura 10 – Vazão média x período – protótipo 0 [PIRES, 2007]	24
Figura 11 – Pressão média x período – protótipo 0 [PIRES, 2007]	24
Figura 12 – Sistema mecânico do protótipo 1	25
Figura 13 – Seqüência de acionamento do Protótipo 1.....	26
Figura 14 – Modularização do sistema eletrônico do Protótipo 1	26
Figura 15 - Vazão em função do período	28
Figura 16 – Representação do Protótipo 2 em CAD	29
Figura 17 – Visão geral da BPDF.....	30
Figura 18 – Montagem do conjunto e fixação contra a base.....	31
Figura 19 – Sistema mecânico do protótipo 2	32
Figura 20 – Oscilador eletromagnético.....	33
Figura 21 – Circuito de alimentação.....	35
Figura 22 – Placa de alimentação	36
Figura 23 – Ponte H completa transistorizada.....	37
Figura 24 – Circuito de acionamento.....	38
Figura 25 – Placa de acionamento.....	39
Figura 26 – Pinagem do DB25 – conector fêmea.....	40
Figura 27 – Seqüência do protótipo 1	41
Figura 28 – Carta de tempos da seqüência do protótipo 1	41

Figura 29 – Seqüência trifásica e sua equivalente linearizada.....	43
Figura 30 – Seqüência trifásica.....	44
Figura 31 – Carta de tempos da seqüência trifásica linearizada.....	44
Figura 32 – Seqüência trifásica simplificada	45
Figura 33 – Seqüência trifásica simplificada	46
Figura 34 - Vazão x período – seqüência do Protótipo 1 – protótipo 2.....	48
Figura 35 – Pressão x período – seqüência do Protótipo 1 – protótipo 2.....	48
Figura 36 – Comportamento da vazão – seqüência do Protótipo 1 – Protótipo 2	49
Figura 37 - Comportamento da pressão – seqüência do Protótipo 1 – Protótipo 2...	49
Figura 38 - Vazão x período – seqüência trifásica – protótipo 2.....	51
Figura 39 - Pressão x período – seqüência trifásica – protótipo 2.....	51
Figura 40 – Comportamento da vazão – seqüência trifásica – Protótipo 2	52
Figura 41 – Comportamento da pressão – seqüência trifásica – Protótipo 2	52
Figura 42 – Comportamento da vazão – seqüência trifásica simplificada – Protótipo 2	54
Figura 43 – Comportamento da pressão – seqüência trifásica simplificada – Protótipo 2	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais dispositivos de auxílio ventricular.....	14
Tabela 2 – Resultados obtidos com o protótipo 0	23
Tabela 3 - Vazão x período – protótipo 1	27
Tabela 4 – Tabela da verdade para a Ponte H.....	37
Tabela 5 – Palavras de controle da sequência do Protótipo 1	42
Tabela 6 – Palavras de controle da sequência trifásica linearizada	45
Tabela 7 – Palavras de controle da sequência trifásica simplificada.....	46
Tabela 8 – Dados obtidos de vazão e pressão para ensaio da sequência do Protótipo 1 no protótipo 2	47
Tabela 9 - Dados obtidos de vazão e pressão para ensaio da sequência trifásica no protótipo 2	50
Tabela 10 – Dados obtidos de vazão e pressão para ensaio da sequência trifásica simplificada no protótipo 2.....	53
Tabela 11 – Comparação do Protótipo 2 (sequência trifásica) com outras etapas do projeto	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	MOTIVAÇÃO	11
1.2	OBJETIVOS.....	14
2	METODOLOGIA.....	16
2.1	MATERIAIS	17
2.2	MÉTODOS	17
3	BPDF.....	19
3.1	SISTEMA DE RECALQUE	20
3.2	SISTEMA MECÂNICO	21
3.3	SISTEMA ELETRÔNICO	21
4	PROTÓTIPO 0.....	23
5	PROTÓTIPO 1.....	25
6	PROTÓTIPO 2.....	29
6.1	SISTEMA DE RECALQUE	30
6.2	SISTEMA MECÂNICO	31
6.2.1	SISTEMA OSCILATÓRIO	33
6.2.2	ACIONAMENTO <i>PUSH-PULL</i>	33
6.3	SISTEMA ELETRÔNICO	34
6.3.1	ESTRATÉGIA DE ACIONAMENTO	34
6.3.2	LÓGICA DE ACIONAMENTO	39
7	RESULTADOS	47
7.1	SEQÜÊNCIA DO PROTÓTIPO 1	47
7.2	SEQÜÊNCIA TRIFÁSICA.....	50
7.3	SEQÜÊNCIA DE ACIONAMENTO TRIFÁSICA SIMPLIFICADA	53
8	DISCUSSÕES.....	55

9 CONCLUSÕES	57
APÊNDICE A – DESENHOS DE FABRICAÇÃO E CONJUNTO	59
APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DA ROTINA DE CONTROLE	68

1 INTRODUÇÃO

Este projeto dá continuidade ao estudo de uma bomba peristáltica de duto flexível (BPDF) anteriormente projetada no Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da USP como Trabalho de Conclusão de Curso (PIRES, 2007).

Em uma bomba peristáltica, uma célula de fluido é deslocada positivamente conforme um duto flexível é comprimido ou expandido, de acordo com alguma seqüência de acionamento (JAFFRIN; SHAPIRO, 1971). O ciclo de acionamento pode ser definido pela rotação de um dispositivo mecânico, no caso de bombas peristálticas rotativas, ou de acordo com uma seqüência determinada no caso de bombas peristálticas lineares. Uma das principais características da bomba peristáltica é a capacidade de vedação do fluido, pois este não entra em contato com a bomba; devido a essa característica, são utilizadas normalmente no bombeamento de fluidos agressivos ou estéreis, onde a contaminação do fluido pelo ambiente ou do ambiente pelo fluido é crítica.

O princípio de funcionamento proposto anteriormente e estudado neste trabalho consiste no desenvolvimento de fluxo em um duto flexível através da imposição de uma onda progressiva no fluido pelo uso de três pistões em série. Utiliza-se energia eletromagnética como forma de acionamento e um sistema oscilatório para a amplificação do movimento.

1.1 MOTIVAÇÃO

As muitas formas construtivas das bombas hidráulicas permitem sua utilização numa enorme gama de aplicações, trabalhando com os mais diversos fluidos. É essa versatilidade das bombas hidráulicas que encoraja sua utilização em aplicações especiais.

Uma das principais características da BPDF aqui estudada é o uso do duto flexível, que agrega duas propriedades importantes ao projeto: isolamento do fluido de trabalho do meio externo e da bomba em si, e a eliminação da necessidade de válvulas.

Devido à possibilidade de manter a pureza do fluido de trabalho, há possíveis aplicações em diversas áreas, tais como:

- Área médica - uso em corações artificiais, tanto internos, quanto para circulação extracorpórea ou, ainda, como forma de auxiliar e reduzir a carga sobre o próprio coração do paciente (como dispositivo de auxílio ventricular). Há também a possibilidade de aplicação em dosadores de drogas;
- Indústria farmacêutica – controle do bombeamento de produtos e reagentes em que se precisa manter a pureza e evitar contaminações;
- Indústria química – controle do bombeamento de produtos e reagentes agressivos (ácidos, por exemplo) ou quando há perigo de contaminação;
- Indústria alimentícia – controle do bombeamento de produtos e materiais em que se precisa evitar contaminação, tais como sucos, laticínios e aromatizantes.

Há também a possibilidade de compactação da BPDF, abrindo um leque de aplicações em que se precisa de bombas de dimensões reduzidas. Aplicações como sistemas de refrigeração de CPUs, por exemplo, que não requerem pressões de operação elevadas.

Devido à grande gama de aplicações, e à necessidade de um guia para o desenvolvimento do projeto, foca-se nas aplicações médicas.

Embora diversas formas construtivas tenham sido exploradas – bombas centrífugas, de roletes, pulsáteis de membrana e axiais – no projeto de bombas hidráulicas aplicado a corações artificiais há certos requisitos de nota.

Bombas peristálticas do tipo de roletes – exemplificada na Figura 1 – foram utilizadas e estudadas em configurações de circulação sanguínea. Diversos estudos foram conduzidos acerca desse tipo de bomba, que apresenta vantagens desejáveis, como possibilidade de oxigenação extracorpórea pela membrana, monitoramento de pressão, regulação da bomba em si, portas de acesso para a administração de drogas e fluidos, detecção de bolhas de ar (FUCHS; NETZ, 2002).

Na década de 1930, Michael DeBakey inventou uma bomba de roletes acionada manualmente para se fazer transfusões sanguíneas diretamente entre doador e paciente; essa bomba, ilustrada na Figura 2, tinha um contador mecânico que marcava o quanto de fluido havia sido bombeado. Posteriormente, a bomba foi

motorizada e passou a aplicada em circulação sanguínea extracorpórea, permitindo a primeira cirurgia em coração aberto em 1953.

A aplicação da bomba de roletes em circulação sanguínea tem sido amplamente associada às elevadas taxas de hemólise devido ao princípio de funcionamento (BENNETT et al., 2004), encorajando a busca por novas formas construtivas.

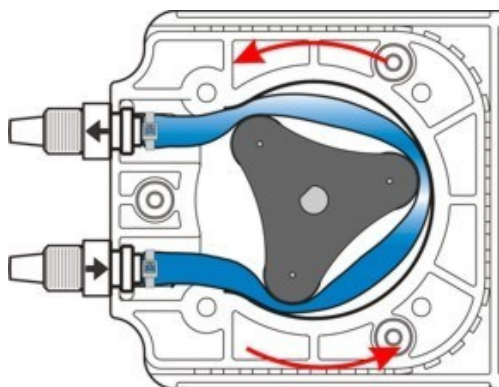


Figura 1 – Bomba peristáltica de roletes

Bombas peristálticas como um todo, não só as de roletes, apresentam as características supracitadas assim como eliminam perdas mecânicas em rotores, válvulas, partes girantes e no próprio motor de acionamento, isolam completamente o fluido bombeado e minimizam a utilização de partes mecânicas móveis, associando a confiabilidade da bomba às dos poucos componentes que a integram. Assim, a BPDF torna-se uma forma construtiva promissora para bombeamento em corações artificiais.

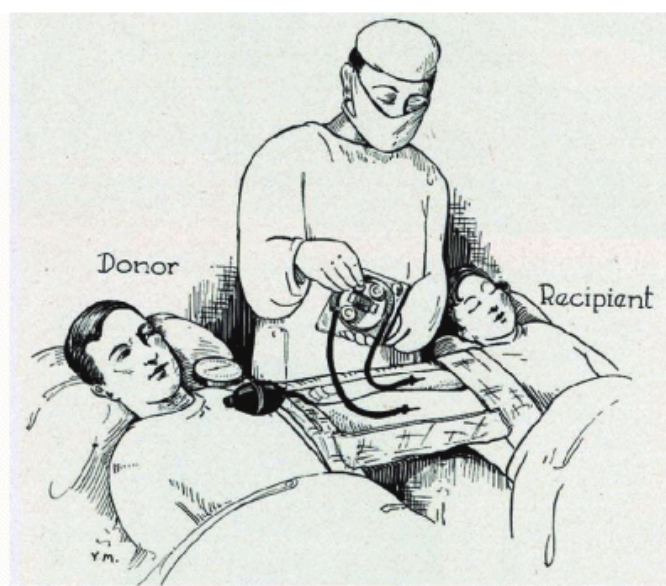
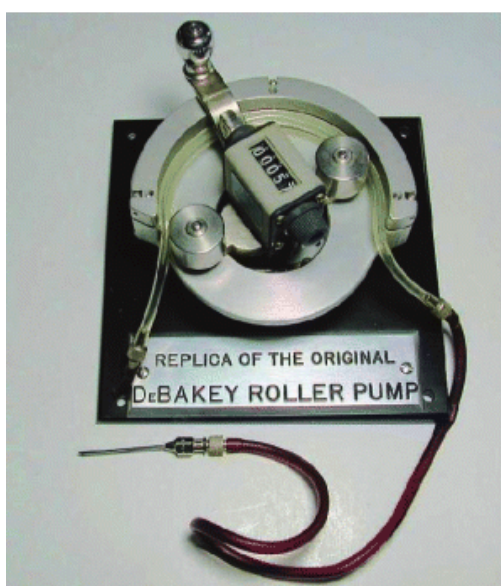


Figura 2 – Bomba de roletes de Michael DeBakey, e seu uso em transfusão sanguínea

Vale ressaltar que este projeto não incluirá um estudo detalhado de viabilidade em corações artificiais. Há diversos aspectos a serem considerados no projeto de uma bomba para circulação sanguínea, tais como taxa de hemólise (degradação do sangue), a dinâmica fluida do sangue e a interação da bomba com tecidos vivos, que requerem engenharia de altíssima responsabilidade.

1.2 OBJETIVOS

O primeiro protótipo da bomba peristáltica, desenvolvida anteriormente (PIRES, 2007) se mostrou capaz de bombear água, mostrando a validade do princípio de funcionamento proposto. O objetivo principal deste trabalho é estudar o funcionamento da bomba peristáltica de duto flexível e propor e implementar melhorias de forma que sua capacidade de bombeamento, medida em termos de vazão e carga, seja aumentada.

Tabela 1 – Principais dispositivos de auxílio ventricular

Nome Comercial	Vazão (mL/s)	Tipo de bomba
Hemopump	58,3	Bomba axial de parafuso
TandemHeart pVAD	66,7	Bomba centrífuga, extracorpórea
Impella Recover LD/LP 5.0	75	Bomba axial
ABIOMED BVS5000	83,3	Bomba pneumática, extracorpórea
Jarvik 2000 Heart	83,3	Bomba axial
ABIOMED AB5000	100	Bomba de membrana, extracorpórea
Thoratec VAD	116,7	Bomba pneumática
Levitronix CentriMag LVAS	165	Bomba axial com rotor levitado magneticamente
Medtronic Bio-Pump	166,7	Bomba axial
Thoratec HeartMate II LVAS	166,7	Bomba axial
Thoratec HeartMate XVE LVAS	166,7	Bomba elétrica de diafragma
Thoratec HeartMate IP LVAS	200	Bomba pneumática de diafragma

De modo a ter-se uma meta palpável, estabelece-se como referência a capacidade de uma bomba comercial utilizada em dispositivos de auxílio ventricular. Os dados da

Tabela 1 foram obtidos na página do TEXAS HEART INSTITUTE. A *Hemopump*, uma bomba axial de parafuso já em desuso, apresenta a mínima vazão dentre as bombas comerciais. A vazão por ela apresentada é de aproximadamente 58,3 mL/s (3,5 L/min).

Busca-se neste trabalho a validação de uma forma construtiva e melhorias consideráveis no desempenho do protótipo anterior, usando água como fluido de trabalho.

2 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em um reprojeto e envolve o estudo de um princípio de funcionamento; adota-se então uma metodologia baseada numa espiral de projeto como visto na Figura 3. Para o estudo do comportamento da bomba, testes são realizados, iniciando-se pelo protótipo construído no trabalho anterior (chamado doravante 'Protótipo 0'). Desta forma é possível a verificação das variáveis que influem no desempenho da bomba. Analisa-se teoricamente a influência de tais variáveis e parte-se para a proposta de soluções para a melhora do desempenho.

Uma solução é escolhida, de acordo com uma comparação teórica da melhora oferecida e a possibilidade de viabilização. Esta solução é implementada, constituindo o protótipo seguinte e iniciando um novo ciclo da espiral.

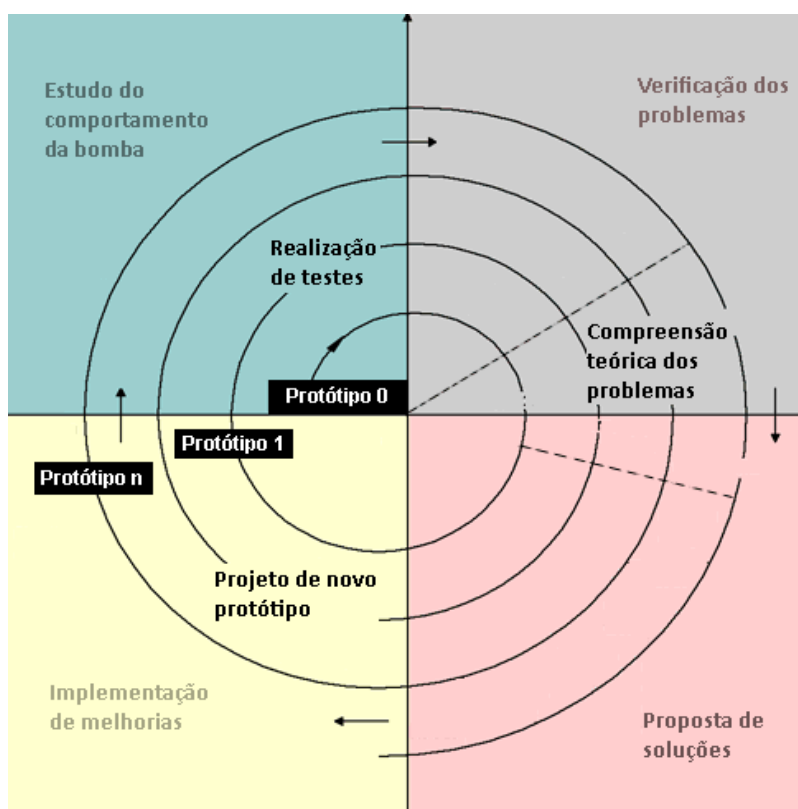


Figura 3 - Espiral de projeto

Pretende-se dessa forma melhorar sucessivamente o desempenho da bomba conforme se percorre um maior número de espirais no trabalho.

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na fabricação dos protótipos foram os disponibilizados na oficina da Escola Politécnica. Desta forma, utilizou-se alumínio, acrílico e aço na fabricação de peças sem requisitos de propriedades de material específicas.

É importante notar que as dimensões de diversas peças estavam limitadas pelo material disponível.

Para a fabricação das lâminas flexíveis do sistema oscilatório utilizou-se chapas finas de latão, por oferecer uma maior ductilidade que o aço (CALLISTER JR., 2002); fez-se essa escolha pois a freqüente ocorrência de fratura devido à fadiga em lâminas de aço impossibilitava a realização de ensaios.

O alumínio, muito utilizado no Protótipo 1 foi empregado devido à sua resistência mecânica, sua fácil usinagem e sua disponibilidade ampla na oficina da Escola Politécnica. No Protótipo 2, utilizou-se acrílico em grande parte das peças devido à sua disponibilidade e baixa magnitude dos esforços envolvidos.

O duto flexível empregado foi um duto comercial de silicone, devido principalmente às características quimicamente inertes do material e sua ampla utilização em bombas similares.

As fixações entre interfaces acrílico-silicone foram feitas à base de adesivo de silicone e as fixações entre interfaces acrílico-metal por parafusos e porcas.

2.2 MÉTODOS

Os testes realizados seguem uma padronização para verificar a repetibilidade dos resultados mantendo-se as condições de ensaio. Cada ensaio é repetido de 2 a 4 vezes para obter-se um valor médio mais confiável.

Primeiramente, a distância entre o esbarro contra o qual o duto é comprimido e os atuadores é variada até se obter um pico de vazão para um determinado ciclo de acionamento. Mantendo-se essa distância, faz-se o ensaio para diversos períodos de acionamento.

Na realização de um ensaio, três parâmetros são escolhidos no programa de controle: seqüência de acionamento, período de um ciclo e número de ciclos. Todos os ensaios foram feitos com um número de ciclos elevado de forma a acomodar o período de escoamento transitório e minimizar variações pontuais no resultado final.

Durante o escoamento, a pressão manométrica do ensaio é obtida observando-se a altura média atingida por uma coluna d'água. O valor de pressão resultante, apesar de proporcionar base de comparação com o Protótipo 0, apresenta variação considerável devido à característica pulsátil do escoamento. Considera-se que o erro de leitura por si só consiste em $\pm 10\%$ do valor lido.

Para a aquisição da vazão obtida, utiliza-se o volume bombeado total pelo tempo de bombeamento para se obter a vazão média. A massa bombeada é pesada em uma balança eletrônica com precisão de $\pm 5\text{g}$ (aproximadamente 1% dos valores obtidos), e obtém-se o volume bombeado relacionando-se a massa com o volume específico da água.

3 BPDF

A Bomba Peristáltica de Duto Flexível, doravante BPDF, é constituída por três pistões posicionados lado a lado, acionados por atuadores eletromagnéticos do tipo solenóide. Estes pistões são excitados seqüencialmente de forma que comprimam um duto flexível, gerando o deslocamento de uma célula fluida.

A célula fluida, representada em destaque na figura abaixo, nada mais é que uma célula de transporte de fluido. Considera-se que a cada ciclo de acionamento, a bomba desloque uma quantia finita de fluido; a esta quantia dá-se o nome célula fluida.

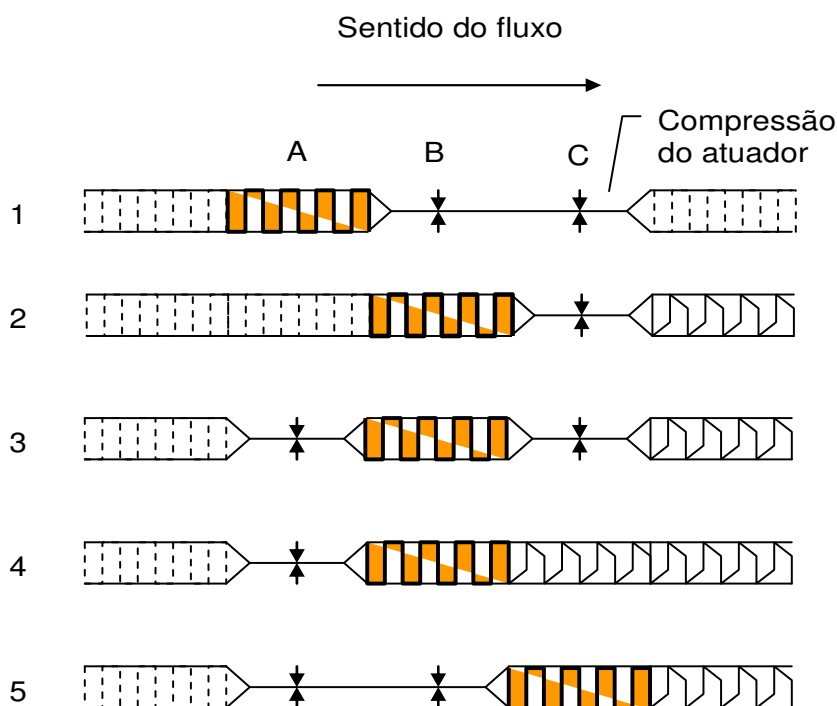


Figura 4 – Exemplo de seqüência de acionamento da BPDF e esquematização de uma célula fluida

Os estágios de um ciclo de bombeamento podem ser visualizados na Figura 4. A seqüência de acionamento é uma das variáveis de estudo.

Na Figura 5 pode-se observar a montagem esquemática da bancada de ensaios da bomba.

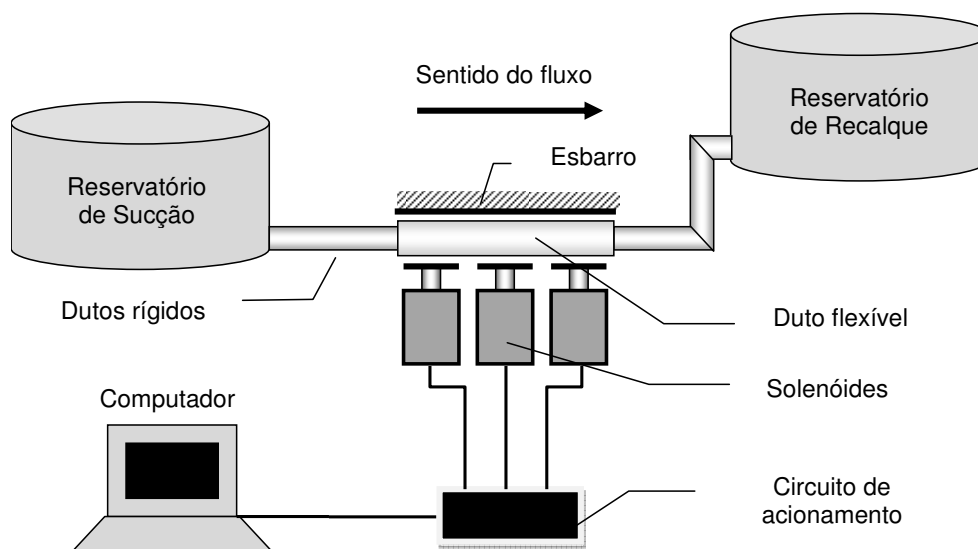


Figura 5 – Esquema da BPDF e bancada de ensaio

A BPDF pode ser dividida em três sistemas: sistema de recalque, mecânico, e eletrônico de acionamento.

3.1 SISTEMA DE RECALQUE

O sistema de recalque é constituído pelos reservatórios de sucção e de recalque e toda a tubulação que os conecta, como representado na Figura 6.

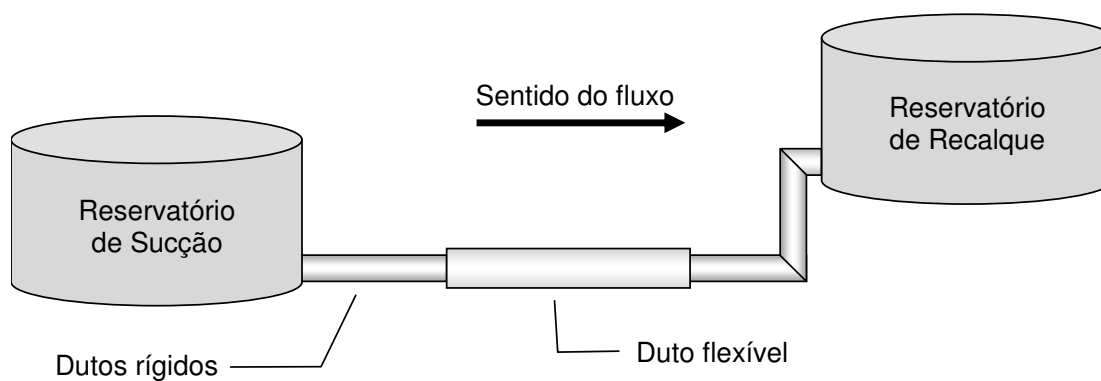


Figura 6 – Representação esquemática do sistema de recalque

3.2 SISTEMA MECÂNICO

O sistema mecânico é constituído pela parte estrutural da bomba e pelos solenóides. Uma representação esquemática do mesmo pode ser vista na Figura 7.

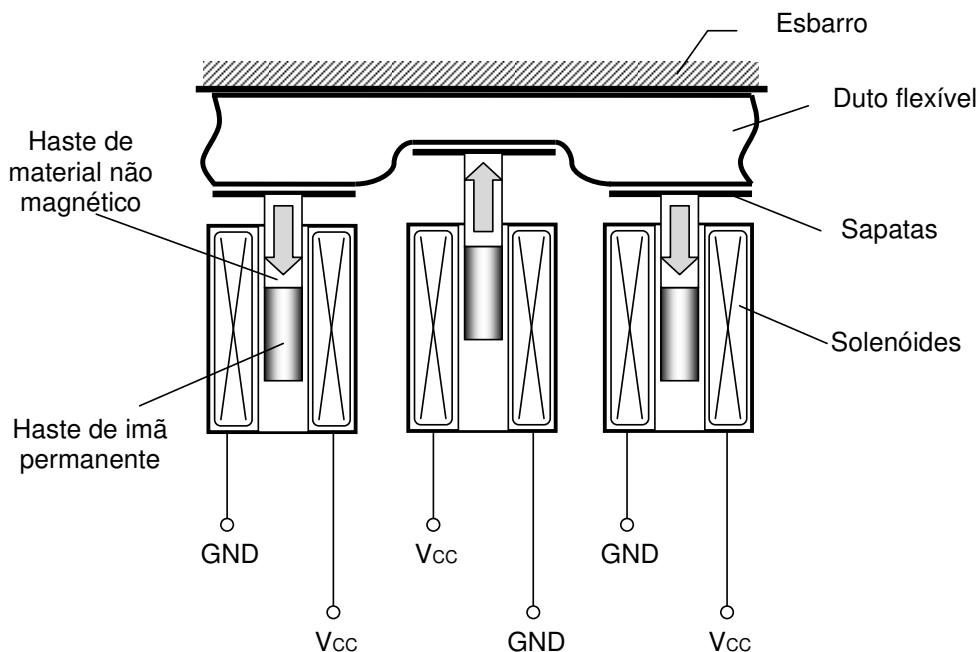


Figura 7 – Representação esquemática do sistema mecânico

3.3 SISTEMA ELETRÔNICO

O sistema eletrônico consiste basicamente em circuitos para o acionamento dos solenóides, fazendo a conexão entre o computador e o sistema mecânico.

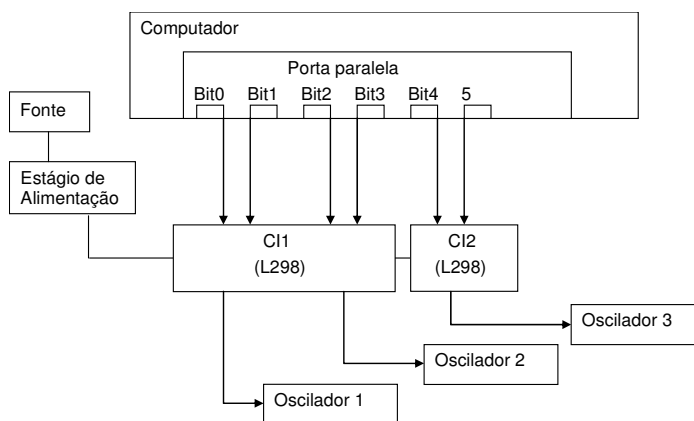


Figura 8 – Acionamento dos osciladores.

O controle é feito através da porta serial de um computador de uso pessoal, por uma rotina escrita em linguagem de programação C; esta passa alguns parâmetros que podem ser modificados, como a seqüência de acionamento, o período do ciclo e o número de ciclos a serem desenvolvidos.

A Figura 8 esquematiza de forma simplificada a disposição do sistema eletrônico.

4 PROTÓTIPO 0

O Protótipo 0, nomeado conforme a metodologia aplicada ao projeto, refere-se ao protótipo fabricado anteriormente como Trabalho de Conclusão de Curso no Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da USP (PIRES, 2007). O Protótipo 0 pode ser visto na Figura 9.

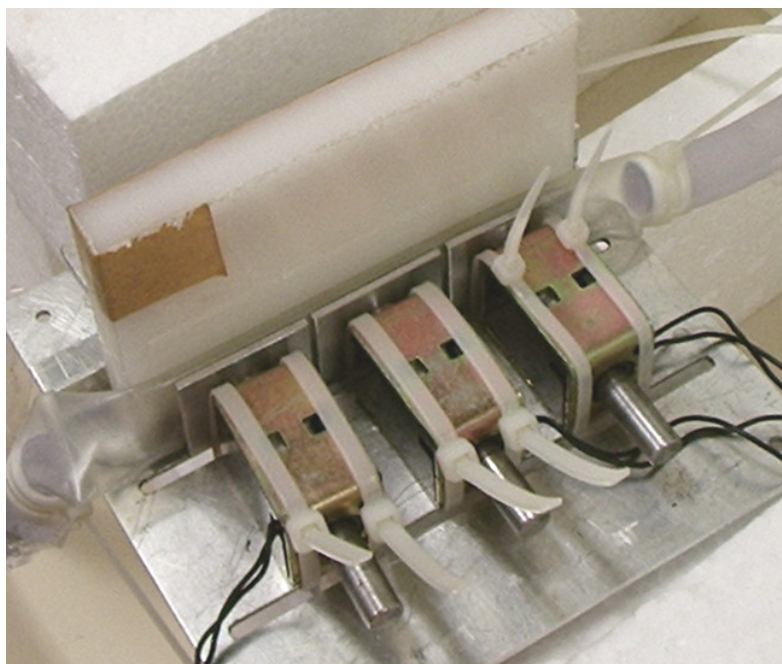


Figura 9 – Protótipo inicial (Protótipo 0)

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser verificados na Tabela 2 e nos gráficos de vazão x período e pressão x período apresentados na Figura 10 e na Figura 11 respectivamente.

Tabela 2 – Resultados obtidos com o protótipo 0

Período (ms)	Vazão (mL/s)	Pressão (Pa)
125	0,752	201,15
150	1,635	469,35
175	1,716	491,70
200	2,188	558,75
225	1,574	424,65
250	1,535	379,95
275	1,059	268,20
300	0,652	156,45
325	0,495	201,15

[PIRES, 2007]

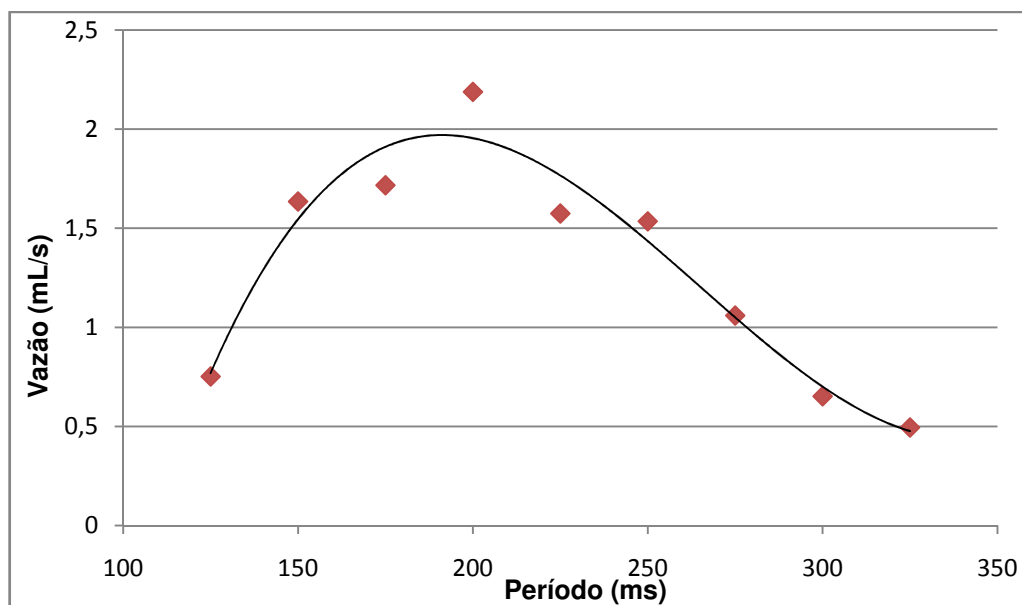


Figura 10 – Vazão média x período – protótipo 0 [PIRES, 2007]

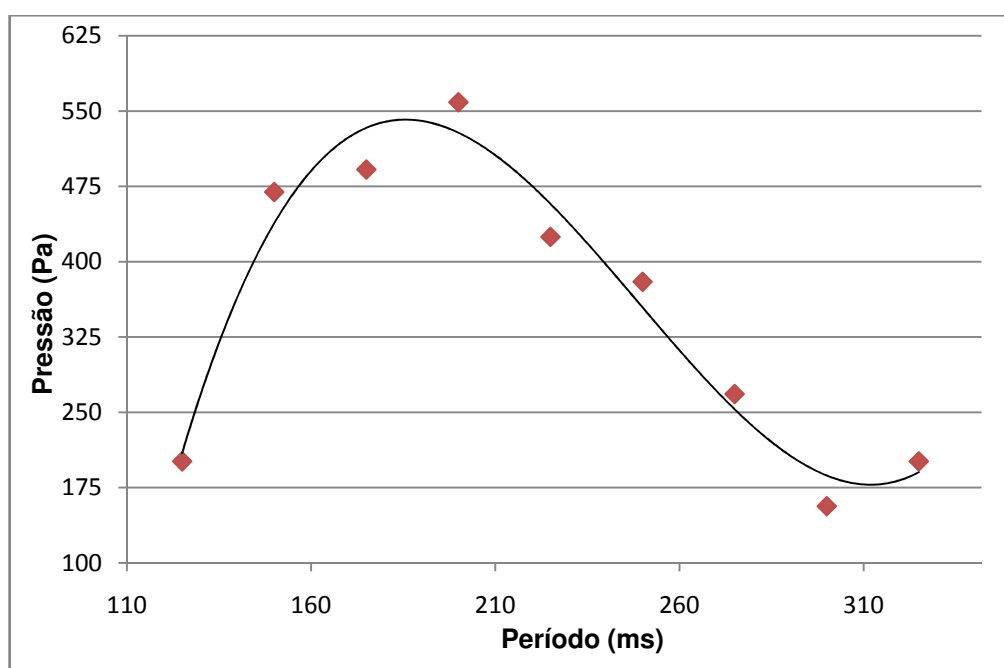


Figura 11 – Pressão média x período – protótipo 0 [PIRES, 2007]

Depreende-se destes dados que o comportamento da bomba apresenta uma faixa de trabalho ótima, apresentando vazão e pressão médias maiores. Essa faixa de maior desempenho situa-se próxima ao período de 200 ms, apresentando vazão média de 2,188 mL/s e pressão média de 558,75 Pa. Apesar da baixa vazão e carga apresentadas, em comparação com a referência, este protótipo serviu principalmente para demonstrar a validade do princípio de funcionamento proposto e caracterizar o comportamento da bomba.

5 PROTÓTIPO 1

A partir do Protótipo 0 e, seguindo a metodologia apresentada, testes foram realizados a fim de verificar falhas. Lista-se aqui alguns dos principais problemas apresentados:

- Imprecisão na verificação de pressão e vazão;
- Arranjo físico introduzia perdas de carga e erros aleatórios;
- Impossibilidade de variação dos parâmetros de interesse;
- Inutilização da placa de acionamento devido à sobretensão constante na comutação dos relés, visto que a placa de acionamento não era modular;
- A seqüência de acionamento utilizada apresentava uma tendência a gerar refluxo;

As soluções implementadas podem ser resumidas na construção de um protótipo mais robusto e ajustável – Figura 12, implementação de uma seqüência que garantisse o deslocamento positivo do fluxo – Figura 13 – e o projeto de novas placas de acionamento modulares – Figura 14.

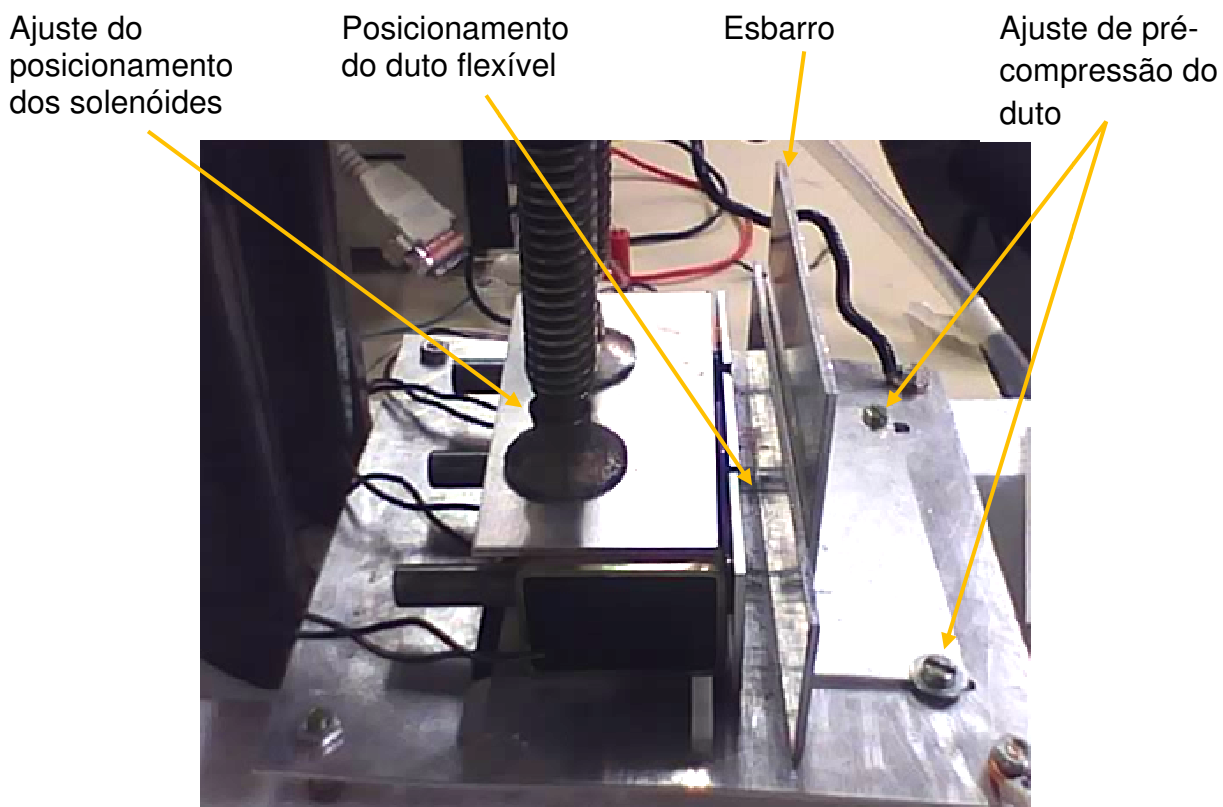


Figura 12 – Sistema mecânico do protótipo 1

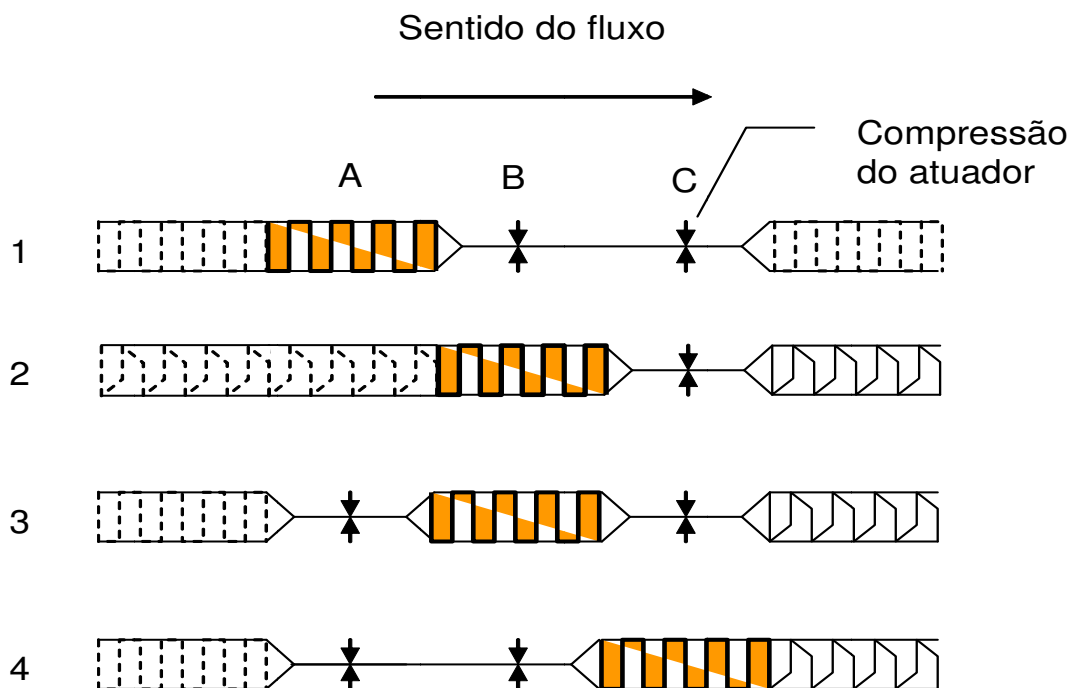


Figura 13 – Sequência de acionamento do Protótipo 1

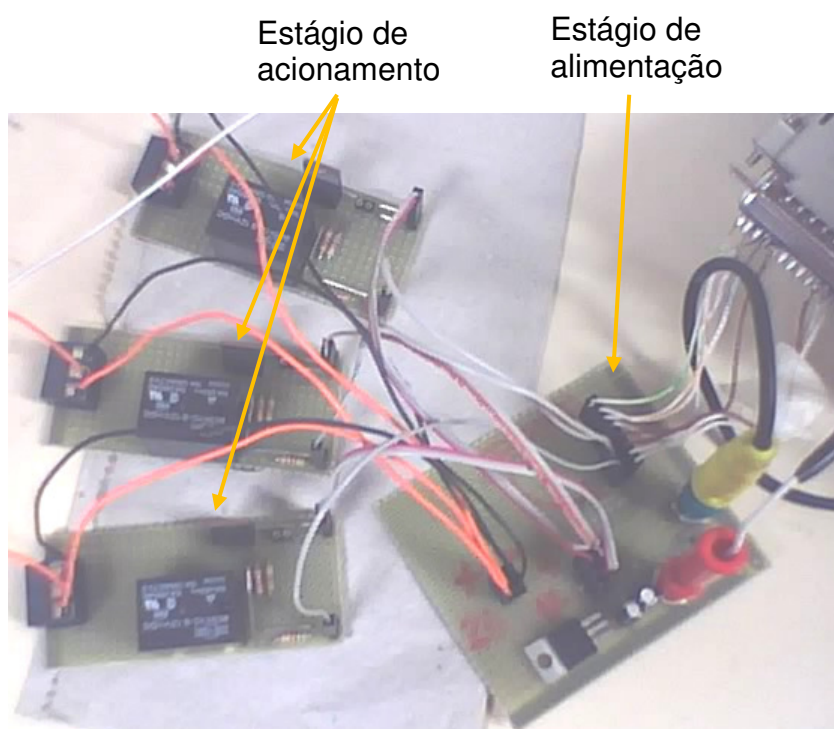


Figura 14 – Modularização do sistema eletrônico do Protótipo 1

O sistema eletrônico consiste em quatro placas: três modulares para o acionamento individual de cada atuador e uma placa para tratar a energização do circuito e o recebimento e transmissão de dados. Assim, garante-se que as bobinas dos relês

sejam alimentadas com 12 V, enquanto os solenóides recebem 20 V, e que um eventual circuito falho não implique em inutilização total do sistema.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Vazão x período – protótipo 1

Período (ms)	Ciclos	Vazão (mL/s)	Vazão média (mL/s)
55	400	2,73	3,22
	500	3,71	
56	500	5,43	5,43
57	500	5,61	5,61
58	500	5,17	5,17
59	500	5,15	5,15
	400	5,50	
	400	5,50	
	500	5,67	
60	500	5,33	5,41
	600	5,06	
	500	5,31	
61	500	5,25	5,28
	500	5,16	
62	500	5,16	5,16
	500	5,62	
63	500	5,08	5,23
	500	4,98	
70	400	4,11	4,11
80	400	2,97	2,97
90	300	2,96	2,96
100	300	2,83	2,83
110	300	2,12	2,12

Trabalhando-se apenas com valores próximos à vazão máxima, ignorou-se valores de período acima de 80 ms e interpolou-se os pontos restantes, que de fato exprimem o comportamento de interesse. O novo gráfico pode ser visto na Figura 15. Percebe-se neste gráfico, que a região ótima de operação da configuração testada passa a compreender períodos de acionamento entre 57 ms e 63 ms.

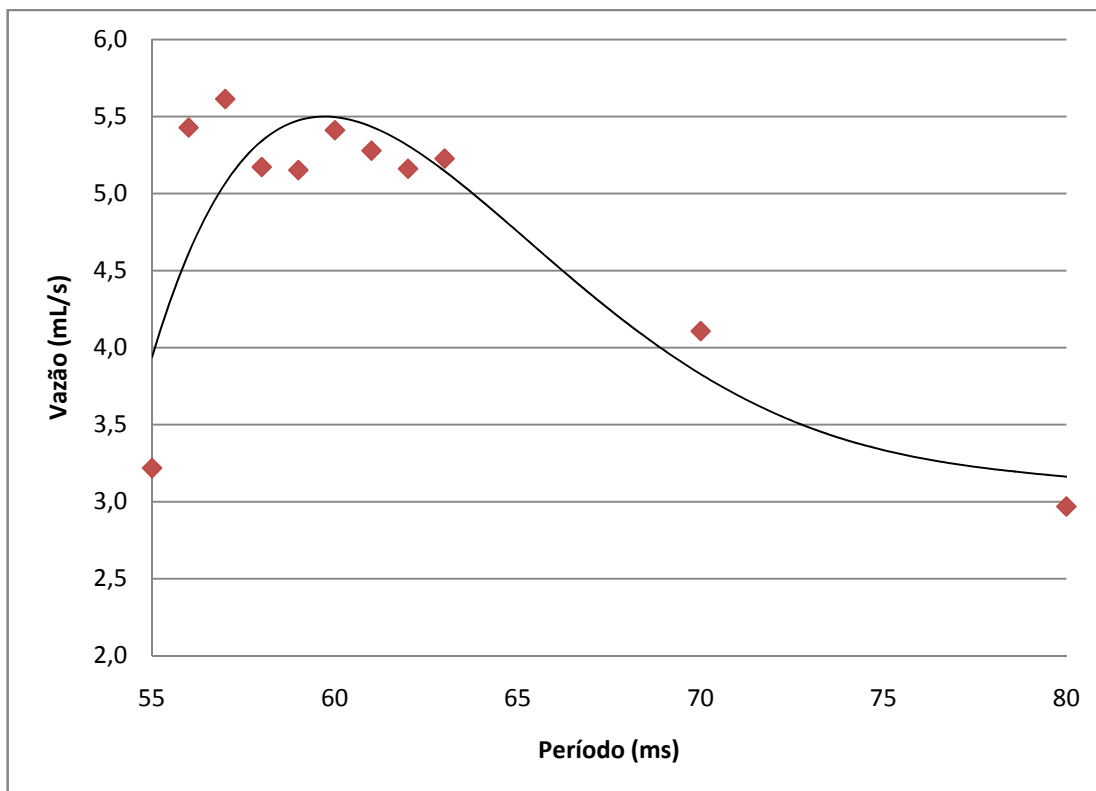


Figura 15 - Vazão em função do período

A vazão máxima de aproximadamente 5,4 mL/s foi obtida para um período de 60 ms. Em comparação à *Hemopump* – Tabela 1– corresponde a apenas 10 % do valor de vazão comercial, embora seja um valor aproximadamente 250% maior que o atingido no Protótipo 0.

A medição de pressão não pode ser realizada nesta etapa do projeto.

6 PROTÓTIPO 2

O Protótipo 2 consiste no protótipo final deste trabalho. Neste capítulo apresenta-se as principais modificações implementadas na BPDF, buscando sanar os principais problemas verificados no Protótipo 1, listados abaixo.

- Curso limitado dos atuadores;
- Rigidez baixa do Protótipo 1 – houve deflexão da base devido aos esforços impostos pelos sargentos de fixação dos solenóides;
- Dificuldade de posicionamento do duto flexível.

A Figura 16 mostra a representação do Protótipo 2 no *software* Inventor 2009, da Autodesk.

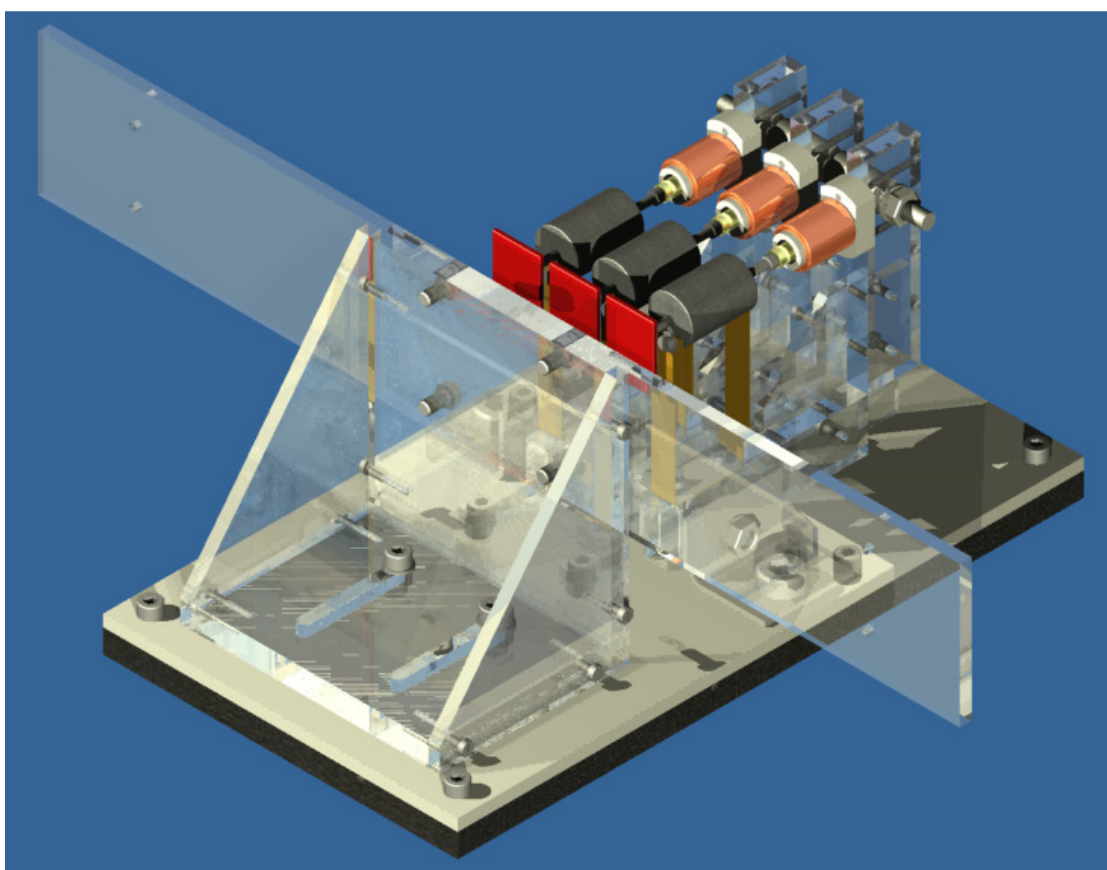


Figura 16 – Representação do Protótipo 2 em CAD

Os desenhos mecânicos e de conjunto podem ser vistos ao final do trabalho, no APÊNDICE A.

6.1 SISTEMA DE RECALQUE

O sistema de recalque não sofreu alterações consideráveis em relação ao protótipo 1, excetuando-se pela implementação de um sistema de aquisição de pressão.

O sistema de recalque é constituído por dois reservatórios – sucção e recalque –, dois dutos rígidos e um duto flexível, como pode ser visto na Figura 17.

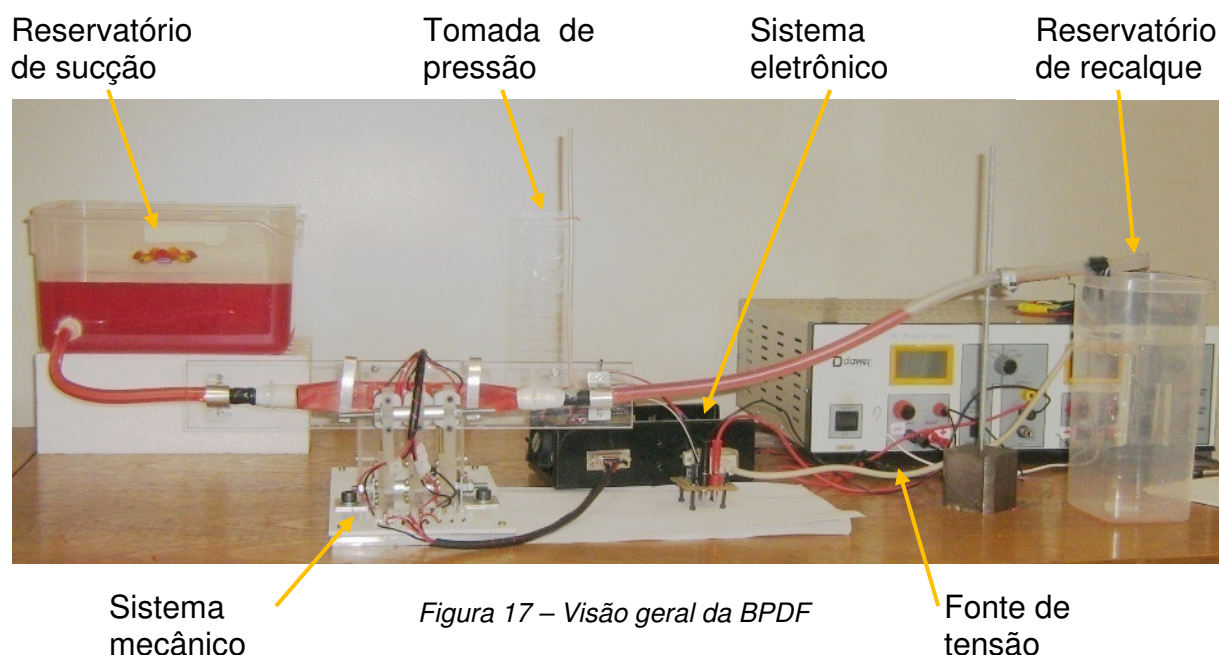


Figura 17 – Visão geral da BPDF

O reservatório de sucção deve ser de grande área superficial para que o volume bombeado não tenha muita influencia na leitura de pressão. O reservatório de recalque não possui muitos requisitos, pois se utilizou uma balança para medir o volume bombeado. Ele deve apenas estar levemente acima do nível de referência do reservatório de recalque, pois como a bomba não possui válvulas, o fluxo não é impedido quando a bomba está desligada. No entanto, não deve ser muito alto ou a coluna d'água não consegue ser vencida.

Para a leitura da pressão, utilizou-se um duto de pequeno diâmetro interno, de modo que a variação de pressão fosse visivelmente perceptível. Por ser um escoamento pulsátil, os valores lidos constituem valores médios. A variação da pressão associada a um valor médio é relativamente alta, de modo que os valores apresentados servem apenas de comparação qualitativa do aumento de pressão.

6.2 SISTEMA MECÂNICO

De modo geral, o sistema mecânico sofreu poucas alterações em relação ao Protótipo 1. No entanto, algumas mudanças foram realizadas de modo a implementar conceitos novos à BPDF – sistema oscilatório e configuração *push-pull* dos solenóides, a serem explicados adiante.

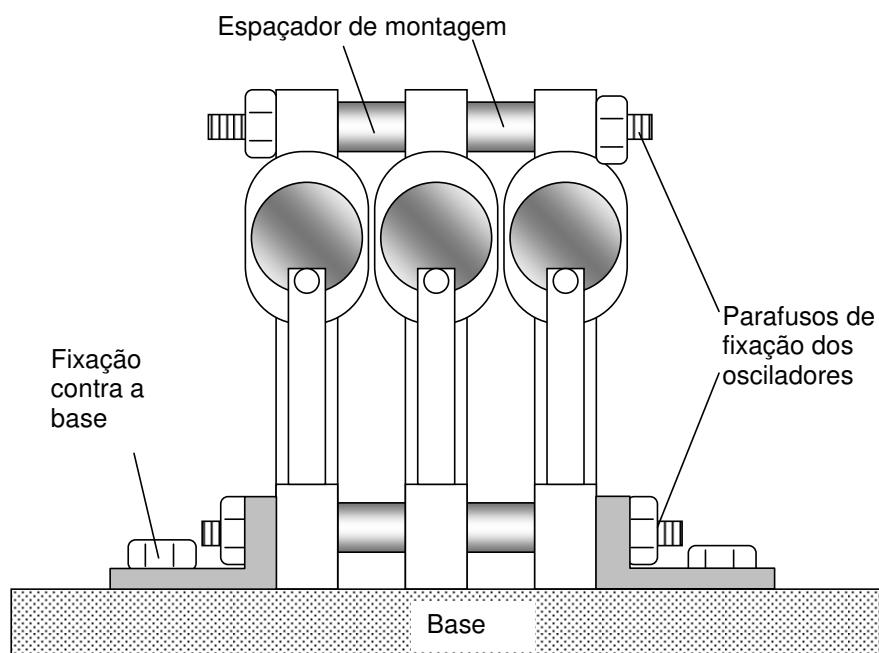


Figura 18 – Montagem do conjunto e fixação contra a base

O sistema mecânico consiste em três solenóides (570 espiras) em série, espaçados de 15 mm entre si, acionados separadamente, que atuam sobre o duto flexível ($\Phi 20$ mm, espessura 0.5 mm) através de sapatas (20 mm x 25 mm x 2 mm). O duto flexível é escorado em um esbarro, pré-comprimido por grampos e colado às sapatas e ao esbarro. A montagem do sistema mecânico está ilustrada na Figura 18, e pode ser visualizada na Figura 19.

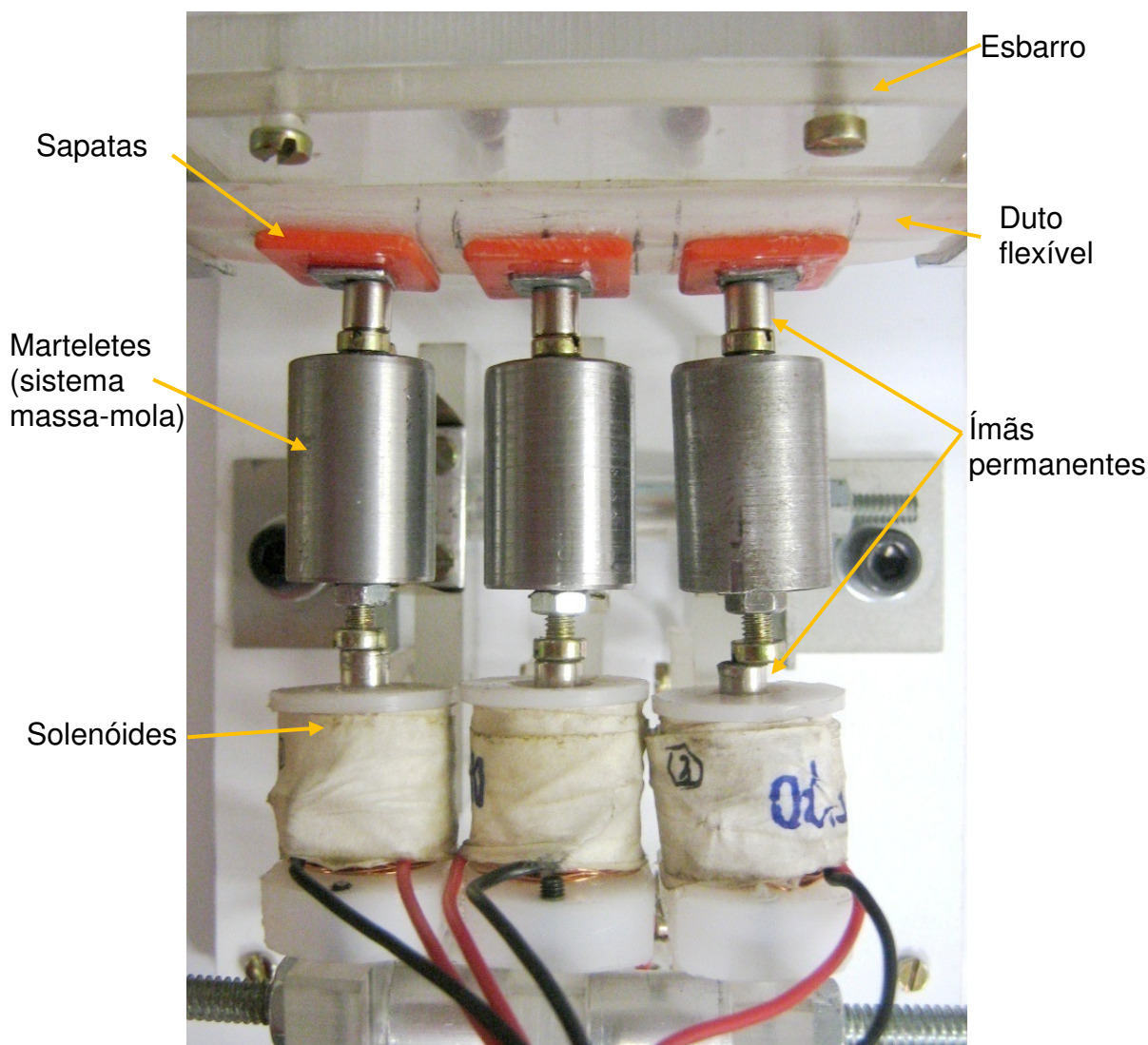


Figura 19 – Sistema mecânico do protótipo 2

Percebeu-se que fixando-se o duto de silicone ao esbarro e às sapatas atinge-se uma vazão maior para as mesmas condições de teste. Isto porque a inércia associada ao sistema duto-fluido não permite o retorno do duto à posição descomprimida rapidamente. Isto restringe a capacidade de admissão de uma célula fluida maior, reduzindo a vazão final.

Há grampos que pré-comprimem o duto flexível, e auxiliam a aumentar a vazão. No início do avanço do núcleo do solenóide a força disponível é baixa; deste modo, se a célula fluida for muito grande o solenóide não gerará força suficiente para deslocar a célula fluida. Assim, numa configuração de célula fluida grande, o movimento não é iniciado e não se atinge vazão.

6.2.1 Sistema Oscilatório

O sistema oscilatório consiste em uma lâmina metálica flexível de latão (150 mm x 10 mm x 0.5 mm) conformada em 'U' fixada em ambas as extremidades a um martelete de aço-carbono ($\Phi 19$ mm, 28 mm de comprimento), conforme mostra a Figura 20. A lâmina flexível consiste na mola do sistema, agregando um valor de rigidez elástica, enquanto o martelete consiste na massa do sistema.

O conjunto compõe um sistema massa-mola. Busca-se um acionamento com frequência próxima à frequência natural do sistema, de modo a ampliar o deslocamento dos atuadores por efeito de ressonância.

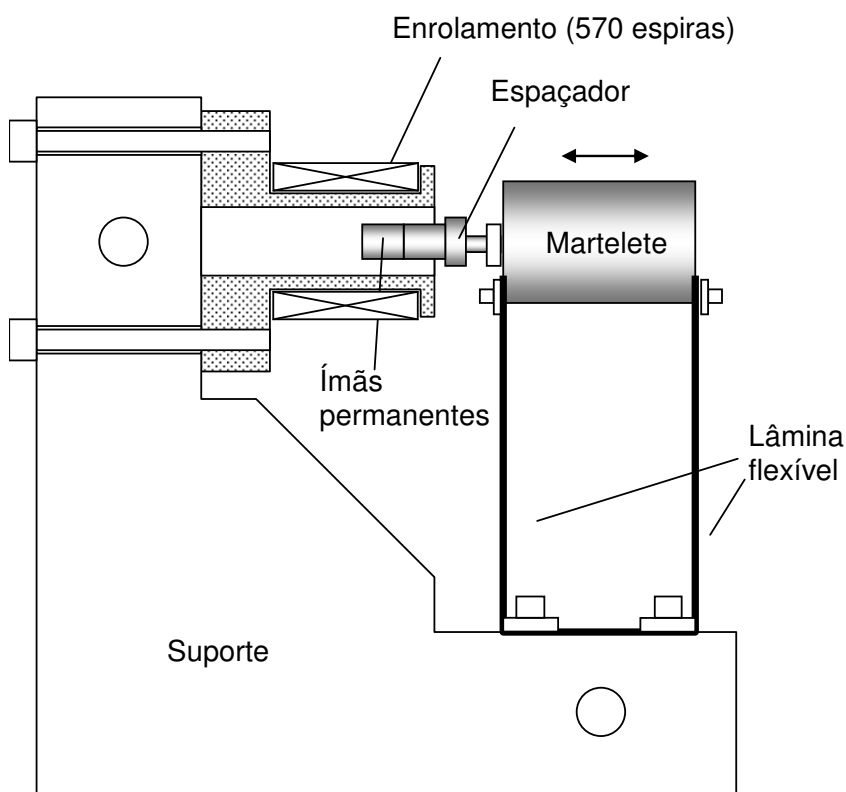


Figura 20 – Oscilador eletromagnético

6.2.2 Acionamento *Push-Pull*

Buscou-se uma forma de fazer com que os solenóides atuassem ativamente tanto no avanço quanto no retorno, de forma a comprimir e expandir o duto flexível.

Dessa forma, a dinâmica do sistema não conta apenas com a inércia da massa de água e a flexibilidade do duto para admitir nova célula-fluida, mas aproveita a possibilidade de forçar essa admissão. Para isso, o núcleo do solenóide, anteriormente em aço, foi substituído por ímas permanentes. Utilizou-se ímãs de NiFeB (terras raras) de $\Phi 6$ mm x 6 mm.

6.3 SISTEMA ELETRÔNICO

O sistema eletrônico deve prover a alimentação elétrica e fazer o acionamento do protótipo.

Foi mantida a estratégia de se enviar bits de controle pela porta paralela de um computador de uso pessoal; todavia usa-se um número maior de bits devido a alterações importantes no protótipo final.

Enquanto se usava apenas 3 bits nos Protótipos 0 e 1, sendo que cada um deve acionar um solenóide específico, agora usa-se 2 bits por solenóide, de modo a selecionar se o atuador deve avançar (*push*) ou recuar (*pull*).

O sistema eletrônico recebe a saída de uma fonte de tensão, e a partir dessa tensão de alimentação é capaz de gerar 5 V para a lógica de acionamento, assim como alimentar todos os componentes eletrônicos internos e os atuadores do protótipo.

6.3.1 Estratégia De Acionamento

O controle e a lógica de acionamento são feitos por um programa escrito em linguagem de programação C, e pode ser visualizado integralmente no APÊNDICE B, ao final deste texto.

O sistema eletrônico foi inicialmente dividido em dois estágios: alimentação e acionamento.

6.3.1.1 Estágio De Alimentação

Neste estágio, a tensão de alimentação (V_{CC}) é recebida de uma fonte de tensão, e gera-se a tensão de alimentação lógica (V_L) de 5V, utilizando-se um circuito integrado (CI) de conversão de tensão; no caso, um LM7805 e capacitores adequados.

A Figura 21 ilustra o circuito do estágio de alimentação.

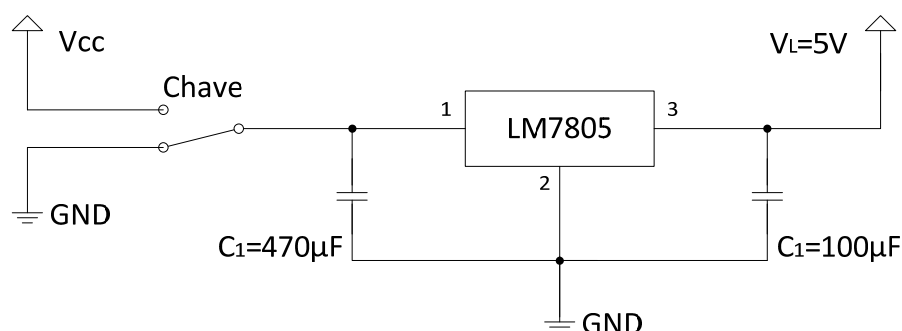


Figura 21 – Circuito de alimentação

A Figura 22 mostra a placa do estágio de alimentação.

Optou-se por fazer a indicação de estados da alimentação por uso de 2 LEDs (*Light Emitting Diodes*). Um LED indica que a tensão de alimentação (V_{CC}) está ligada, e um LED verde indica que a chave foi comutada, gerando a tensão de alimentação lógica (V_L).

É importante notar neste ponto que a tensão de alimentação utilizada foi de 20V, assim como no Protótipo 1, para podermos fazer uma comparação de desempenho mais eficaz entre os protótipos.

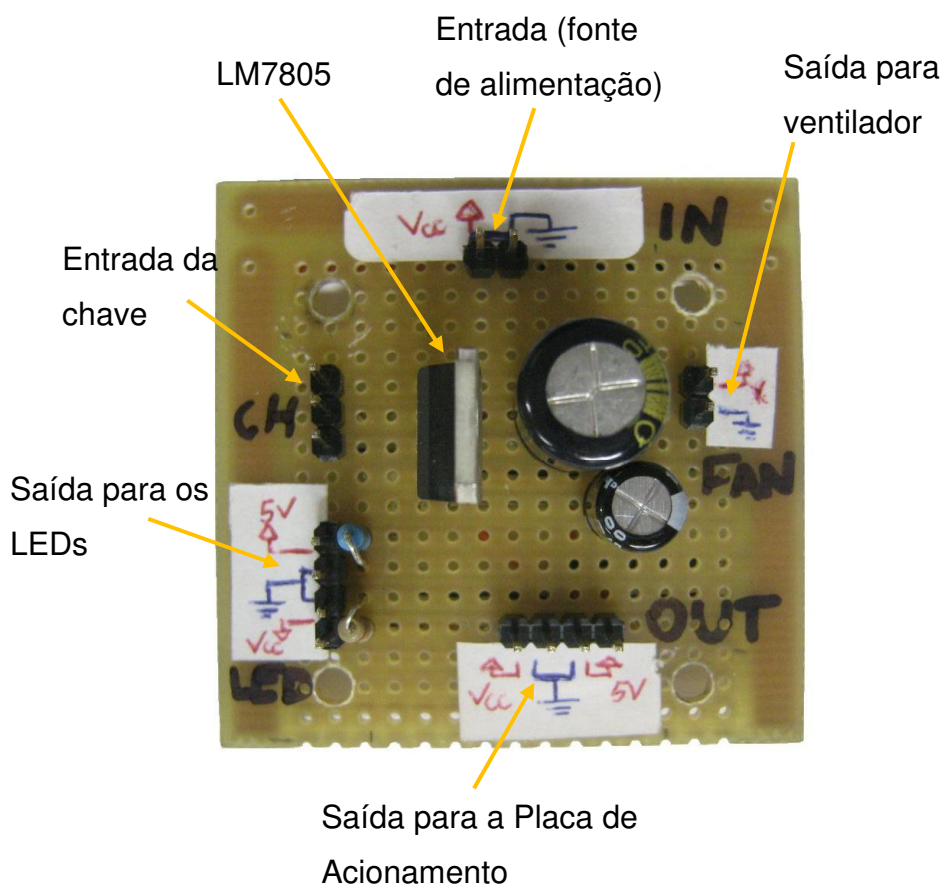


Figura 22 – Placa de alimentação

6.3.1.2 Estágio De Acionamento

O estágio de acionamento recebe a alimentação de tensão pelo estágio de alimentação.

Este estágio deve fazer o acionamento dos atuadores segundo os comandos do programa de controle.

Todos os sinais gerados para controle são digitais e, portanto, limitados a dois estados de tensão: 0V (sinal lógico 0, ou LOW) e 5V (sinal lógico 1, ou HIGH).

Para se utilizar esses sinais no acionamento, fez-se a escolha por utilizar uma ponte de potência transistorizada completa (Ponte H) para cada atuador. A ponte completa permite a inversão da corrente no solenóide, causando a inversão no sentido do avanço do atuador.

A Figura 23 ilustra uma Ponte H completa, que comanda um atuador

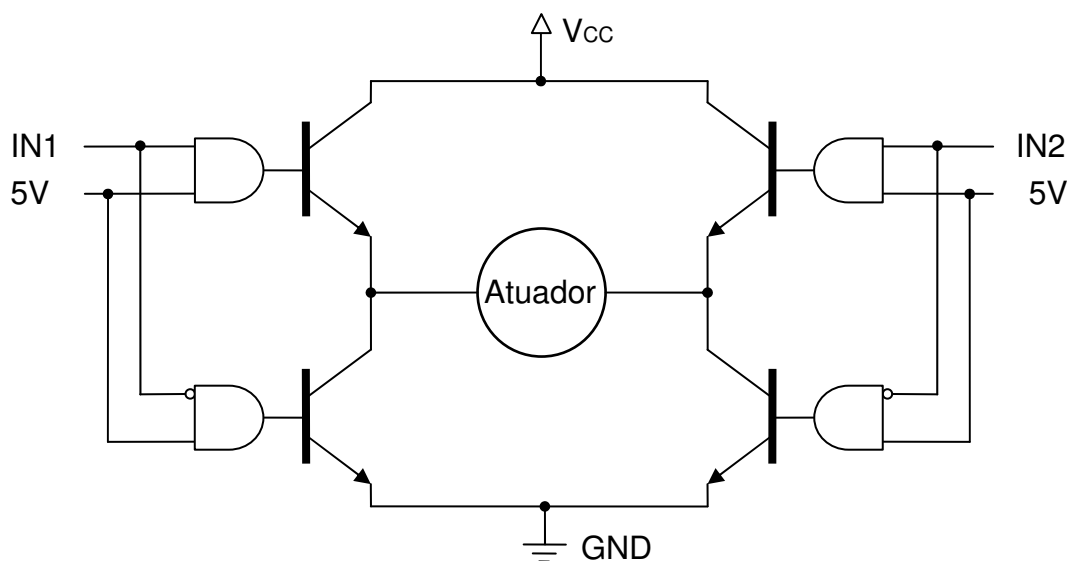


Figura 23 – Ponte H completa transistorizada

A Tabela 4 abaixo mostra o comportamento do atuador segundo os dois dados lógicos de entrada (IN1 e IN2).

Tabela 4 – Tabela da verdade para a Ponte H

IN1	IN2	Atuador
1	0	Avança
0	1	Retorna
0	0	Pára
1	1	Pára

Foi utilizado o circuito integrado (CI) L298 para o circuito de acionamento, por possuir duas pontes H completas. Cada ponte possui também sinais auxiliares de habilitação da ponte (sinais de *Enable*) que foram mantidos em nível lógico HIGH. Isso foi feito não só para reduzir o número de variáveis de controle, como também porque não havia a necessidade de se habilitar ou desabilitar as pontes.

Ao se utilizar este CI, cada atuador passa a ser controlado por dois bits; sendo que um comanda seu avanço e um comanda seu retorno.

A Figura 24 mostra o circuito do estágio de acionamento.

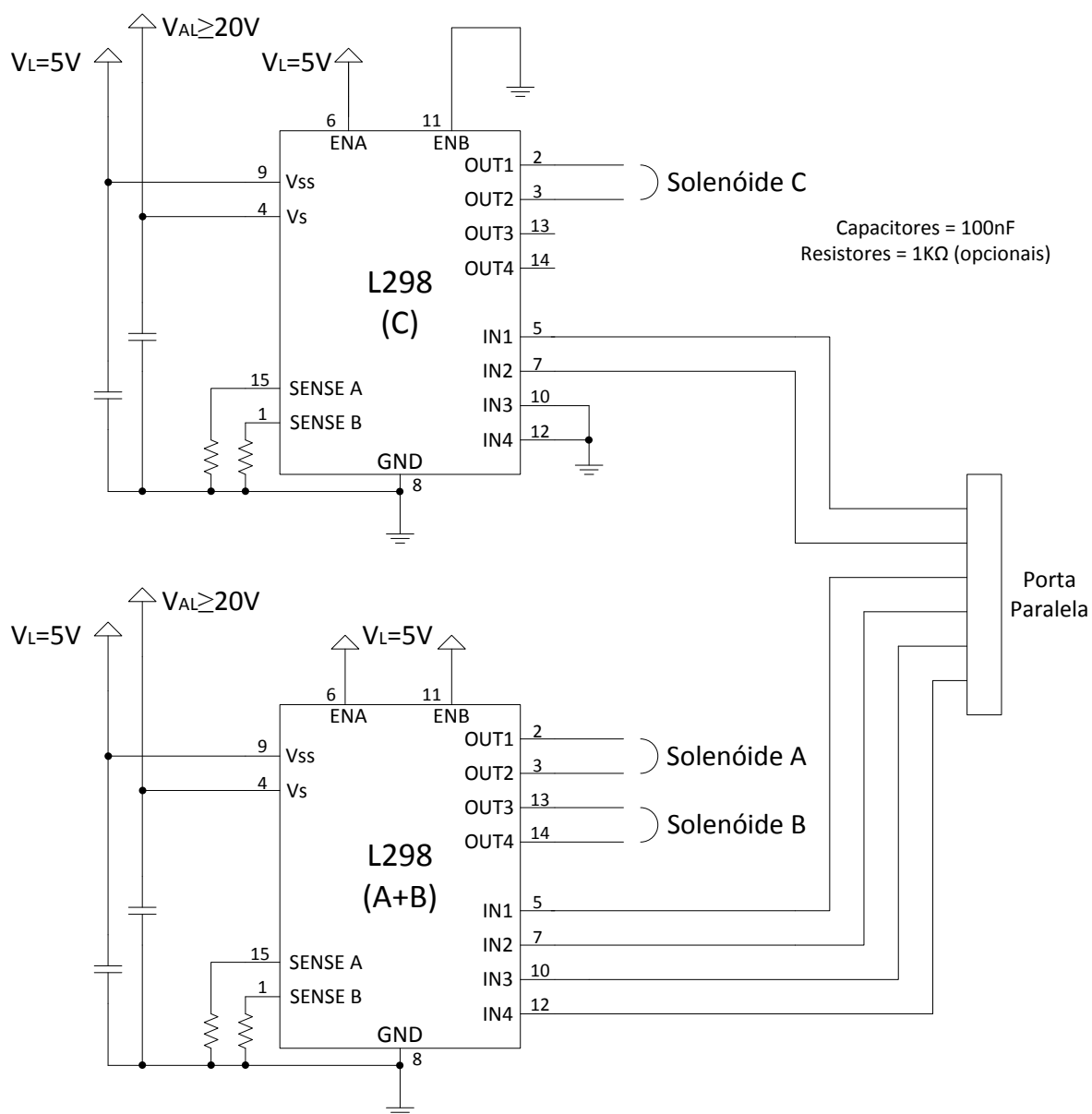
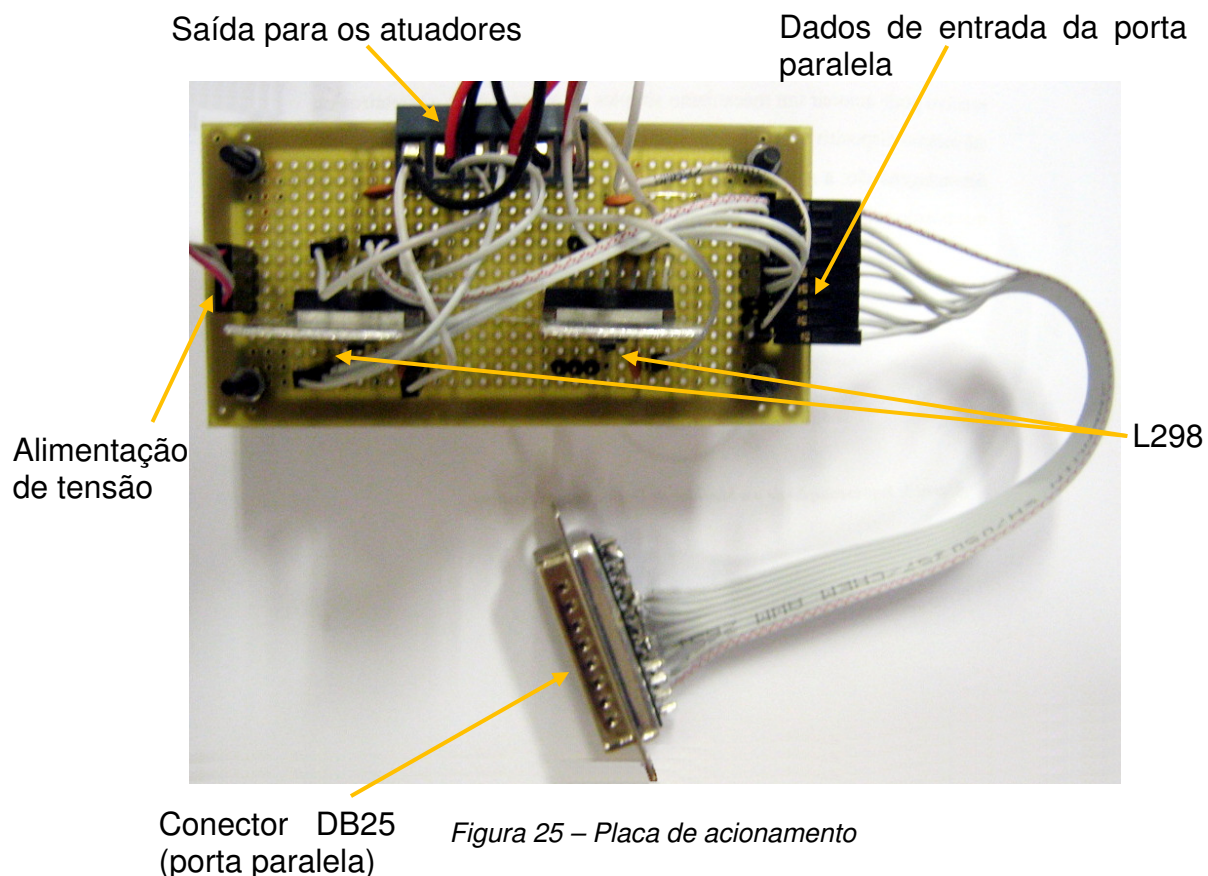


Figura 24 – Circuito de acionamento

O circuito de acionamento foi montado numa placa separada da placa de alimentação, para garantir que falhas não comprometam fisicamente ambas as placas de uma só vez, assim como para permitir certa modularidade e facilidade de troca.

A Figura 25 mostra a placa de acionamento.



6.3.2 Lógica de acionamento

A lógica de acionamento baseia-se no uso de dois bits de sinal por atuador, totalizando seis bits de controle (numerados D0 a D5). Os bits são enviados como dados pelo programa de controle pela porta paralela de um computador de uso pessoal. A Figura 26 mostra a pinagem de um conector DB25 fêmea, utilizado para receber os dados da porta paralela. É importante notar que a porta paralela possui oito bits de envio, mas apenas seis são utilizados.

Os dados D0 e D1 controlam o Solenóide A, D2 e D3 controlam o Solenóide B e D4 e D5 controlam o Solenóide C.

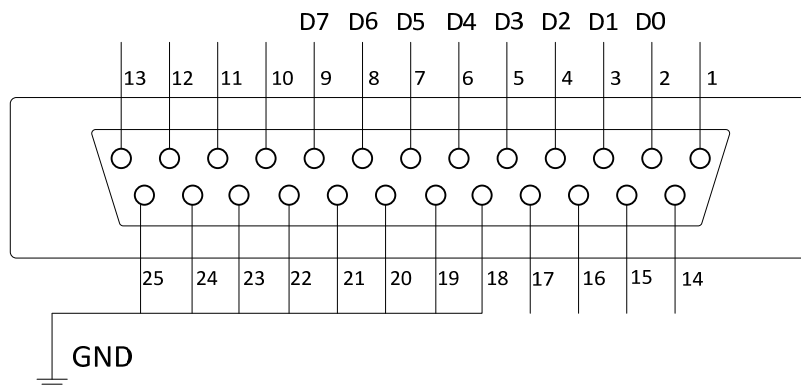


Figura 26 – Pinagem do DB25 – conector fêmea

Para o controle do acionamento dos solenóides, utilizou-se uma configuração simples em malha aberta, em que os comandos são enviados aos atuadores, mas não se verifica se o comando foi seguido adequadamente. Acreditou-se que a malha aberta, para esse desenvolvimento inicial do princípio de acionamento era suficiente.

A lógica de controle baseia-se nos seguintes passos:

- Divisão da seqüência periódica de acionamento em estágios distintos, sendo cada estágio codificado pela posição dos atuadores;
- A posição de um atuador é determinada pelo sentido em que a corrente elétrica percorre o solenóide, que é determinado pelos dois dados de entrada correspondentes na Ponte H (dados D0 e D1 para o Solenóide A, por exemplo);
- Os seis dados em conjunto formam uma palavra, de modo que a cada estágio associa-se uma palavra única. A palavra é então enviada à placa de acionamento pela porta paralela;
- O conjunto de palavras ordenadas forma um ciclo de acionamento, que é repetido de forma a formar o período de acionamento.

As palavras de cada estágio são convertidas em notação hexadecimal para facilitar o envio pela porta paralela. Embora a notação hexadecimal seja utilizada para representar oito bits, os dois bits mais representativos não são usados, e recebem o valor lógico zero; dessa forma, os dados não são alterados.

6.3.2.1 Seqüência Do Protótipo 1

Esta é a seqüência de acionamento utilizada ao final do Protótipo 1, ilustrada na Figura 27.

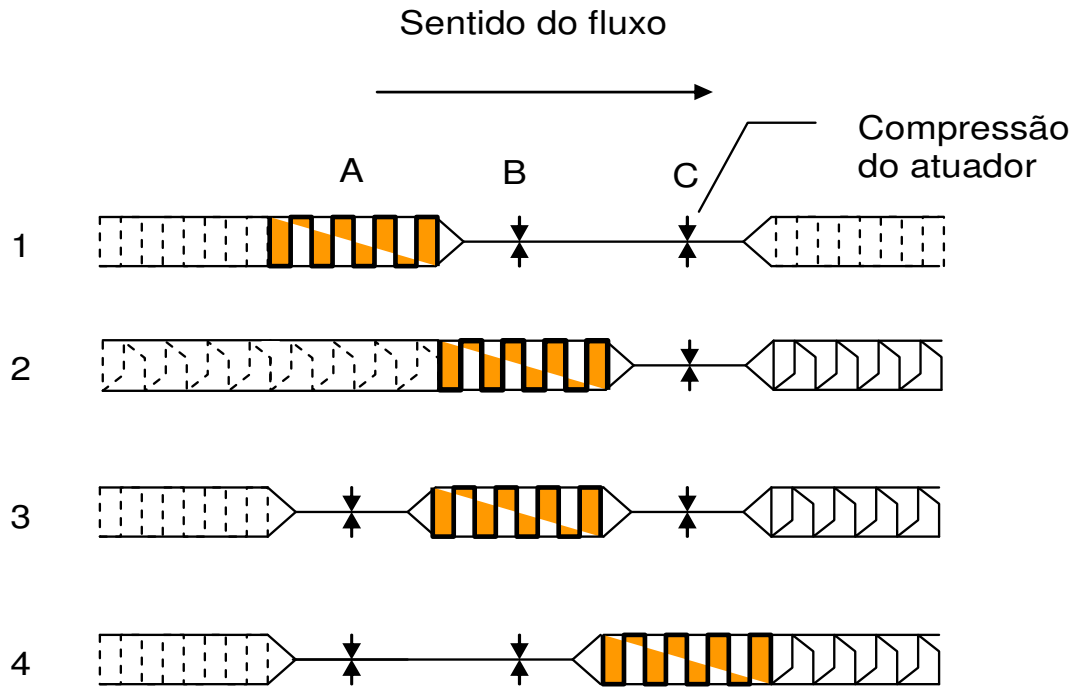


Figura 27 – Seqüência do protótipo 1

A seqüência é representada abaixo, na Figura 28, numa carta de tempos.

Solenóide	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4
A				
B				
C				

Figura 28 – Carta de tempos da seqüência do protótipo 1

Da carta de tempos acima, extrai-se os valores para os 6 bits de controle, formando a palavra hexadecimal para cada estágio, conforme a Tabela 5 abaixo.

\

Tabela 5 – Palavras de controle da seqüência do Protótipo 1

Estágio	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Palavra Hexadecimal
Estágio 1	0	1	0	1	1	0	16
Estágio 2	0	1	1	0	1	0	1A
Estágio 3	0	1	1	0	0	1	19
Estágio 4	1	0	0	1	0	1	25

6.3.2.2 Seqüência Trifásica Linearizada

A seqüência do Protótipo 1 foi analisada, e percebeu-se que a freqüência de excitação dos solenóides não era a mesma, visto que o Solenóide C está ativo em mais estágios que os outros. Dessa forma, devido à diferença no acionamento do solenóide C, a mecânica do sistema oscilatório perdia sua eficiência, pois a freqüência de excitação distanciava-se da freqüência natural de vibração do sistema.

Buscou-se então um acionamento em que todos os atuadores tivessem tempos equivalentes de atuação.

O peristaltismo normalmente é descrito por funções sinusoidais (MISRA, 2006). Procurou-se manter essa idéia para a bomba peristáltica e, tratando-se de três atuadores, logo se pensou em acionamento do tipo trifásico. Vale notar que a cada atuador adicionado, basta incrementar a defasagem, de modo a manter a onda progressiva senoidal.

Devido ao uso de elementos de eletrônica digital, a implementação mais aproximada de uma curva senoidal teria de ser feita por PWM (*Pulse-Width Modulation*). Entretanto, escolheu-se trabalhar apenas com ondas quadradas, sem PWM, por simplicidade. Acredita-se que o mais importante neste trabalho seja verificar a validade e o impacto da nova seqüência de acionamento, e não sua otimização.

Na Figura 29 é possível verificar como uma onda trifásica é linearizada, assim como os seis estágios (identificados de 1 a 6).

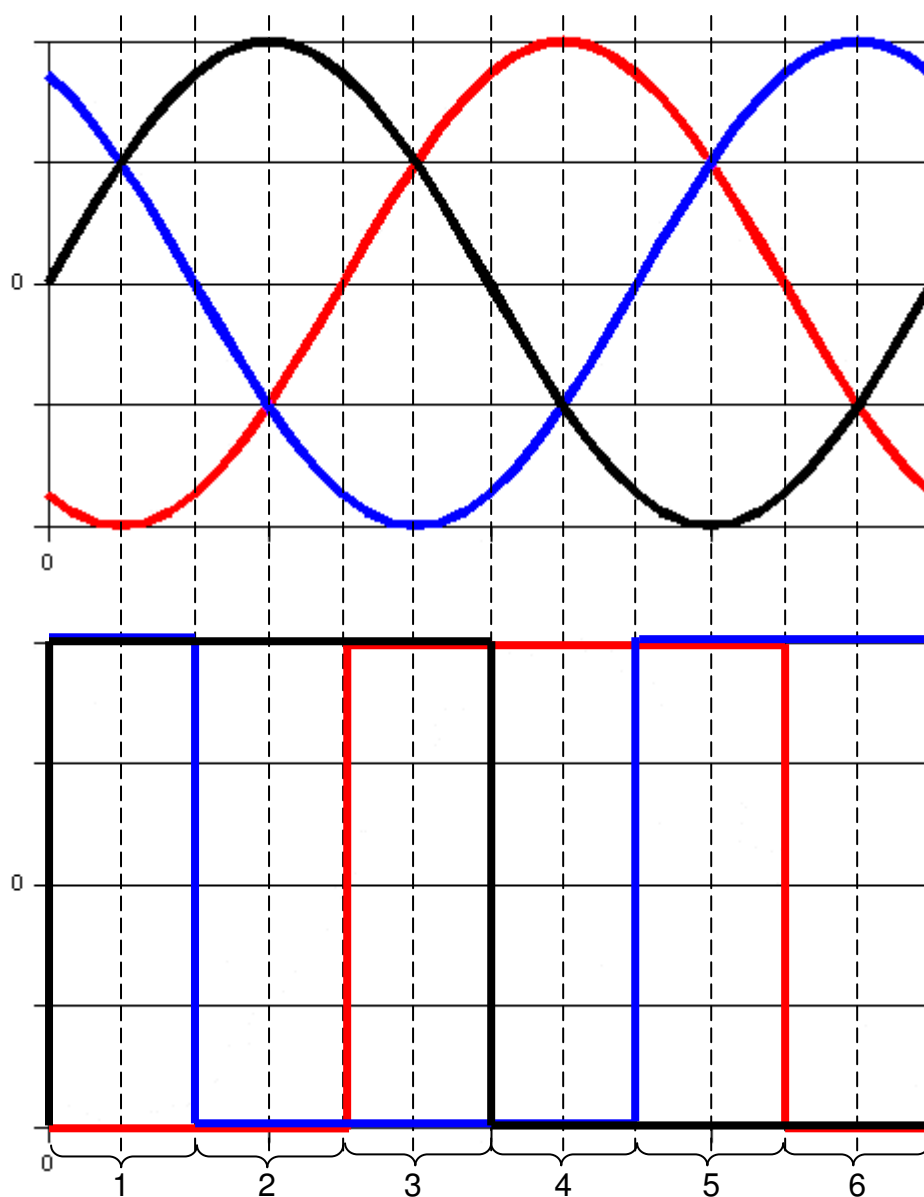


Figura 29 – Seqüência trifásica linearizada e sua equivalente linearizada

A seqüência acima pode ser mais facilmente interpretada na Figura 30.

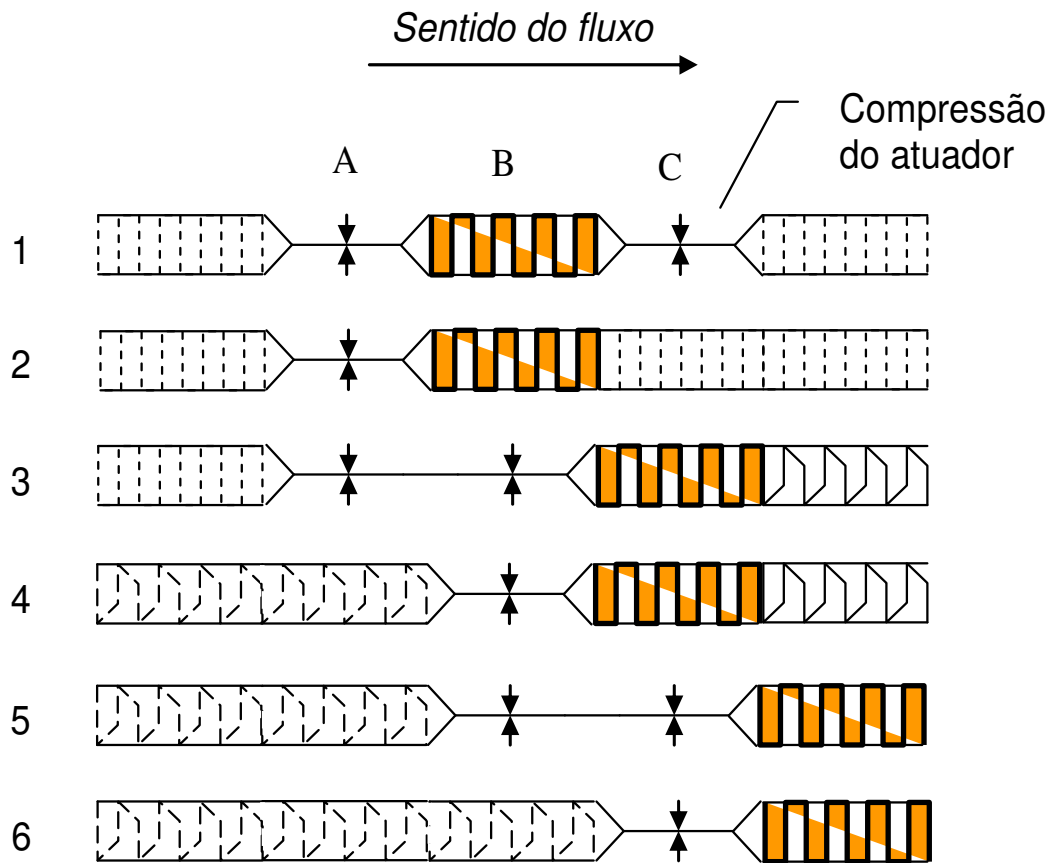


Figura 30 – Seqüência trifásica

A seqüência é representada abaixo, na Figura 31, numa carta de tempos.

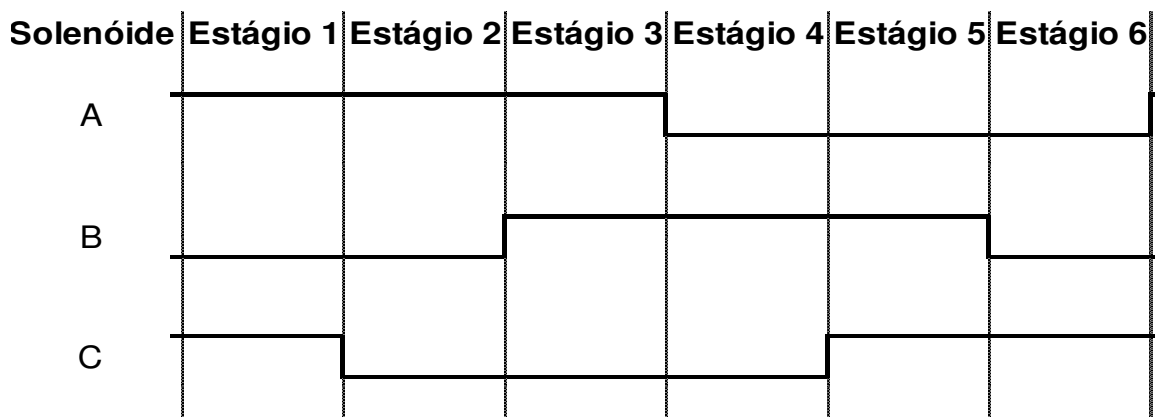


Figura 31 – Carta de tempos da seqüência trifásica linearizada

Da carta de tempos acima, extrai-se os valores para os seis bits de controle, formando a palavra hexadecimal para cada estágio, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Palavras de controle da seqüência trifásica linearizada

Estágio	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Palavra Hexadecimal
Estágio 1	0	1	1	0	0	1	19
Estágio 2	1	0	1	0	0	1	29
Estágio 3	1	0	0	1	0	1	25
Estágio 4	1	0	0	1	1	0	26
Estágio 5	0	1	0	1	1	0	16
Estágio 6	0	1	1	0	1	0	1A

6.3.2.3 Seqüência trifásica simplificada

A partir da modelagem da seqüência trifásica linearizada, observou-se que em três dos seis estágios, apenas um dos atuadores estava ativo. Buscou-se então eliminar esses estágios, mantendo apenas os estágios com dois atuadores ativos. A Figura 32 abaixo representa a seqüência alterada.

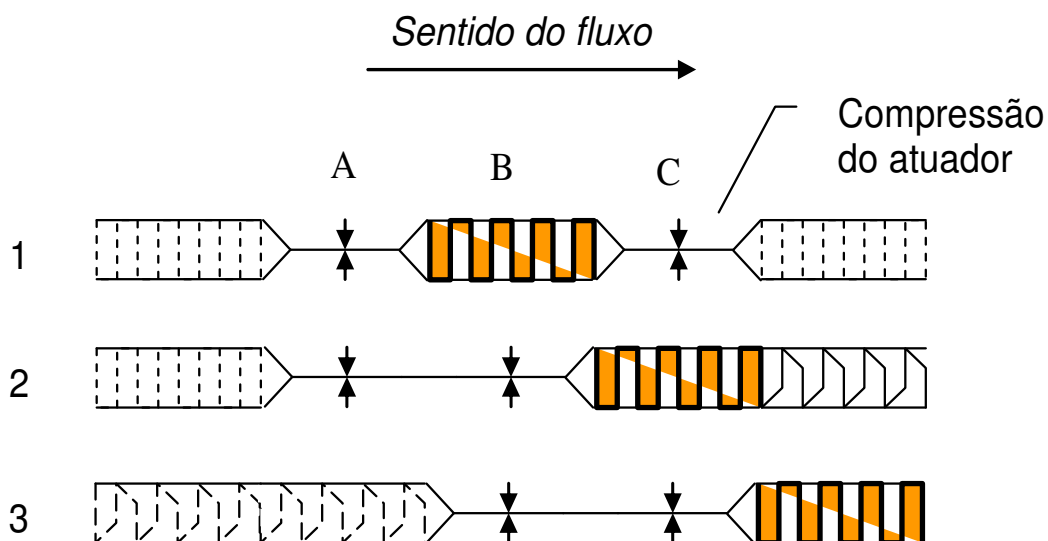


Figura 32 – Seqüência trifásica simplificada

A seqüência é representada abaixo, na Figura 33, numa carta de tempos.



Figura 33 – Seqüência trifásica simplificada

Da carta de tempos acima, extrai-se os valores para os seis bits de controle, formando a palavra hexadecimal para cada estágio, conforme a Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Palavras de controle da seqüência trifásica simplificada

Estágio	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Palavra Hexadecimal
Estágio 1	0	1	1	0	0	1	19
Estágio 2	1	0	0	1	0	1	25
Estágio 3	0	1	0	1	1	0	16

7 RESULTADOS

Testes com as diferentes seqüências de acionamento anteriormente explicadas foram realizados a fim de obter-se e comparar suas faixas de operação.

7.1 SEQÜÊNCIA DO PROTÓTIPO 1

Os resultados obtidos com o ensaio da seqüência de acionamento do Protótipo 1 realizados no Protótipo 2 podem ser visualizadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados obtidos de vazão e pressão para ensaio da seqüência do Protótipo 1 no protótipo 2

Período (ms)	Ciclos	Tempo (s)	Volume (mL)	Vazão (mL/s)	Vazão média (mL/s)	Altura (cm)	Pressão (Pa)	Pressão média (Pa)
40	500	20	559	27,95	29,39	6	587	562
		20	608	30,40		4,5	440	
		20	610	30,50		6	587	
		20	574	28,70		6,5	636	
45	500	22,5	633	28,13	23,41	6	587	568
		22,5	572	25,42		6	587	
		22,5	446	19,82		5,5	538	
		22,5	456	20,27		5,75	562	
47	500	23,5	691	29,40	29,40	6,25	611	611
48	500	24	622	25,92	28,38	6,25	611	611
		24	740	30,83		6,25	611	
49	500	24,5	745	30,41	30,41	6,75	660	660
50	500	25	707	28,28	27,13	6,25	611	617
		25	532	21,28		6	587	
		25	736	29,44		6,25	611	
		25	738	29,52		6,75	660	
52	500	26	649	24,96	24,96	6	587	587
55	500	27,5	688	25,02	23,25	6,25	611	581
		27,5	649	23,60		5,75	562	
		27,5	528	19,20		5,75	562	
		27,5	693	25,20		6	587	

Plotando-se os valores obtidos em gráficos de pressão e vazão, como vistos na Figura 34 e na Figura 35, observa-se que alguns pontos não correspondem ao

comportamento previsto por (PIRES, 2007). Isto deveu-se à influência da eficiência elétrica dos solenóides no desenvolvimento de fluxo. Após a realização de vários ensaios, os solenóides passavam a esquentar, reduzindo a eficiência por perda de energia na forma de calor.

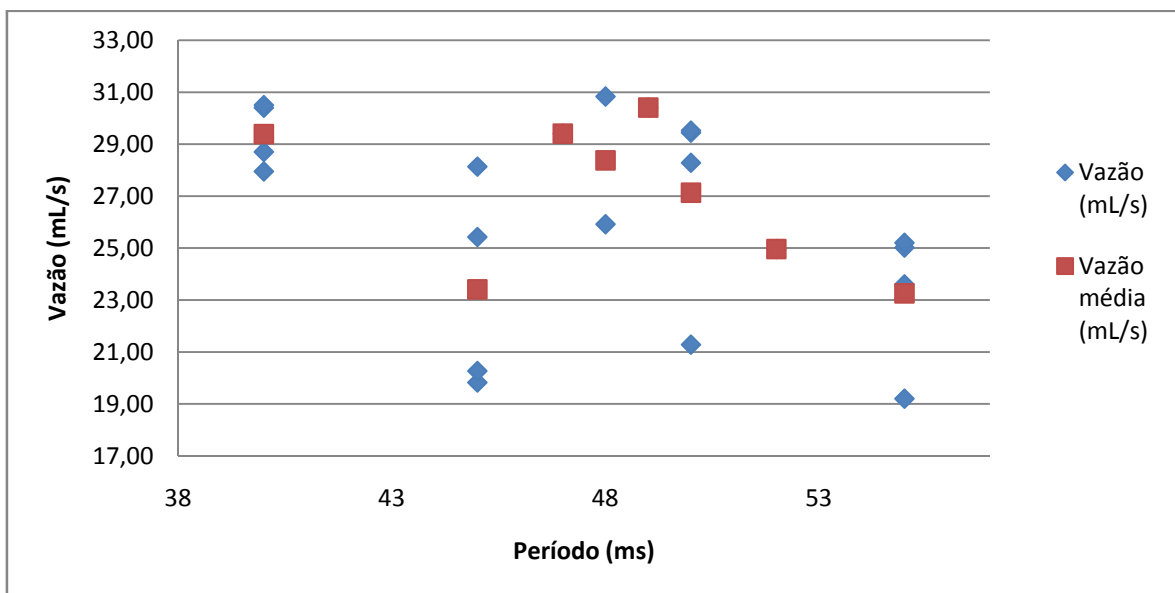


Figura 34 - Vazão x período – seqüência do Protótipo 1 – protótipo 2

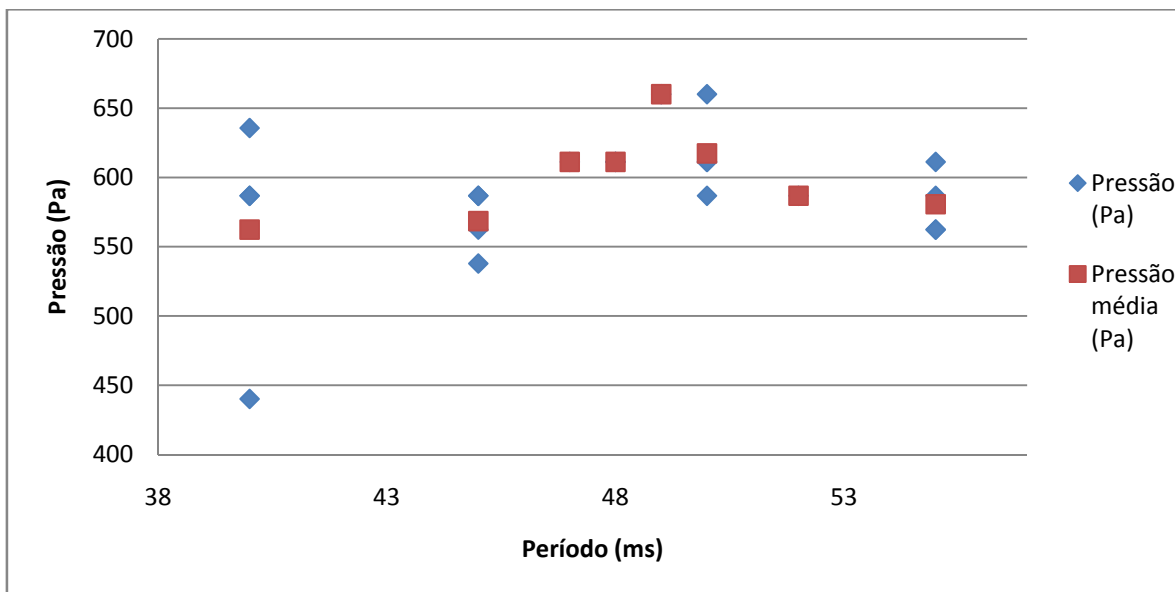


Figura 35 – Pressão x período – seqüência do Protótipo 1 – protótipo 2

Sabendo-se a ordem de realização dos ensaios e comparando-se com os valores obtidos, percebe-se que os valores obtidos para 45 ms estão abaixo do normal e não correspondem ao comportamento da bomba. Excluindo-se estes ensaios então, obtém-se as seguintes curvas apresentadas na Figura 36 e na Figura 37.

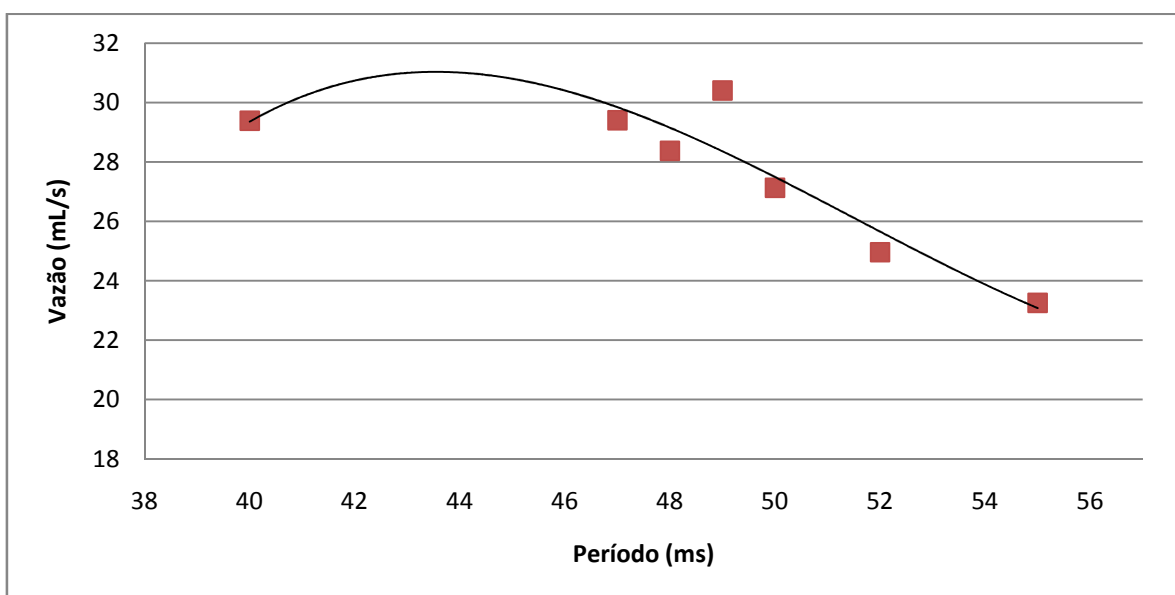


Figura 36 – Comportamento da vazão – sequência do Protótipo 1 – Protótipo 2

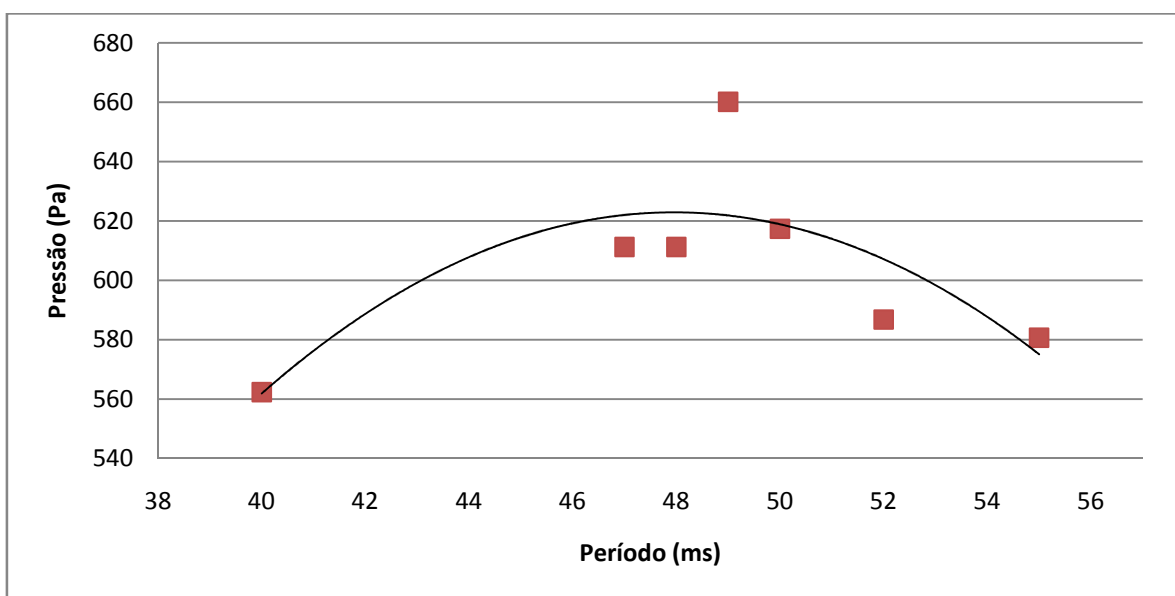


Figura 37 - Comportamento da pressão – sequência do Protótipo 1 – Protótipo 2

Como a leitura de pressão não possui precisão suficiente, admite-se que a faixa de trabalho deste ensaio se encontra na faixa 40~46 ms, oferecendo vazão média máxima de 29,4 mL/s e pressão média correspondente de 611 Pa.

7.2 SEQUÊNCIA TRIFÁSICA

Os dados obtidos para a sequência de acionamento trifásica no Protótipo 2 podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados obtidos de vazão e pressão para ensaio da sequência trifásica no protótipo 2

Período (ms)	Ciclos	Peso (g)	Tempo (s)	Volume (mL)	Vazão (mL/s)	Vazão média (mL/s)	Altura (cm)	Pressão (Pa)	Pressão média (Pa)
60	500	879	30	879	29,30	29,24	3,75	367	399
		876	30	876	29,20		4	391	
		877	30	877	29,23		4,5	440	
62	500	885	31	885	28,55	29,04	4,75	465	469
		895	31	895	28,87		4,75	465	
		906	31	906	29,23		5	489	
		910	31	910	29,35		4,75	465	
		905	31	905	29,19		4,75	465	
63	500	903	31,5	903	28,67	28,52	4,75	465	465
		889	31,5	889	28,22		4,75	465	
		903	31,5	903	28,67		4,75	465	
65	500	908	32,5	908	27,94	27,60	4,75	465	465
		899	32,5	899	27,66		4,75	465	
		884	32,5	884	27,20		4,75	465	
70	500	737	35	737	21,06	21,06	4,75	465	465

Plotando-se estes valores em gráficos em função do período de acionamento obtém-se a Figura 38 e a Figura 39.

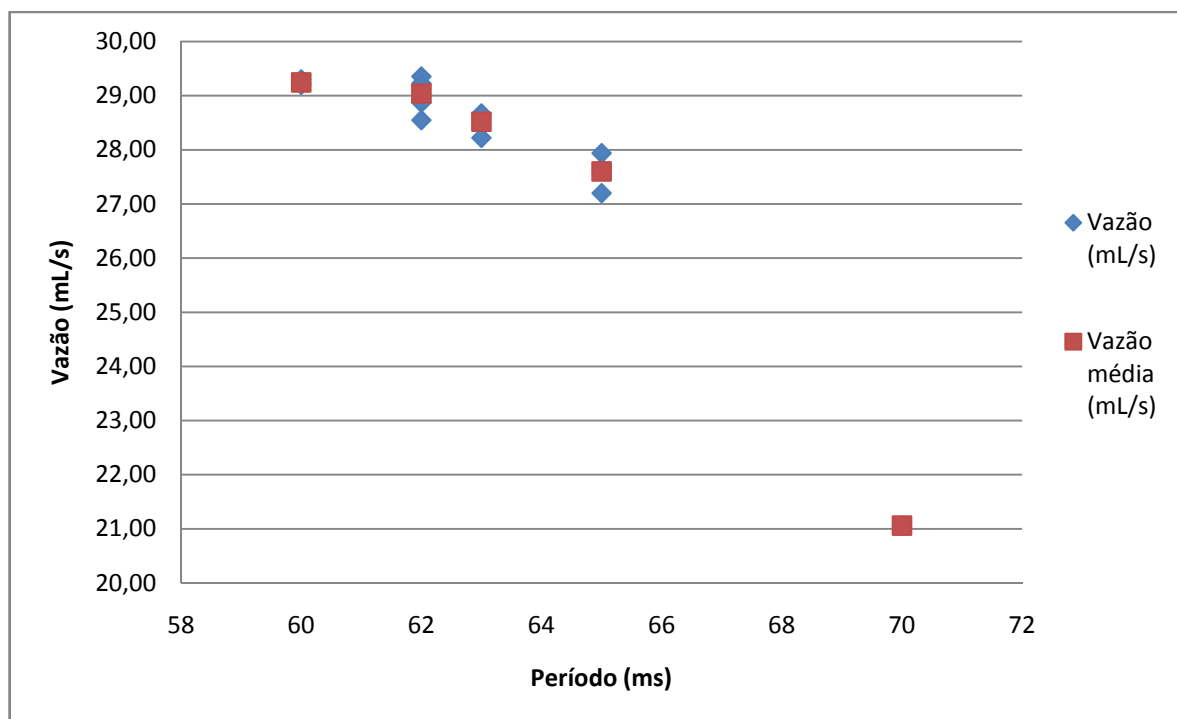


Figura 38 - Vazão x período – seqüência trifásica – protótipo 2

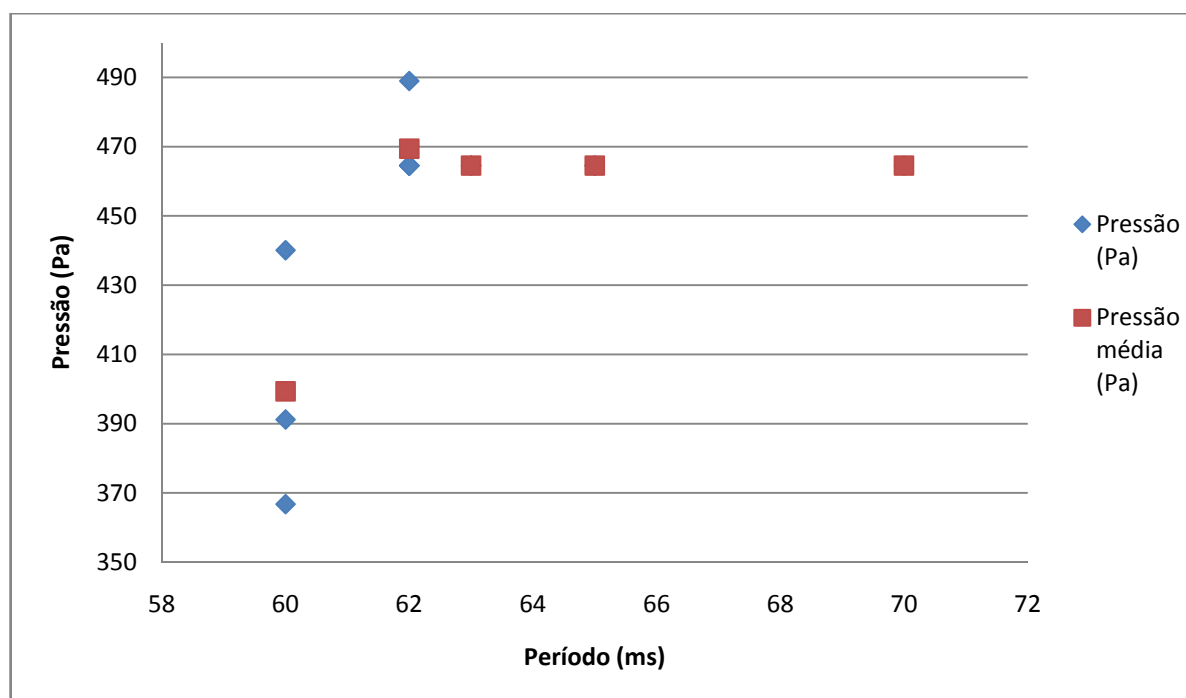


Figura 39 - Pressão x período – seqüência trifásica – protótipo 2

Sabendo-se do problema de aquecimento dos solenóides, estes testes foram realizados com os solenóides sempre resfriados. A visualização da Figura 38 e da Figura 39 já permitem uma boa visualização do comportamento da pressão e da vazão para esta seqüência. A Figura 40 e a Figura 41 fornecem uma linha de tendência para o comportamento da vazão e da pressão, respectivamente.

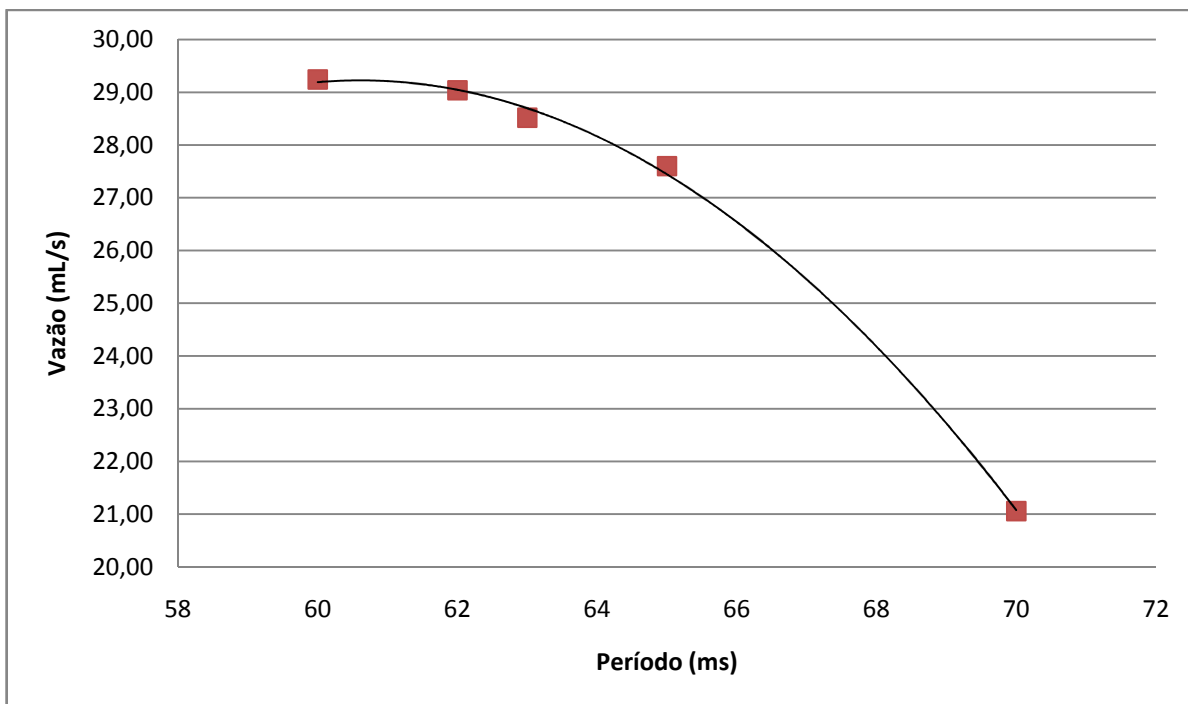


Figura 40 – Comportamento da vazão – sequência trifásica – Protótipo 2

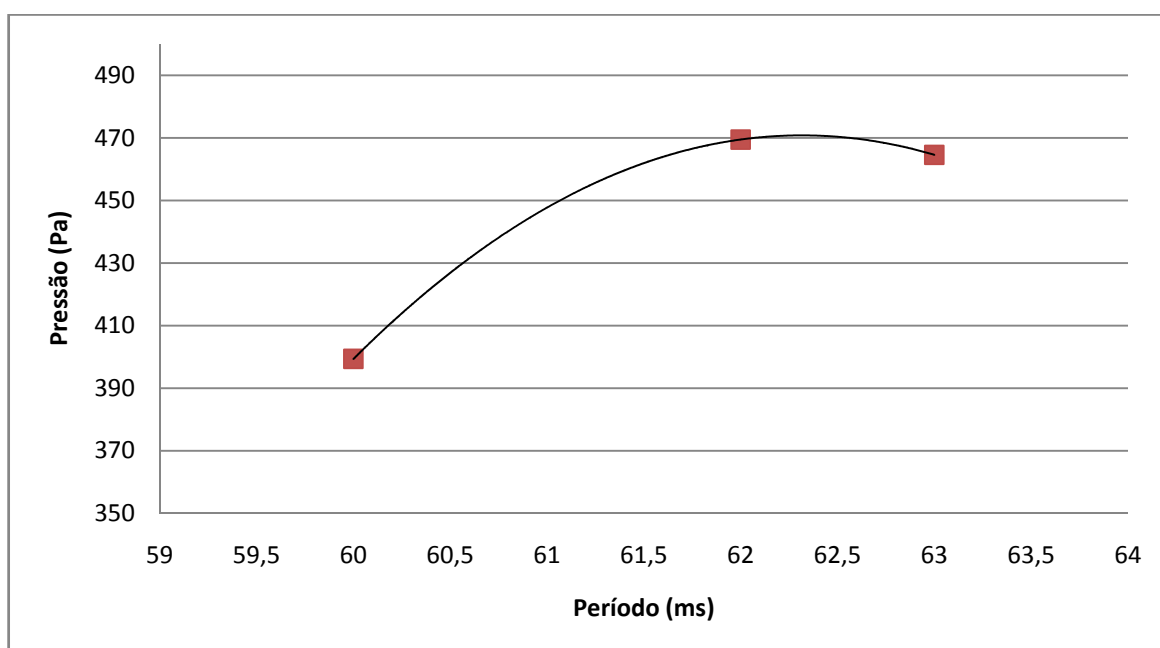


Figura 41 – Comportamento da pressão – sequência trifásica – Protótipo 2

Para verificar a linha de tendência do comportamento da pressão – Figura 41 – foram excluídos os valores de períodos acima de 63 ms, pois estes eram idênticos. Uma interpretação destes resultados é que a pressão se mantém para tais valores, no entanto, como a faixa de operação para a vazão está abaixo dos 63 ms, o comportamento acima não é de grande interesse. De fato, a faixa de operação desta

seqüência se encontra por volta de 58~62 ms, oferecendo uma vazão média máxima de 29,24 ms e pressão correspondente de 399 Pa, apresentando uma queda considerável de vazão acima dessa faixa.

7.3 SEQÜÊNCIA DE ACIONAMENTO TRIFÁSICA SIMPLIFICADA

Na aquisição de dados da seqüência de acionamento trifásica simplificada percebeu-se imediatamente a queda de desempenho tanto em vazão como em pressão. Poucos ensaios, representados na Tabela 10 – Dados obtidos de vazão e pressão para ensaio da seqüência trifásica simplificada no protótipo 2, foram feitos devido a esta constatação.

Tabela 10 – Dados obtidos de vazão e pressão para ensaio da seqüência trifásica simplificada no protótipo 2

Período (ms)	Ciclos	Peso (g)	Tempo (s)	Volume (mL)	Vazão (mL/s)	Altura (cm)	Pressão (Pa)
40	500	397	20	397	19,85	3,5	342
50	500	519	25	519	20,76	3,5	342
60	500	376	30	376	12,53	3,25	318

Os gráficos puderam ser resumidos na Figura 42 e na Figura 43. A faixa de operação se encontra por volta de 43~48 ms, fornecendo vazão máxima de 20,76 ms e pressão correspondente de 342 Pa. Ambos os resultados são consideravelmente menores que os obtidos com a seqüência trifásica e a seqüência do Protótipo 1.

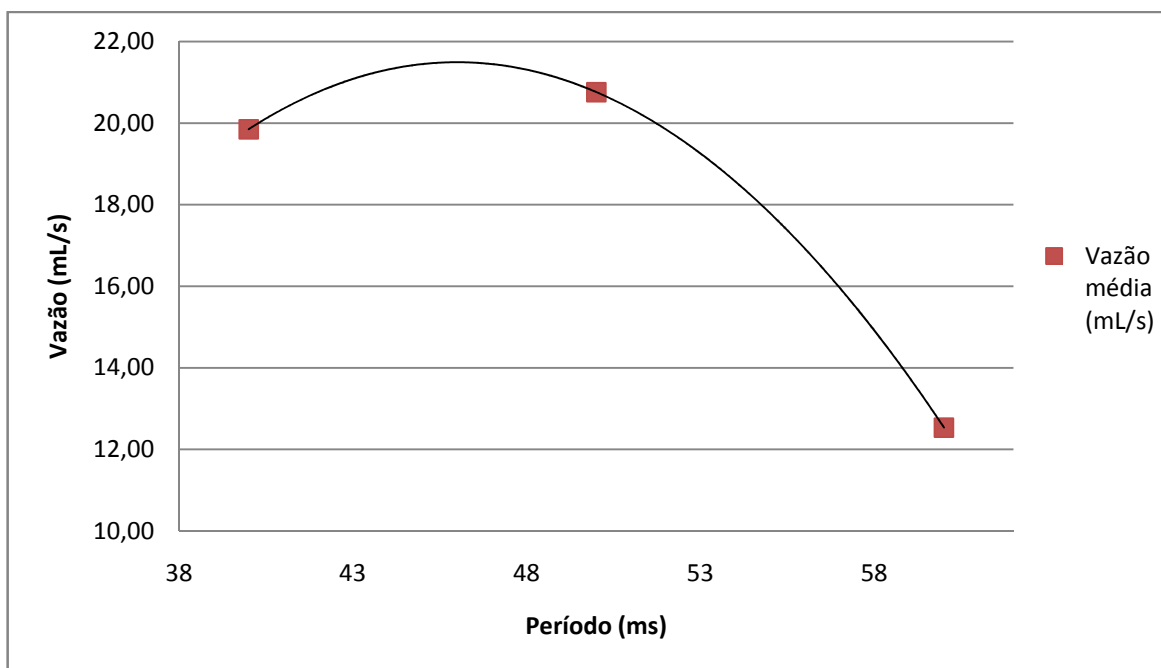


Figura 42 – Comportamento da vazão – sequência trifásica simplificada – Protótipo 2

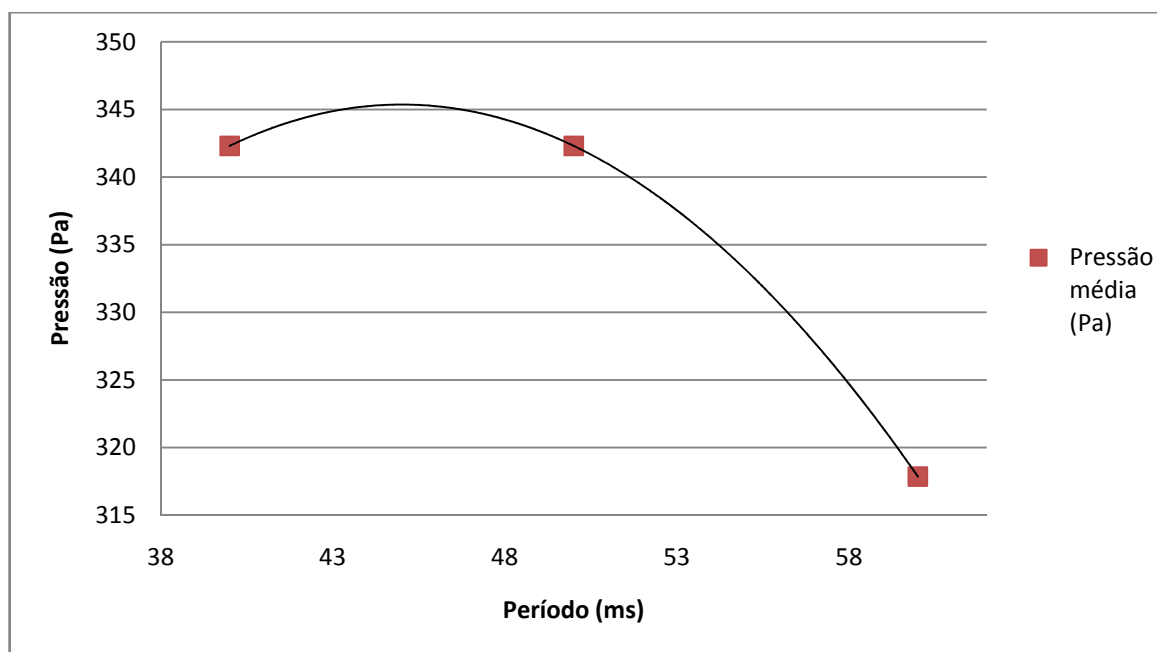


Figura 43 – Comportamento da pressão – sequência trifásica simplificada – Protótipo 2

8 DISCUSSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que as mudanças implementadas contribuíram significativamente para o aumento do desempenho da bomba em termos de vazão – em relação aos Protótipos 0 e 1 – e de pressão – em relação ao Protótipo 0.

No item 7.1 demonstra-se o aumento de desempenho mantendo-se a mesma seqüência de acionamento do Protótipo 1. A vazão média máxima atingida foi de 29,4 mL/s e pressão média correspondente de 611 Pa. Em relação ao Protótipo 1, que atingiu 5,4 mL/s, houve um aumento de 444% na vazão, ou seja, a vazão atingida é aproximadamente 5 vezes maior que a do Protótipo 1. Estes resultados são a prova de que as mudanças foram capazes de promover aumento de desempenho por compararem resultados de seqüências de acionamento iguais. Em relação ao Protótipo 0, apesar da seqüência utilizada diferir um pouco, o aumento chegou a quase 1244%, consistindo em uma vazão 13 vezes maior. Com relação à pressão, o aumento foi de 9,35%, sugerindo que de fato a seqüência do Protótipo 1 garante mais pressão que a do Protótipo 0.

Os resultados de vazão do Protótipo 2 em comparação com as outras etapas do projeto e com a *Hemopump* são mais facilmente vistos na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação do Protótipo 2 (seqüência trifásica) com outras etapas do projeto

Bomba	Vazão (mL/s)	Relação Percentual
Protótipo 0	2,19	1335,2%
Protótipo 1	5,4	541,5%
<i>Hemopump</i>	58,3	50,2%
Protótipo 2	29,24	100%

Já no item 7.2, a seqüência utilizada é a trifásica, considerada mais eficiente pela sua ciclicidade. Espera-se que a diferença de desempenho entre esta seqüência e os resultados do item 8.1 caracterize qual destas seqüências é mais eficiente. No entanto, os resultados foram muito próximos com relação à vazão média máxima

atingida e menores na seqüência trifásica em relação à pressão. Ainda assim, acredita-se que a seqüência trifásica seja mais eficiente que a seqüência do Protótipo 1 pela sua repetibilidade. Diversos testes realizados com a seqüência trifásica, estando os solenóides superaquecidos ou não, resultavam em valores muito próximos de vazão e pressão.

Já a seqüência trifásica simplificada, apresentada no item 7.3, não obteve resultados satisfatórios, sendo desconsiderada como seqüência de acionamento válida.

Assim, pensando em trabalhos futuros, recomenda-se a utilização da seqüência trifásica pelo seu aumento de vazão em relação ao Protótipo e ao Protótipo 0. Devido às baixas pressões apresentadas, sugere-se o re-projeto visando o aumento de pressão.

Outras sugestões referem-se à implementação do acionamento trifásico utilizando-se ondas sinusoidais, com o auxílio de PWM. Espera-se que o acionamento se torne mais suave desta forma, reduzindo a variação de pressão. Também pode se esperar uma diminuição do refluxo devido á continuidade do movimento, causando aumento de pressão e vazão.

Os solenóides utilizados foram fabricados artesanalmente, de forma a cumprirem sua função e se adequarem à geometria da bomba. Desta forma, ocorreu um aumento intenso da temperatura conforme sua utilização, acarretando em perda de energia na forma de calor e conseqüente perda de eficiência. Sugere-se o estudo aprofundado de solenóides bi-direcionais utilizando-se ímãs permanentes como núcleo.

Outro fator a ser considerado é a tolerância construtiva da bomba. Pequenas variações de posição afetam drasticamente o comportamento da bomba. Os testes realizados consideraram a melhor configuração geométrica da bomba. No entanto, para garantir a confiabilidade dos resultados deve-se melhorar a fabricação das peças.

9 CONCLUSÕES

O trabalho tinha como principal objetivo o estudo do comportamento da BPDF de forma a melhorar seu desempenho em termos de vazão e carga. Bons resultados foram atingidos, aumentando-se a vazão em mais de 13 vezes em relação à bomba anteriormente projetada. A pressão correspondente não obteve melhoras, mas mostra-se que é possível aumentar a pressão e a vazão, definindo-se uma configuração ótima e melhorando-se aspectos citados no item 8.

Muitos conceitos novos foram implementados à bomba, como o acionamento *push-pull*, a seqüência de acionamento trifásica e o sistema oscilatório. Validados estes princípios, sugere-se o estudo de cada um destes conceitos de forma a aumentar a eficiência de cada um, contribuindo para o aumento de desempenho da bomba.

Tópicos a serem estudados futuramente incluem acionamento por PWM senoidal, modelagem da dinâmica do sistema, construção do protótipo com tolerâncias mais rígidas, melhorias no sistema oscilatório, ensaios com fluidos de viscosidade e dinâmica semelhantes à do sangue e estudo da viabilidade de miniaturização.

REFERÊNCIAS

BENNETT, M.; HORTON, S.; THUYS, C.; AUGUSTIN, S.; ROSENBERG, M.; BRIZARD, C. (Cardiac Surgical Unit, Royal Children's Hospital) **Hemólise induzida pela bomba: uma comparação de dispositivos** Traduzido do original por Maria Helena L. Souza e Decio O. Elias. [Victoria, Australia] : Perfusion 19:(2), p. 107-111, 2004.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** [Rio de Janeiro] : Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, C.; KUZKO, A. **Máquinas elétricas, conversão eletromecânica da energia: processos, dispositivos e sistemas.** São Paulo : McGraw-Hill, 1975.

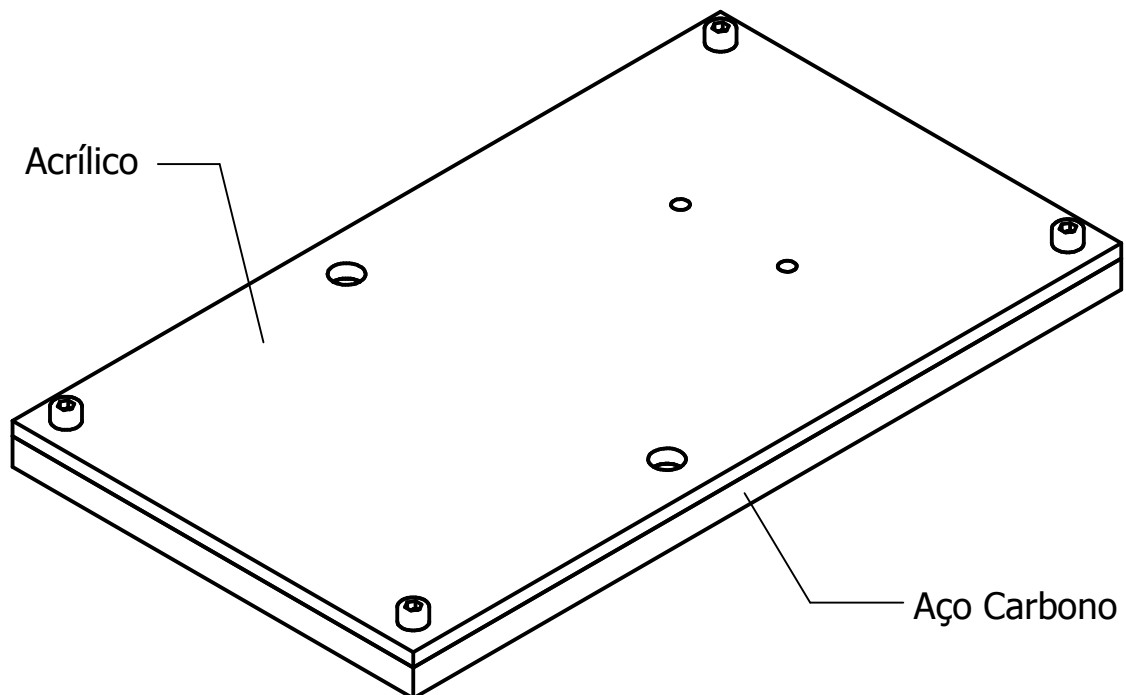
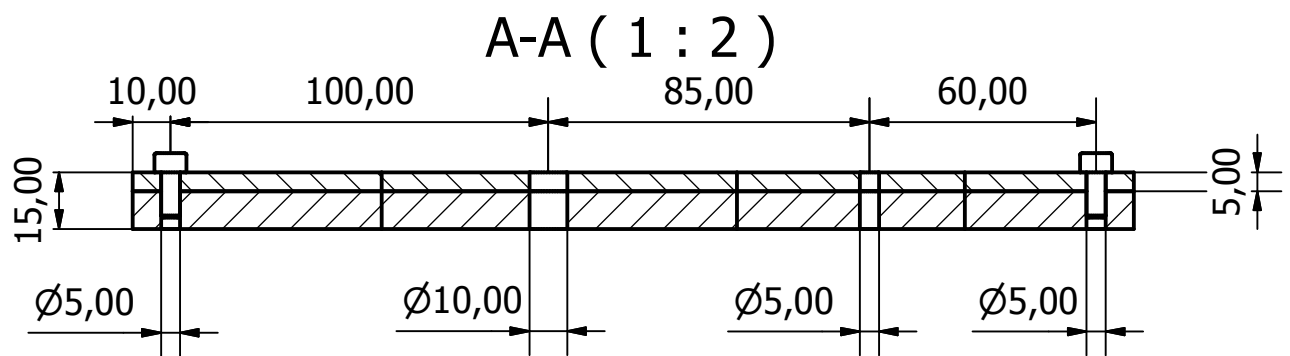
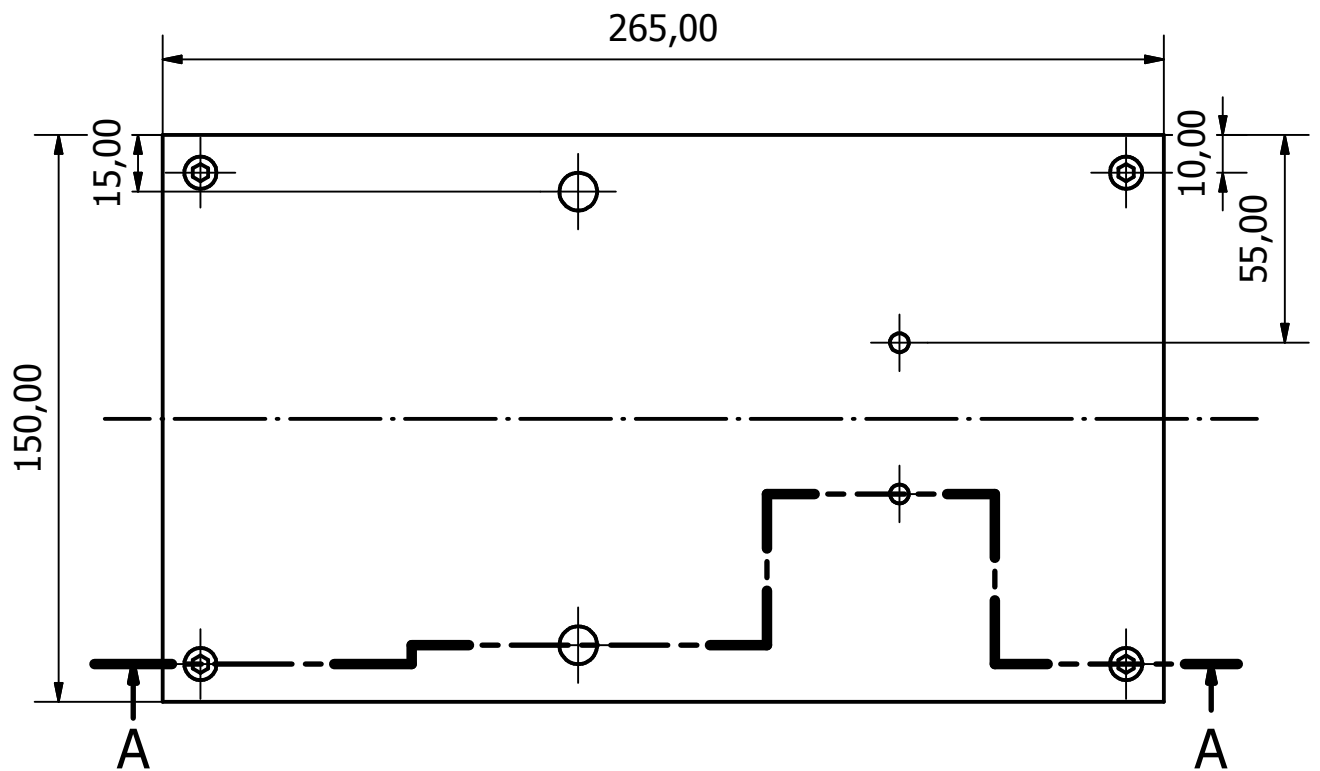
FUCHS, A.; NETZ, H. **Ventricular assist devices in pediatrics.** [München, Germany] : Images Paediatric Cardiology, 2002

MISRA, J. C. **Biomathematics: Modelling and Simulation.** Hackensack, NJ : World Scientific, 2006

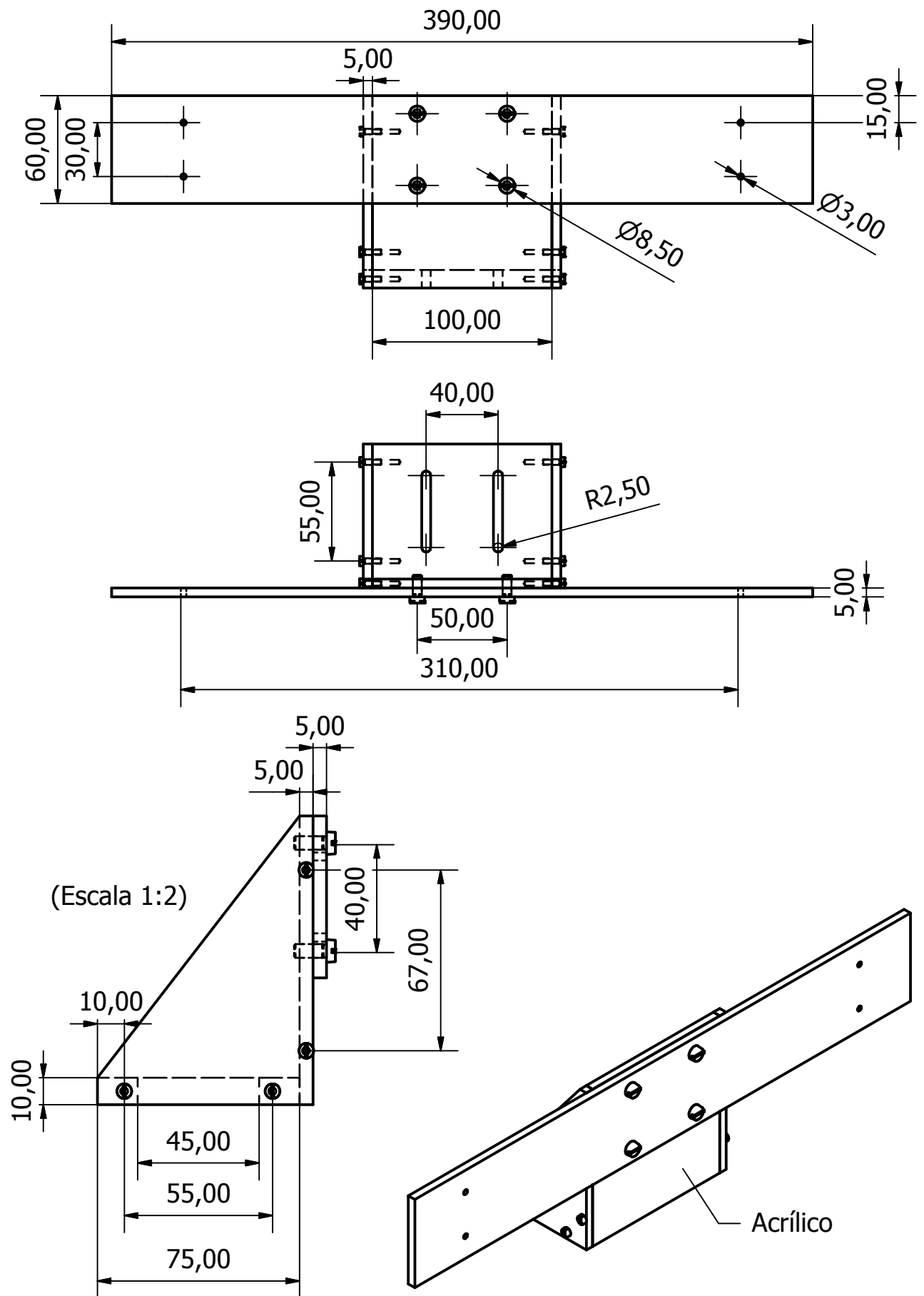
PIRES, D. C. **Bomba pulsátil de duto flexível.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo : s.n., 2007. Trabalho de Conclusão de Curso.

TEXAS HEART INSTITUTE. Texas, EUA. Página dedicada à prevenção e ao tratamento de doenças cardiovasculares e à divulgação do conhecimento em âmbito mundial. Disponível em <<http://texasheart.org/index.cfm>>. Acesso em: 28 jun. 2008

APÊNDICE A – DESENHOS DE FABRICAÇÃO E CONJUNTO



Autores: Marc Neilson e Angeline Santos	Ano: 2008	Escala: 1/2
EPUSP PMR 2550	Peça: Base	



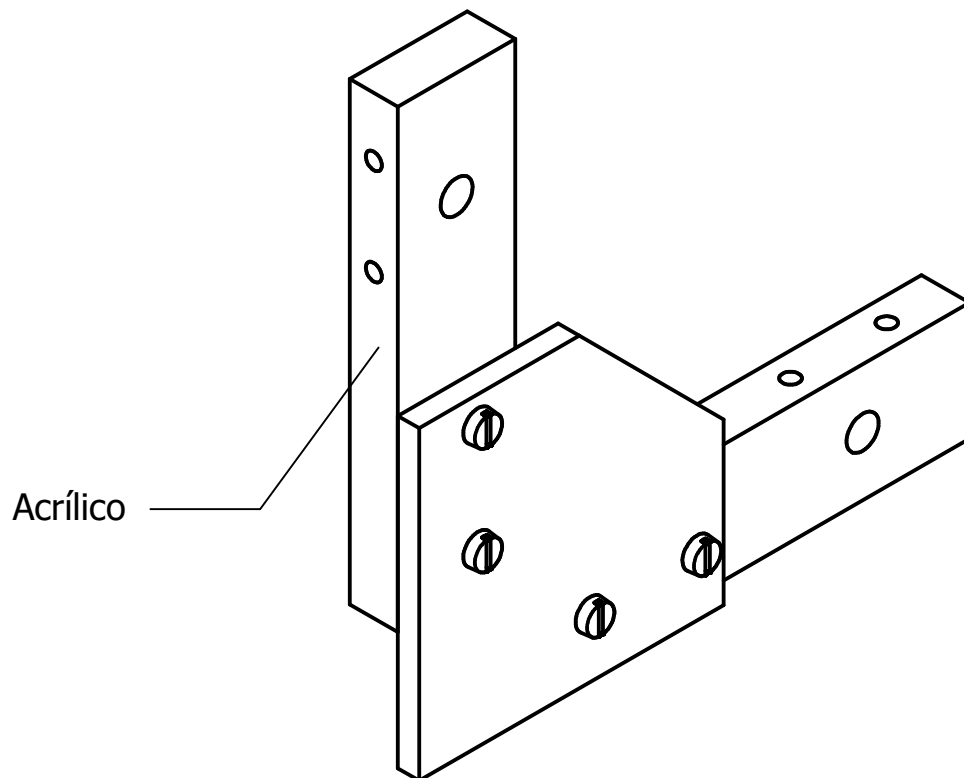
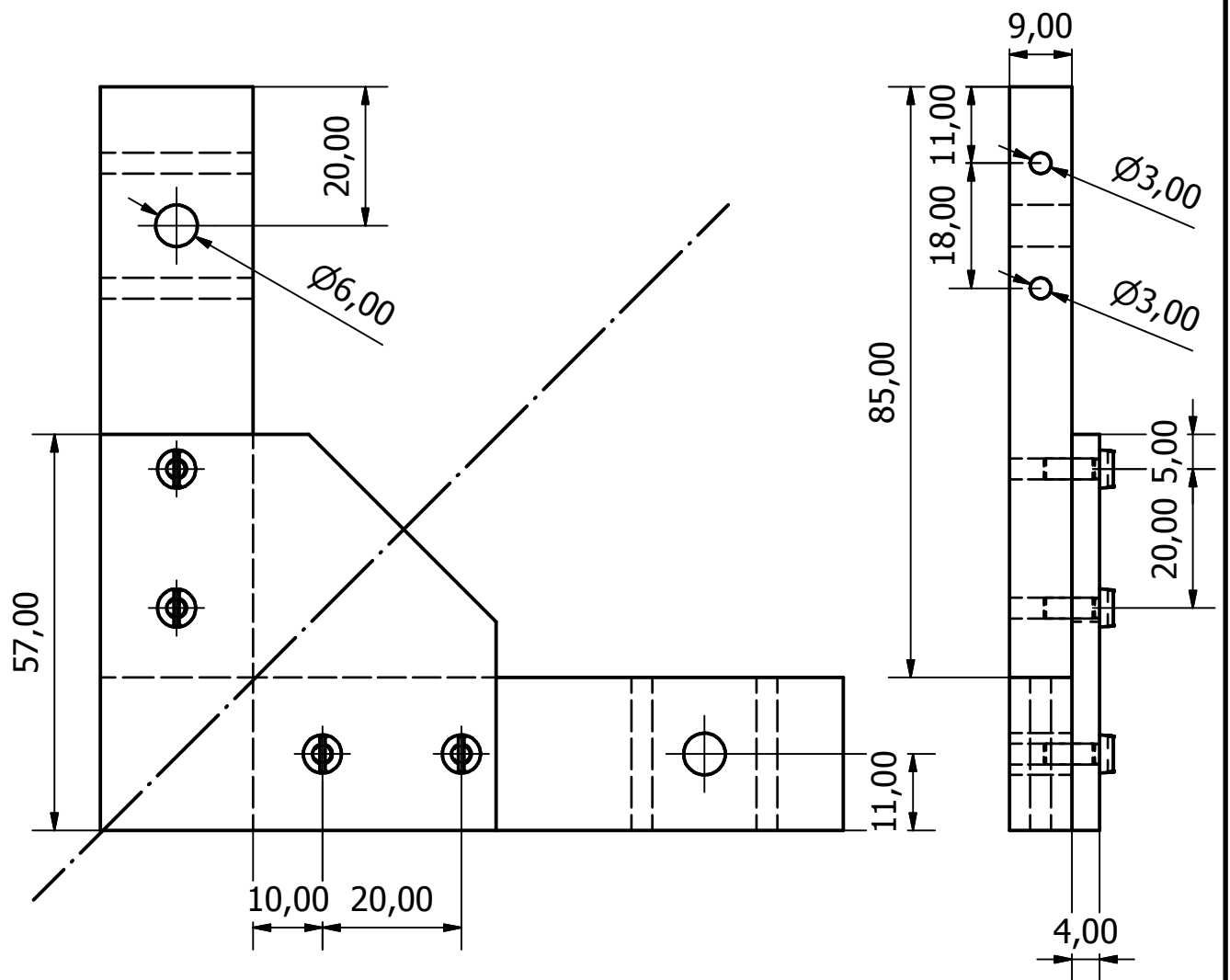
Autores:
Marc Neilson e Angeline Santos

Ano:
2008

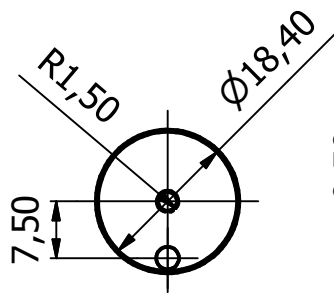
Escala:
1/3

EPUSP
PMR 2550

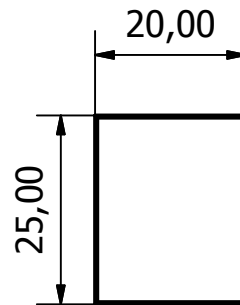
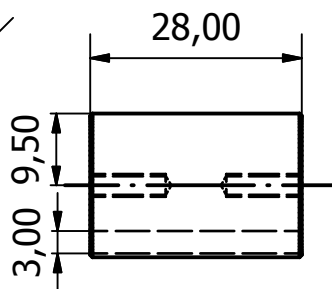
Peça:
Esbarro



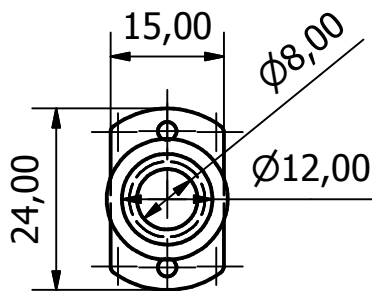
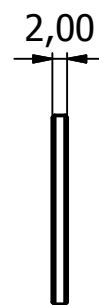
Autores: Marc Neilson e Angeline Santos	Ano: 2008	Escala: 1/1
EPUSP PMR 2550	Peça: Suporte do atuador	



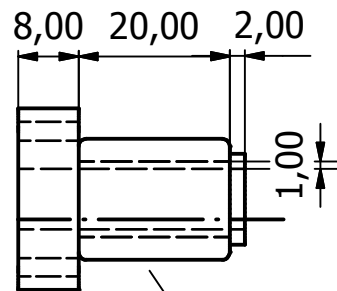
Martetele
(Aço carbono)



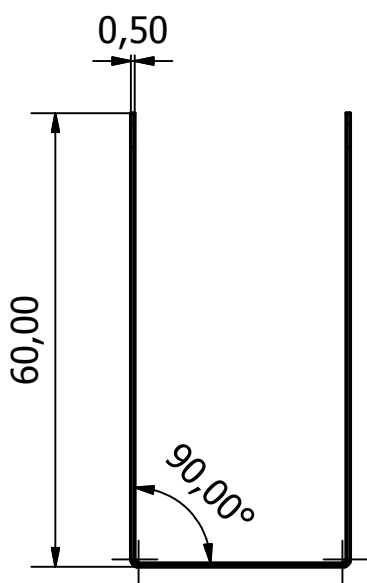
Sapata
(Acrílico)



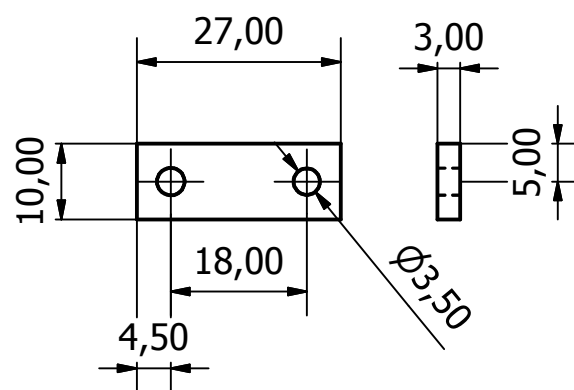
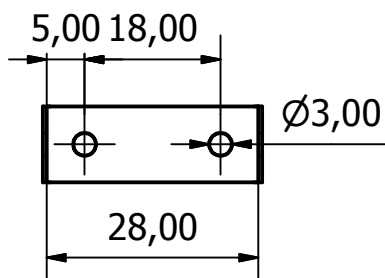
Solenóide
(Polipropileno)



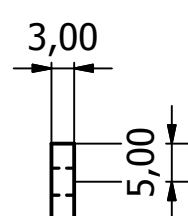
570 espiras



Mola em 'U'
(Latão)



Apoio da mola
(Alumínio)



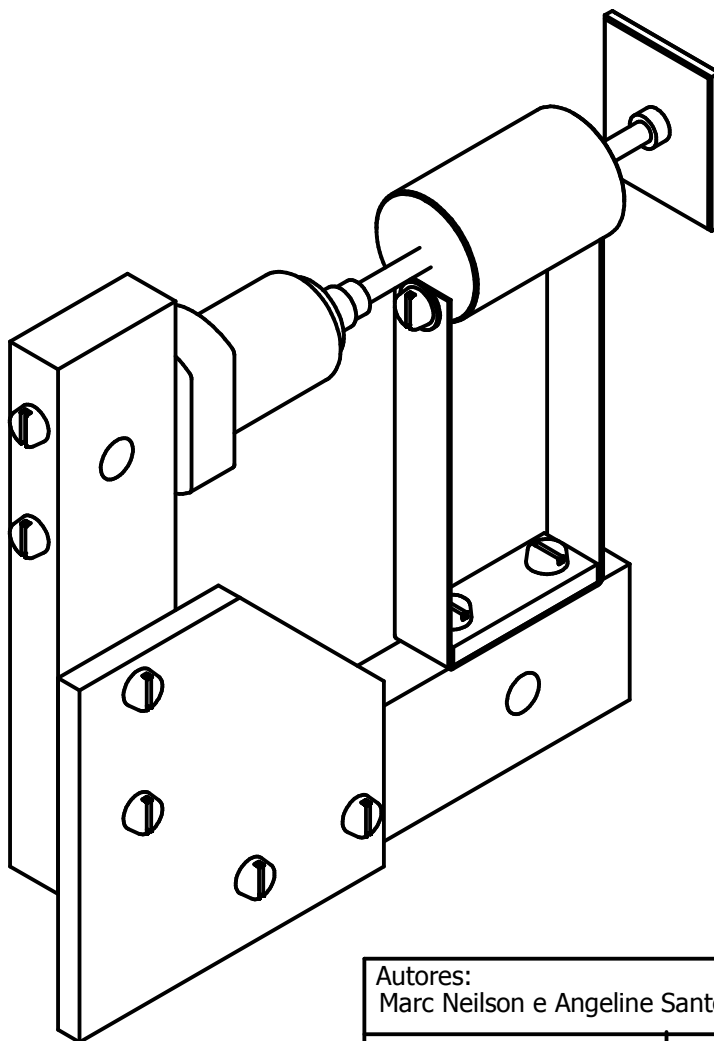
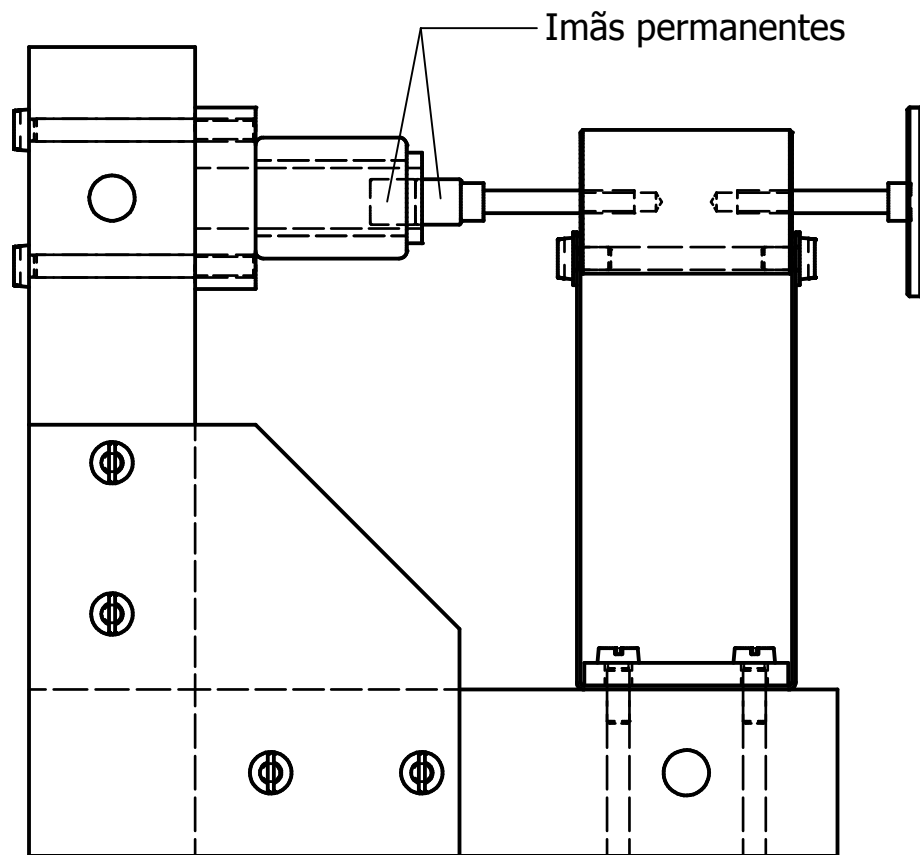
Autores:
Marc Neilson e Angeline Santos

Ano:
2008

Escala:
1/1

EPUSP
PMR 2550

Peça:
Componentes do atuador



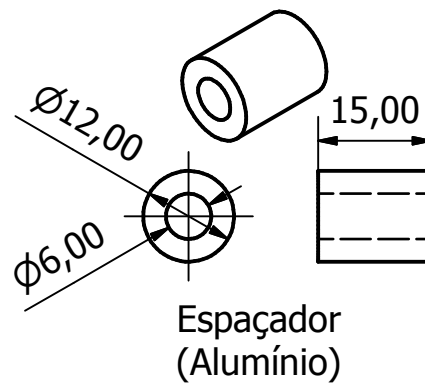
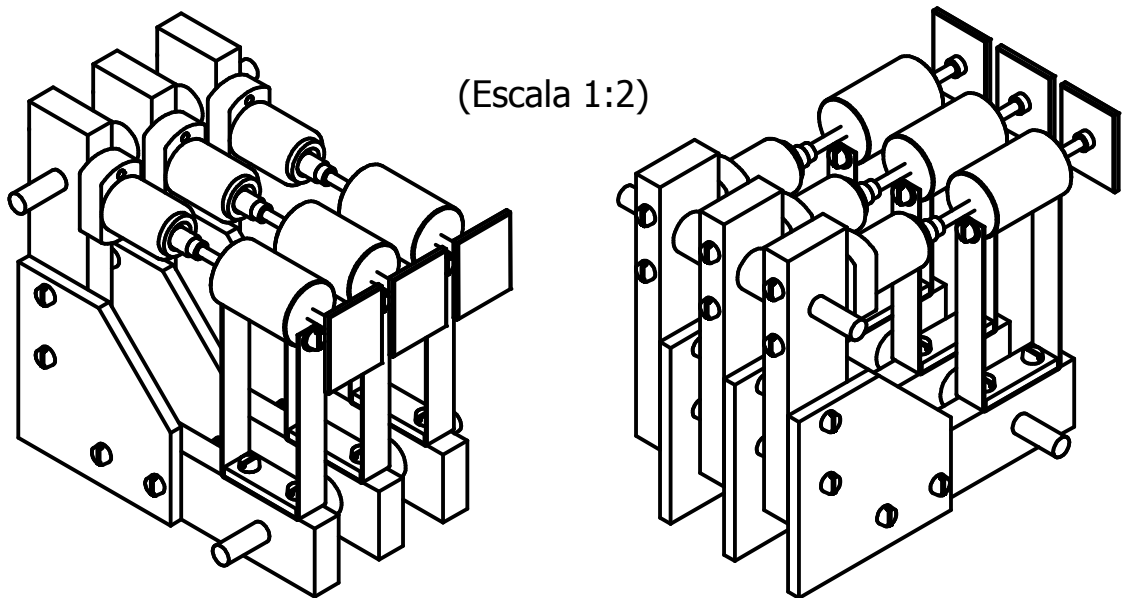
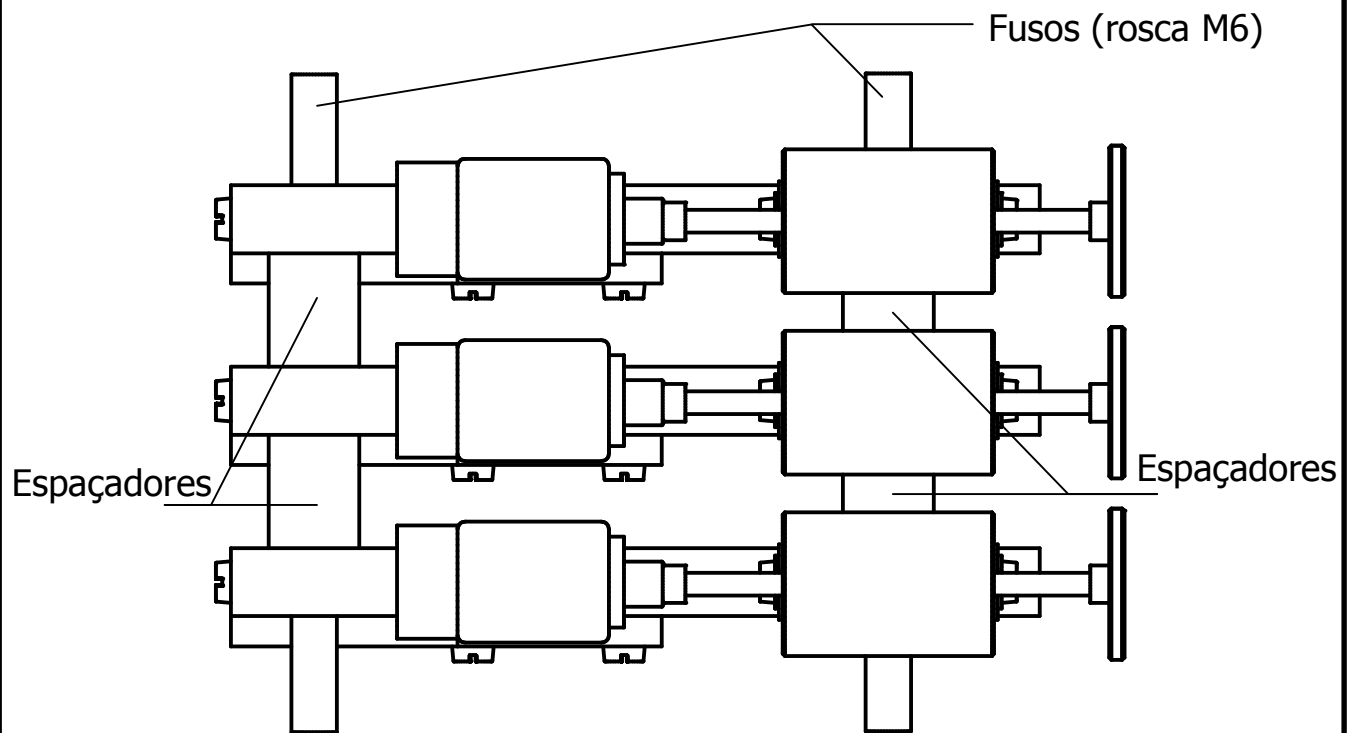
Autores:
Marc Neilson e Angeline Santos

Ano:
2008

Escala:
1/1

EPUSP
PMR 2550

Peça:
Montagem do atuador



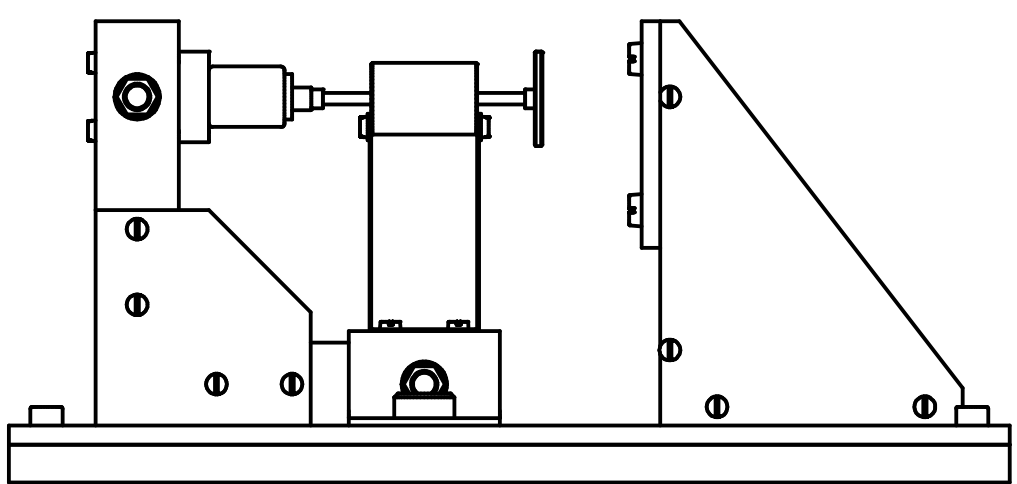
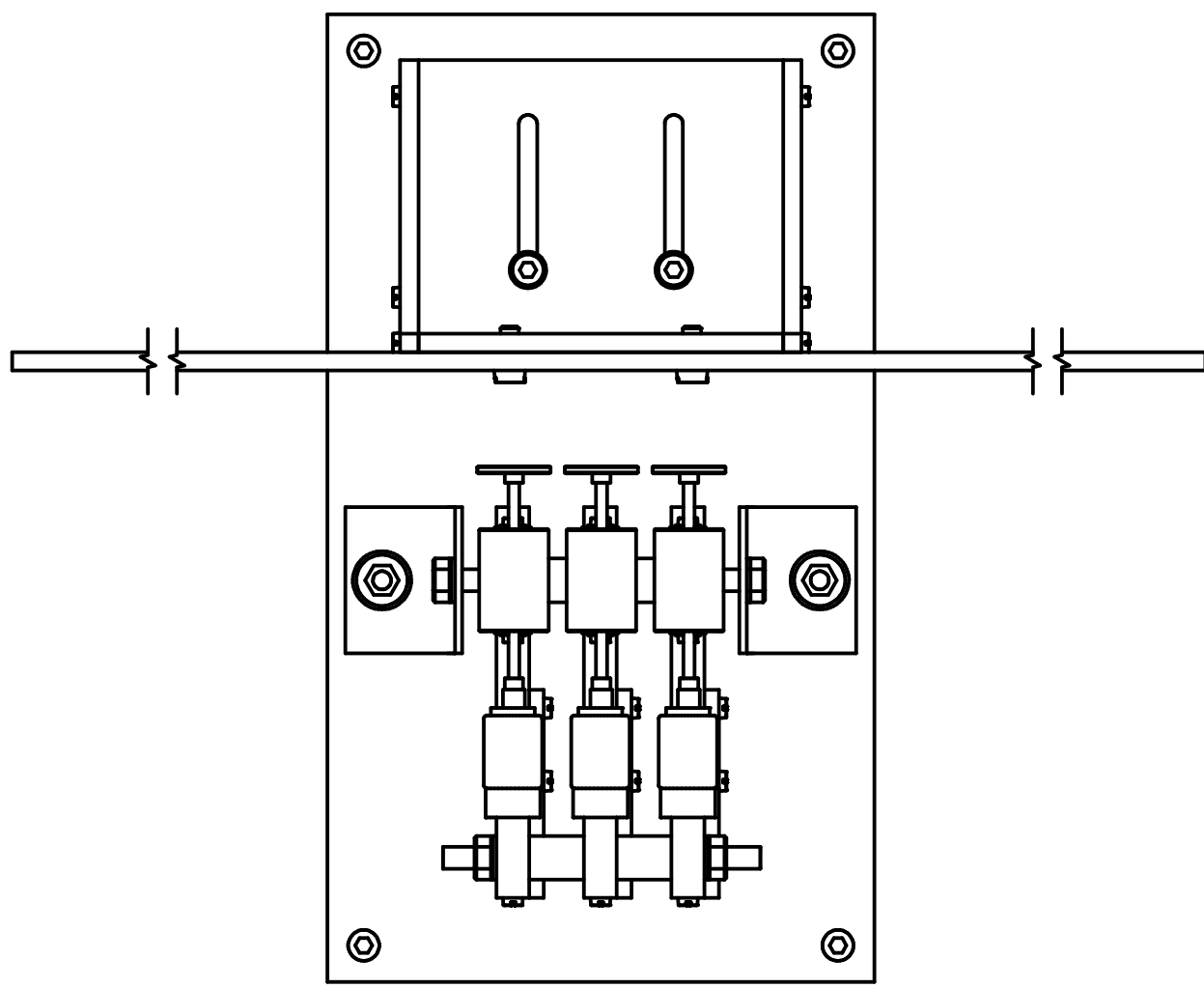
Autores:
Marc Neilson e Angeline Santos

Ano:
2008

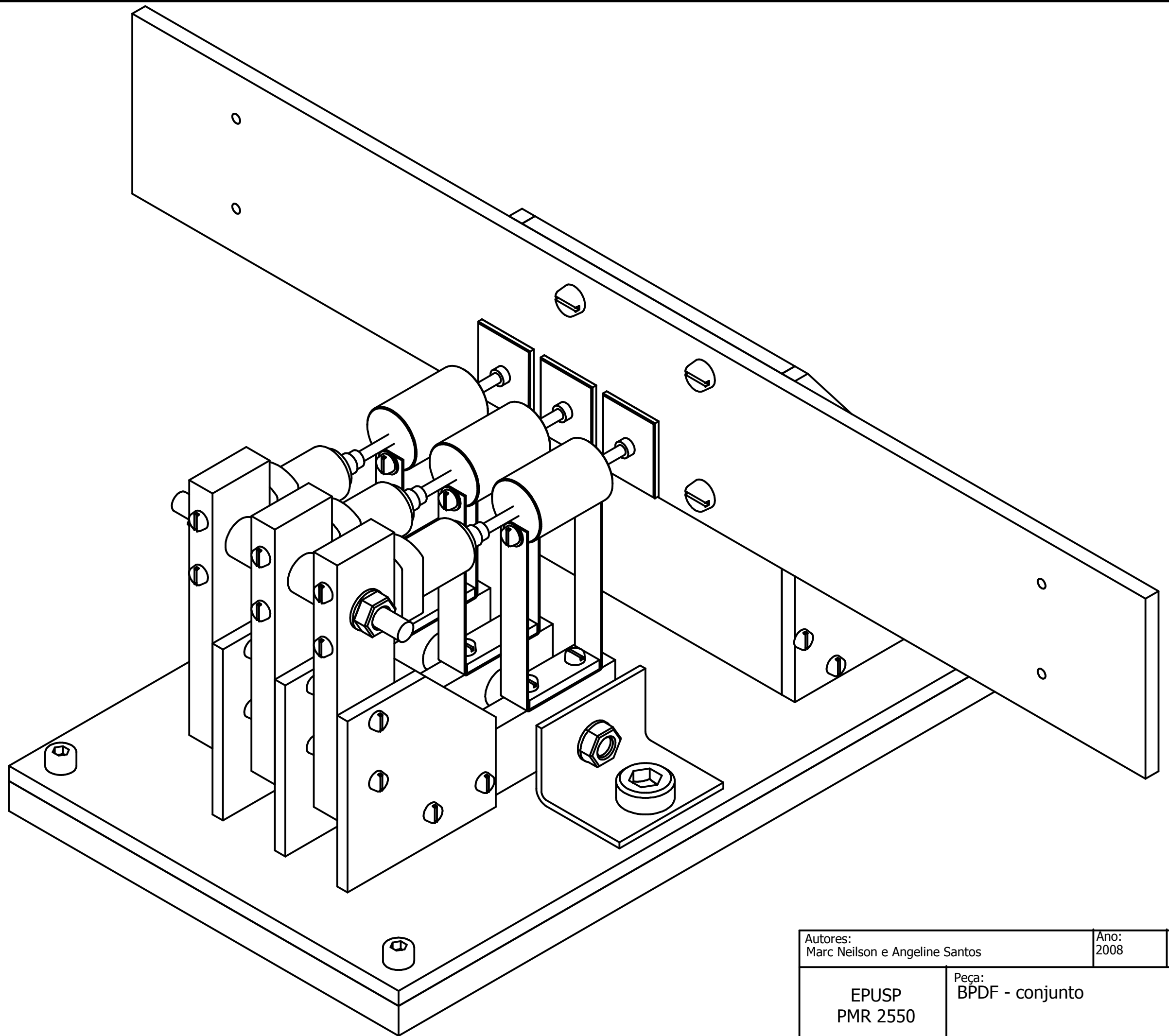
Escala:
1/1

EPUSP
PMR 2550

Peça:
Conjunto de atuadores



Autores: Marc Neilson e Angeline Santos		Ano: 2008	Escala: 1/2
EPUSP PMR 2550		Peça: BPDF - conjunto	



Autores: Marc Neilson e Angeline Santos		Ano: 2008	Escala: 1/1
EPUSP PMR 2550		Peça: BPDF - conjunto	

APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DA ROTINA DE CONTROLE

```

/*****
**          Escola Politécnica da Universidade de São Paulo          **
**                                                                 **
**          Programa para acionamento pela porta paralela (DB25)    **
**                                                                 **
**          Autores: Angeline Rodrigues dos Santos   5178317        **
**                  Marc Lucas Hallak Neilson       5175551        **
**                                                                 **
**          Estrategia: - Separar o acionamento em estágios;        **
**                      - Pedir o tipo de acionamento;              **
**                      - Pedir valor para período de acionamento;   **
**                      - Pedir o valor do numero de ciclos.         **
**                                                                 **
**          Inicio: 15/11/2008 (v1)                                Versao: v4 **
*****/

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h> //permite acesso a porta paralela e uso da funcao delay

#define baseport 0x378 //define o endereco da porta lp1

int main()
{
    // Declaracao de variaveis
    /*****
    * - Estagios de acionamento de 1 a 6;
    * - Período, número de ciclos e tipo de acionamento selecionado;
    * - Contador auxiliar na execucao dos ciclos.
    *****/
    int Stage1, Stage2, Stage3, Stage4, Stage5, Stage6;
    int Período, Ciclos, Tipo;
    int cont;

    printf("\n\nInicio do Programa   v4 \n\n");

    //Loop infinito para permitir diversos ensaios em sequencia
    while(1)
    {
        //Leitura da variavel Tipo
        printf("Escolha o TIPO de acionamento:\n");
        printf("1 - Final do 1o. Semestre\n");
        printf("2 - Trifasico (linearizado)\n");
        printf("3 - Trifasico (simplificado)\n");
        printf("4 - Sair do programa\n");

        scanf("%d", &Tipo);

        //O uso do 'break' sai do loop infinito, finalizando o programa
    }
}

```

```

if(Tipo == 4)
    break;

//Leitura das variaveis Periodo e Ciclos
printf("\nDigite o PERIODO de acionamento (ms):");
scanf("%d", &Periodo);
printf("\nDigite o numero de CICLOS:");
scanf("%d", &Ciclos);
printf("\n");

//Inicio do ciclo de acionamento
/*****
* Cada tipo possui uma sequencia de acionamento unica.
*
* Estrategia:
* - Separa o ciclo em N estagios, gravados na forma Hexadecimal;
* - Envio de cada estagio de forma sequencial pelo num. de ciclos;
* - Uso da funcao 'delay' para temporizar cada estagio.
*
* Sintaxe da funcao 'delay':
* void delay (unsigned milliseconds)
* - Nao se precisa de calibracao;
* - Precisao de 1 ms
*****/
if(Tipo == 1)
{
    //Cada bit representa um dos pinos da porta paralela
    Stage1 = 0x1A;    //011010
    Stage2 = 0x19;    //011001
    Stage3 = 0x25;    //100101
    Stage4 = 0x16;    //010110

    for(cont = 1; cont <= Ciclos; cont++)
    {

        printf("\nCiclo: %d\n", cont);

        printf("Estagio1: ");
        outp(baseport, Stage1);    //aciona Estagio 1
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/4);

        printf("Estagio2: ");
        outp(baseport, Stage2);    //aciona Estagio 2
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/4);

        printf("Estagio3: ");
        outp(baseport, Stage3);    //aciona Estagio 3
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/4);

        printf("Estagio4: ");
        outp(baseport, Stage4);    //aciona Estagio 4
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/4);

    }
}

```

```

else if(Tipo == 2)
{
    //Cada bit representa um dos pinos da porta paralela
    Stage1 = 0x19;    //011001
    Stage2 = 0x29;    //101001
    Stage3 = 0x25;    //100101
    Stage4 = 0x26;    //100110
    Stage5 = 0x16;    //010110
    Stage6 = 0x1A;    //011010

    for(cont = 1; cont <= Ciclos; cont++)
    {

        printf("\nCiclo: %d\n", cont);

        printf("Estagio1: ");
        outp(baseport, Stage1);    //aciona Estagio 1
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/6);

        printf("Estagio2: ");
        outp(baseport, Stage2);    //aciona Estagio 2
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/6);

        printf("Estagio3: ");
        outp(baseport, Stage3);    //aciona Estagio 3
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/6);

        printf("Estagio4: ");
        outp(baseport, Stage4);    //aciona Estagio 4
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/6);

        printf("Estagio5: ");
        outp(baseport, Stage5);    //aciona Estagio 5
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/6);

        printf("Estagio6: ");
        outp(baseport, Stage6);    //aciona Estagio 6
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/6);
    }
}
else if(Tipo == 3)
{
    //Cada bit representa um dos pinos da porta paralela
    Stage1 = 0x19;    //011001
    Stage2 = 0x25;    //100101
    Stage3 = 0x16;    //010110

    for(cont = 1; cont <= Ciclos; cont++)
    {

        printf("\nCiclo: %d\n", cont);

        printf("Estagio1: ");

```

```

        outp(baseport, Stage1);    //aciona Estagio 1
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/3);

        printf("Estagio2: ");
        outp(baseport, Stage2);    //aciona Estagio 2
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/3);

        printf("Estagio3: ");
        outp(baseport, Stage3);    //aciona Estagio 3
        printf("0x%X\n", inp(baseport)); //imprime valor da porta
        delay(Periodo/3);
    }

    printf("\nDesativando atuadores...\n\n");
    delay(1500);
    outp(baseport, 0x00);    //trava atuadores
}

printf("\nSaindo do programa...\n\n");
delay(1500);

return 0;
}

```