

FÁBIO SEITI AGUCHIKU
FILIPE VIEIRA MENDES DOS SANTOS

Desenvolvimento de Bancada de Simulação Cardiovascular

São Paulo
2013

FÁBIO SEITI AGUCHIKU
FILIPE VIEIRA MENDES DOS SANTOS

Desenvolvimento de Bancada de Simulação Cardiovascular

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como Trabalho de Formatura.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

São Paulo
2013

FÁBIO SEITI AGUCHIKU
FILIPE VIEIRA MENDES DOS SANTOS

Desenvolvimento de Bancada de Simulação Cardiovascular

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como Trabalho de Formatura.

Área de Concentração: Engenharia
Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

São Paulo
2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Aguchiku, Fábio Seiti

**Desenvolvimento de bancada de simulação cardiovascular/
F.S. Aguchiku, F.V.M. dos Santos. -- São Paulo, 2013.
115 p.**

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

**1.Sistema cardiovascular 2.Bombas hidráulicas 3.Motores
elétricos I.Santos, Filipe Vieira Mendes dos II.Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.**

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Dr. Oswaldo Horikawa pela orientação para o desenvolvimento desse projeto. Aos pesquisadores do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia, em especial a Jeison Fonseca e a Aron Andrade, pelo apoio e suporte dados ao projeto.

RESUMO

Dispositivos de assistência à circulação, comumente chamados de coração artificial, são importantes recursos utilizados para dar sobrevida a pacientes com doenças ligadas ao sistema cardiovascular. Porém, antes de serem usados em pacientes, estes dispositivos precisam passar por rigorosos testes em bancada. Para tanto, são utilizados simuladores do sistema circulatório que são equipamentos que permitem emular as reais condições de escoamento do sistema circulatório, possibilitando a realização de testes de forma simples e econômica. Este trabalho tem como primeiro objetivo concluir o desenvolvimento do sistema mecânico do simulador. Isto feito, serão especificados, projetados e implementados os elementos necessários para o controle da bomba pulsátil. Por fim, será realizado um teste de funcionamento com a implementação de um controle que visa regular a rotação do motor de acionamento da bomba pulsátil de modo a se obter um padrão desejado de variação da pressão durante cada ciclo de pulsação. Os resultados destes testes serão analisados de modo a se validar os modelos desenvolvidos para o simulador. Os resultados servirão de suporte para um futuro trabalho de controle efetivo da bancada, ou seja, o controle simultâneo de duas variáveis, a pressão e vazão, do líquido em circulação, controle este que não é possível na bancada atual.

Palavras-chave: Sistema de simulação cardiovascular, Controle de motor, Controle de bomba, Bomba pulsátil.

ABSTRACT

Circulation assist device, commonly called artificial heart, are an important resource used to provide life support to patients with cardiovascular illness. But, before those devices are used in patients, they must undergo rigorous testing. Thereto, it is used a mock circulatory system, an equipment that allows the emulation of the real flow conditions of the circulatory system, enabling tests in a simpler and more economical way. This work has as its primary objective to conclude the development of the mechanical system of the simulator. After that, it will be specified, designed and implemented the necessary elements for the control of the pulsatile pump. Finally, it will be performed an operational test with the implementation of a controller that aims regulating the rotation of the motor that drives the pulsatile pump, so that a desired pressure variation is accomplished at each pulsatile cycle. The results of these tests will be analyzed to validate the model of the simulator. The results will support a future development of an effective controller for the mock system, in other words, a simultaneous control of two variables, pressure and flow of the flowing liquid, a control that is not possible with the current mock system.

Keywords: Mock Circulatory System, Motor control, Pump Control, Pulsatile Pump

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização de um mecanismo biela-manivela.....	25
Figura 2 - Gráfico da Eq. (1) para $l/r=4$	27
Figura 3- Esquematização da montagem.....	28
Figura 4 - Esquema do Circuito Hidráulico.....	33
Figura 5- Circuito eletrônico dos sensores de pressão.	34
Figura 6 - Curva da calibração do sensor de pressão 1, gerado em Excel.....	35
Figura 7 - Curva da calibração do sensor de pressão 2, gerado em Excel.....	36
Figura 8 - Curva da calibração do sensor de pressão, gerado em Excel.....	37
Figura 9- Sinal de Pressão para um valor constante de 0,2V - intervalo de aproximadamente 70mV.	38
Figura 10 - Esquema Elétrico do Sistema de Medição de Posição	39
Figura 11 - Simplificação do circuito de sensoriamento de posição.	40
Figura 12 – Resposta em frequência do filtro de sensor de posição.....	41
Figura 13- Sinal de Posição para um valor constante de 2,3V - intervalo de aproximadamente 120mV.	42
Figura 14 - Curva de calibração do sensor de posição, gerada em Excel.....	43
Figura 15 – Representação da Restrição.....	45
Figura 16 - Reservatório de complacência	46
Figura 17 – Esquema do circuito hidráulico.....	47
Figura 18 - Resposta da pressão para uma variação no nível inicial de coluna de água	50
Figura 19 - Resposta da pressão para uma variação no nível de restrição	51
Figura 20 - Gráficos que mostram o comportamento da circulação sanguínea humana utilizados neste trabalho como base para a confecção da curva de referência.....	60
Figura 21 - Curva de referência de pressão	61
Figura 22 - Bomba e Circuito Hidráulico.....	62
Figura 23 - Figura anterior ampliada.....	63
Figura 24 - Membrana rasgada.....	65

Figura 25 - Detalhe do acoplador com excentricidade entre eixo do motor e eixo de rotação da manivela.....	66
Figura 26 - Detalhes da peça que acopla haste à biela	66
Figura 27 - Detalhes do revestimento da bucha	67
Figura 28 - Motor de limpador de para-brisa	68
Figura 29 - Eixo prolongado do motor e fixação.....	68
Figura 30 - Acoplamento entre o eixo do motor e o prolongamento do eixo.....	69
Figura 31 - Mangueira com e sem restrição	71
Figura 32 - Potenciômetro acoplado à haste do pistão	73
Figura 33 - Circuito eletrônico dos sensores	74
Figura 34 - Sinal de posição sem capacitor	75
Figura 35 - Sinal de Posição com capacitor de 1 μ F.	75
Figura 36 - Canal 1 com tensão de saída, oscilando entre 7,5 e 8,2V e canal 2 com entrada do amplificador.....	79
Figura 37 - Canal 1 com saída de tensão e canal 2 com sinal de posição	79
Figura 38 - Canal 1 com Tensão de Saída, oscilando entre 6 e 8V e Canal 2 com Entrada do Amplificador.....	80
Figura 39 - Canal 1 com Saída de Tensão e Canal 2 com Sinal de Posição.....	80
Figura 40 – Leitura do sensor de pressão na saída da bomba feita com o osciloscópio no teste de variação da coluna de água no reservatório de complacência. Teste realizado com nível baixo da coluna de água.....	82
Figura 41 - Leitura do sensor de pressão na saída da bomba feita com o osciloscópio no teste de variação da coluna de água no reservatório de complacência. Teste realizado com nível alto da coluna de água	82
Figura 42 - Leitura do sensor de pressão na saída da bomba feita com o osciloscópio no teste de variação da restrição na saída do reservatório de complacência. Teste realizado sem restrição	83
Figura 43 - Leitura do sensor de pressão na saída da bomba feita com o osciloscópio no teste de variação da restrição na saída do reservatório de complacência. Teste realizado com a restrição muito apertada.....	84

Figura 44 - Sinais de pressão no interior da câmara (em amarelo) e na saída da bomba (em azul).	85
Figura 45 - Resposta do sistema com o controlador medida com o osciloscópio. As linhas horizontais indicam os níveis de tensão que representam os limites de pressão desejados para o sistema de 80 e 120 mmHg.....	86
Figura 46 - Resposta do sistema depois das alterações no controlador monitorada com o osciloscópio. As linhas horizontais indicam os limites de pressão desejado para o sistema.	88
Figura 47 - Comparação entre sistema em malha aberta, malha fechada e curva de referência do algoritmo.....	90
Figura 48 – Diferença entre referência e resposta obtida	91
Figura 49 - Nova curva de referência, comparada à resposta do sistema em malha aberta	93
Figura 50 - Comparação entre a resposta do sistema sem controle, a nova curva de referência e a resposta do sistema com o controle	94
Figura 51 - Segunda curva de referência proposta	95
Figura 52 - Comparação da segunda curva de referência, do sistema em malha aberta e fechada	95
Figura 53 - Em destaque, perturbação gerada pela válvula de retenção.....	98
Figura 54 - Válvula Esférica cedida pelo Instituto Dante Pazzanese	99
Figura 55- Esquema do circuito eletrônico.....	106

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dimensionamento dos parâmetros	28
Tabela 2- Especificações Técnicas do motor de limpador de para-brisa	29
Tabela 3 - Dados para obtenção de curva de velocidade angular média do motor	30
Tabela 4 - Pontos de calibração do amplificador de potência	31
Tabela 5 – Dados de calibração do sensor de pressão 1	35
Tabela 6 - Dados de calibração do sensor de pressão 2.....	36
Tabela 7 - Dados de calibração do sensor de pressão 3.....	37
Tabela 8 - Resistências medidas com as configurações do modelo.	40
Tabela 9 – Dados de calibração do sensor de posição.....	42
Tabela 10 - Correlação entre os índices e elementos.....	48
Tabela 11 – Dados de calibração do amplificador de potência	78
Tabela 12 – Dados experimentais do teste de variação da coluna de água do reservatório de complacência	82
Tabela 13 - Dados experimentais do teste de variação da restrição na saída do reservatório de complacência	83
Tabela 14 – Tabela de equivalência para nova calibração do sensor de pressão	87
Tabela 15 - Lista de componentes eletrônicos.....	105

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. DESENVOLVIMENTO.....	16
2.1 Objetivos	16
2.2 Simulador Cardiovascular - Estado da arte	16
2.3 Definição de Requisitos	17
2.4 Metodologia de Trabalho	19
2.5 Síntese e Escolha de Soluções.....	20
2.6 Projeto	22
2.6.1 Subsistema de Bombeamento	22
2.6.1.1 Conjunto Câmara e Pistão	23
2.6.1.2 Mecanismo de Acionamento	24
2.6.1.3 Motor	29
2.6.1.4 Amplificador de Potência	31
2.6.2 Circuito Hidráulico	32
2.6.3 Subsistema de Sensoriamento.....	33
2.6.3.1 Sensor de Pressão	34
2.6.3.2 Sensor de Posição do Pistão da Bomba	38
2.6.3.3 Placa A/D-D/A	43
2.6.4 Subsistema de Controle.....	44
2.6.4.1 Modelagem Circuito Hidráulico.....	45
2.6.4.2 Modelagem Motor	52
2.6.4.3 Modelagem Mecanismo	54
2.6.4.4 Considerações Sobre a Modelagem.....	56
2.6.4.5 Teste de Controle do Motor.....	56
2.6.4.6 Algoritmo de Atuação no Motor do Sistema.....	58
2.6.4.7 Curva de Referência	59
2.7 Construção e Implementação	62
2.7.1 Subsistema de Bombeamento	64

2.7.1.1	Conjunto Câmara e Pistão	64
2.7.1.2	Mecanismo de Acionamento	65
2.7.1.3	Motor	67
2.7.1.4	Estrutura e Fixação	69
2.7.2	Subsistema de Simulação.....	69
2.7.2.1	Circuito Hidráulico	69
2.7.3	Subsistema de Aquisição	71
2.7.3.1	Placa A-D/D-A	72
2.7.3.2	Sensores	72
2.7.4	Subsistema de Controle.....	76
2.8	Testes.....	77
2.8.1	Motor.....	77
2.8.2	Circuito Hidráulico	81
2.8.2.1	Análise da Influência do Nível de Coluna de Ar/Água	81
2.8.2.2	Análise da Influência da Restrição	83
2.8.3	Controle.....	84
2.8.3.1	Teste de Atraso na Resposta da Pressão	84
2.8.3.2	Testes de Atuação de Controle sobre o Motor	85
3.	RESULTADOS	89
3.1	Discussões	89
3.2	Proposta de Melhorias.....	96
3.2.1	Amplificador de Potência	96
3.2.2	Outros Componentes Ativos para o Sistema	96
3.2.3	Projeto de Controle	97
3.2.4	Válvulas	98
3.2.5	Reforço do Circuito Hidráulico	99
3.2.6	Sensor de Posição	100
3.2.7	Análise do Arquivo de Texto.....	100
3.2.8	Controle no Tempo	100
4.	CONCLUSÕES	101
4.1	Trabalhos futuros.....	102

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
APÊNDICE A – LISTA DE COMPONENTES DO CIRCUITO ELETRÔNICO.....	105
APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE DO ALGORITMO DE ATUAÇÃO SOBRE A VELOCIDADE DO MOTOR	107

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a *World Health Organization*, doenças ligadas ao sistema cardiovascular são uma das principais causas de morte no mundo inteiro tendo levado a cerca de 17 milhões de mortes em 2008. Para muitas dessas doenças, principalmente as relacionadas com insuficiência cardíaca, o transplante de coração normalmente é a única opção viável. A fragilidade dos pacientes somadas com as dificuldades de se encontrar um órgão para ser transplantado e de se realizar o transplante faz com que pacientes morram durante a espera.

Nesse contexto, muitos dispositivos mecânicos de auxílio à circulação são criados com o objetivo de dar sobrevida e melhor qualidade de vida aos pacientes enquanto eles esperam pelo transplante. Porém, estes dispositivos precisam passar por testes rigorosos para avaliar a sua eficiência e seus efeitos sobre a circulação sanguínea antes de efetivamente serem usados nos pacientes. Devido ao grande risco de falha, esses testes não podem ser feitos diretamente em humanos e o teste em outros animais, chamados de testes *in vivo*, são muito trabalhosos e muito custosos, além de envolverem uma série de questões éticas.

Para resolver esse problema, são criados sistemas artificiais que simulam a circulação sanguínea, permitindo testar mais facilmente os dispositivos. Mas para que os testes sejam realmente eficientes, eles devem ser feitos em condições de escoamento muito próximas das reais e, por isso, é importante conhecer o comportamento de cada componente e estudar qual a influência de cada um na resposta do sistema.

O objetivo deste trabalho é iniciar o desenvolvimento de uma bancada de simulação cardiovascular, estudando alguns de seus componentes para avaliar qual a influência de cada um deles no comportamento do sistema. Este projeto deve fornecer um conjunto de informações iniciais relevantes sobre aspectos construtivos do sistema de simulação cardiovascular e sobre a implementação de seu sistema de sensoriamento e controle.

Neste projeto também é desenvolvido um protótipo inicial com alguns dos componentes de um sistema de simulação cardiovascular. Nesse protótipo é analisado o comportamento dos

componentes em condições reais de operação e são feitos testes para observar o comportamento do sistema quando realizadas algumas ações de controle sobre o motor de acionamento da bomba do sistema.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Objetivos

O propósito principal deste trabalho é o de realizar os primeiros passos para o desenvolvimento de uma bancada para simulação cardiovascular. No desenvolvimento de projetos deste tipo, os aspectos que inicialmente tem maior relevância são os detalhes construtivos de seus componentes e qual é a influência deles na resposta do sistema para que se possa projetar com eficiência um sistema de controle que garanta que o sistema tenha a resposta desejada. Para que um simulador cardiovascular exerça plenamente as suas funções, requer o controle simultâneo de duas variáveis relacionadas ao fluido de trabalho: a pressão e a vazão. Tal controle, conforme será comentado adiante, não é possível na configuração adotada neste trabalho. O controle completo requer a existência de outro elemento ativo no circuito hidráulico e isto será objeto de trabalhos futuros. Neste trabalho serão reunidas as informações iniciais relevantes para embasar o desenvolvimento completo do sistema de simulação cardiovascular em trabalhos futuros.

O projeto se inicia com o levantamento de informações teóricas e práticas úteis para o projeto que serão usadas para a construção de um protótipo inicial de um sistema físico de simulação cardiovascular que ficará a disposição do professor orientador e da escola ao fim do projeto.

Como resultados deste projeto espera-se um protótipo inicial com alguns dos componentes do sistema de simulação cardiovascular. Além disso, outro resultado importante é fornecer informações que possam contribuir para o projeto do sistema de controle e sensoramento e também para o projeto da bancada de simulação cardiovascular de um modo geral, para que trabalhos futuros possam aperfeiçoar o sistema e desenvolver projetos mais complexos.

2.2 Simulador Cardiovascular - Estado da arte

Alguns pesquisadores de partes diferentes do mundo já desenvolvem projetos de sistemas de simulação cardiovascular. Fonseca, et al. (2012) do *Instituto de Cardiologia Dante Pazzanese* desenvolveram um sistema de circulação para testes de dispositivos de assistência ventricular. O mecanismo da bomba consiste em um motor DC *brushless* ligado a um fuso que faz a conversão

do movimento rotativo do motor em linear, o fuso puxa e empurra uma placa, realizando o bombeamento. A interface entre a placa e o fluido é feita por uma membrana de poliuretano. O sistema também tem um módulo de simulação numérica que controla parâmetro da circulação sanguínea.

Timms, et al. (2011), pesquisadores da *RWTH Aachen University* e da *Queensland University of Technology*, desenvolveram um sistema compacto de simulação que integra um módulo de simulação numérica. O sistema reproduz o fluxo sanguíneo utilizando reguladores eletropneumáticos da pressão do ar e válvulas comandadas por solenoides. O controle de todo o sistema é feito por simulação numérica.

Alazmani, et al. (2012), pesquisadores da *University of Leeds*, desenvolveram um sistema de simulação numérico que comanda um coração mecânico feito utilizando motores lineares eletromagnéticos de alta potência. Todo o processamento da simulação é feito numericamente e os resultados gerados são reproduzidos pelo coração mecânico.

Pantalos, et al. (2002), pesquisadores da *University of Louisville* desenvolveram um sistema de simulação que utiliza uma bomba com um balão pneumático. A bomba consiste em uma câmara de pressurização onde há um balão polimérico, pulsos de ar comprimido são enviados ao balão que, ao se encher, bombeia o fluido de trabalho para fora da câmara de pressurização.

Esses são os principais trabalhos que formaram o panorama deste trabalho, permitindo a geração das especificações e dos requisitos utilizados.

2.3 Definição de Requisitos

Como se trata de um sistema de simulação, os requisitos do sistema são definidos pelo sistema real que se deseja imitar, neste caso, o sistema circulatório humano. Portanto, foi definido como requisito que a bomba projetada para o protótipo deve gerar um escoamento de fluido igual ao gerado pelo lado esquerdo do coração. A escolha entre o lado esquerdo e o direito é, em um primeiro momento, arbitrária, pois não altera as características construtivas da bomba, apenas as

condições de operação. Escolhendo o lado esquerdo, será simulada então a saída do sangue para o corpo, através da ejeção de sangue do ventrículo esquerdo, representado pela bomba em nosso modelo, passando pela aorta, representada pela saída da bomba.

Na literatura de fisiologia existem diversos diagramas de “pressão x volume” e “pressão x tempo” que descrevem o funcionamento do coração em diversas situações. Sistemas de simulação cardiovascular devem conseguir que a saída do sistema seja mais fiel possível às condições de escoamento do sistema circulatório humano, representada por esses diagramas.

O sistema desenvolvido neste trabalho é simplificado em relação a sistemas completos de simulação, pois ele conta apenas com a bomba como componente ativo em que é possível fazer atuações de controle e, por isso, não tem condições de emular com exatidão a circulação sanguínea humana. Este trabalho pretende iniciar o desenvolvimento de um sistema de simulação cardiovascular e, mesmo sabendo que ainda não é um sistema completo, é importante saber qual a resposta que um sistema completo deve ter para avaliar o que está funcionando e o que não está neste início de desenvolvimento e por isso serão usadas curvas que descrevem o comportamento real da circulação sanguínea para discutir os resultados deste trabalho.

Foram considerados alguns parâmetros para tornar o sistema ainda mais próximo do sistema circulatório real, definindo que a bomba do protótipo não deve permitir a recirculação de fluido e que não pode ser totalmente rígida, devendo permitir certo grau de flexibilidade para assemelhá-la ao coração real.

Baseado nos trabalhos citados acima, referentes a simuladores cardiovasculares, espera-se que o sistema apresente capacidade para bombeamento de 62,5mL de fluido por ciclo de pulsação, atingindo uma pressão de até 180mmHg no pico de pulsação.

Este trabalho se insere dentro de um projeto de desenvolvimento maior cujo objetivo final é a de desenvolver um simulador no qual se exerce controle em tempo real sobre diversos elementos do circuito hidráulico para se obter um perfil cíclico de oscilação desejado, tanto da pressão como de vazão. Entretanto, a configuração de circuito hidráulico aqui adotada possibilita a

regulação somente da tensão aplicada sobre o motor que aciona a bomba pulsátil. Portanto, o circuito hidráulico aqui implementado não permitirá ainda o controle pleno da pressão e da vazão. É intenção desenvolver em trabalho à parte, uma válvula de regulação de fluxo de controle eletrônico. Com a inclusão deste novo elemento será possível o mencionado controle pleno.

Este trabalho, além de concluir o desenvolvimento do sistema mecânico do simulador, terá como objetivo especificar e implementar os elementos necessários para o controle somente do motor elétrico que aciona a bomba pulsátil. O sistema de controle será testado através de algoritmos que visa obter um perfil desejado de variação de pressão em cada ciclo de pulsação.

2.4 Metodologia de Trabalho

A revisão bibliográfica deste projeto seguiu a direção do estudo da bancada de simulação cardiovascular para possibilitar o levantamento dos requisitos necessários para o desenvolvimento do projeto, além disso, esses trabalhos tratam de aspectos construtivos relevantes a este trabalho.

Para organizar melhor o seu desenvolvimento, o projeto foi segmentado em três subsistemas: mecânico, de aquisição e de simulação. O projeto do subsistema mecânico foi desenvolvido em conjunto com o professor orientador, Prof. Dr. Oswaldo Horikawa. Estes elementos foram projetados com base na revisão bibliográfica e são o mecanismo de acionamento (tipo e dimensões), motor e a câmara onde o fluido seria bombeado. O Prof. Dr. Oswaldo Horikawa conduziu a fabricação dos componentes.

Inicialmente, o projeto dos três subsistemas seria desenvolvido antes de começar a construção e implementação das soluções, porém assim que as soluções foram escolhidas, iniciou-se sua implementação. Isto gerou uma agilidade maior ao projeto e diminuiu os riscos causados por erros de projeto, pois quanto antes fossem notados os erros a partir da implementação, as correções seriam menos prejudiciais ao projeto como um todo. Seguindo esta ideia, foram projetados e implementados os subsistemas de aquisição e de simulação.

Com a parte física montada, testes foram conduzidos de modo a levantar mais informações a respeito do sistema (principalmente da planta) e verificar como os componentes do sistema se comportam com o sistema em operação. Também foram realizados testes para avaliar o efeito que atuações de controle no motor da bomba têm sobre a resposta do sistema.

Estes testes têm o objetivo de verificar se as formulações teóricas desenvolvidas para o projeto estão corretas e podem ser observadas no funcionamento real do sistema e também para se obter mais informações sobre o funcionamento dos componentes de forma empírica. A avaliação do projeto é feita de modo qualitativo com base na avaliação dos resultados obtidos.

Por fim, é feita a avaliação do projeto como um todo, analisando as decisões tomadas e como elas afetam o projeto, gerando material para que este sistema possa ser aperfeiçoado em trabalhos futuros.

2.5 Síntese e Escolha de Soluções

Como ponto inicial, foi necessário escolher qual arquitetura seria utilizada neste projeto. Um sistema de simulação cardiovascular pode ter diversas configurações possíveis e, por isso, a escolha da arquitetura da utilizada é muito importante pois ela determina quais os componentes que estarão presentes e quais as atuações que podem ser feitas sobre o sistema.

Consultando a bibliografia, foram escolhidas quatro configurações possíveis para um sistema de simulação cardiovascular:

- Um sistema completamente numérico, como o utilizado por Alazmani, et al. (2012).
- Um sistema físico e numérico, como o utilizado por Timms, et al. (2011).
- Um sistema físico que utiliza um sistema pneumático de bombeamento, utilizado por Pantalos, et al. (2002).
- Um sistema físico que utiliza um motor DC ligado a um mecanismo de bombeamento, como o utilizado por Fonseca, et al. (2012).

A escolha da solução foi feita por meio de uma análise de cada solução para apurar qual delas atendia melhor aos requisitos de projeto.

A arquitetura utilizada por Alazmani, et al. (2012) consiste em um sistema completamente numérico de simulação e, por isso, ele não é interessante para o projeto. Como há a intenção de desenvolver uma bancada de testes para dispositivos reais, é necessário que haja um escoamento real de fluido para que os testes sejam realizados. Além disso, em alguns casos a programação da simulação numérica pode exigir que se tenha conhecimento total do escoamento, o que não acontece sempre em bancadas de teste que muitas vezes tem o objetivo de entender como o escoamento vai acontecer.

Pelo mesmo motivo, a arquitetura de Timms, et al. (2011) não é conveniente. O sistema de bombeamento é controlado pelo módulo de simulação numérica e, assim, seriam enfrentados os mesmos problemas já descritos no caso acima.

Pantalos, et al. (2002) utilizam um sistema pneumático de bombeamento. Um sistema pneumático tem muitas restrições no controle, não permitindo muitas variações em seu funcionamento e, assim, não permitiria variar o tipo de escoamento gerado pela bomba o que poderia restringir muito os testes que seriam realizados na bancada.

Um sistema de simulação físico era necessário para realizar os teste com dispositivos de assistência à circulação e, por isso, dentre as soluções apresentadas neste trabalho a arquitetura utilizada por Fonseca, et al. (2012) é a mais apropriada. O uso do acionamento com um motor elétrico permite uma maior variação no escoamento da bomba, tornando o sistema mais apropriado. Além disso, o corpo de desenvolvimento do projeto possui maior afinidade com o controle desse tipo de dispositivo.

Outro fator que foi muito importante para a escolha dessa arquitetura foi de que os pesquisadores que a utilizam são do *Instituto de Cardiologia Dante Pazzanese* com o qual a nossa instituição

mantém um convênio de pesquisa. Dessa forma houve contato direto com eles permitindo que houvesse contribuição deles no desenvolvimento do projeto.

Outro trabalho que foi utilizado como referência para o desenvolvimento deste projeto é o sistema de simulação desenvolvido por Zannoli, et al. (2008). Eles desenvolvem um sistema de simulação físico que utiliza uma bomba com formato de seringa com uma câmara elástica externa para garantir que o comportamento da pressão fique mais próximo do funcionamento do coração.

Assim como Fonseca, et al (2012), Zannoli, et al (2008) também utiliza um motor acionando um mecanismo de bombeamento em seu sistema de simulação e, devido a essas semelhanças, características construtivas dos dois projetos puderam ser aproveitadas no desenvolvimento deste projeto.

2.6 Projeto

O projeto da bancada de simulação pode ser dividido em três subsistemas: de bombeamento, de simulação e de controle e sensoramento.

Como este é um projeto que ficará a disposição da escola e do professor orientador, procurou-se, na medida do possível, utilizar equipamentos e componentes que o professor orientador conheça e esteja acostumado, para facilitar operações e futuras alterações no sistema de simulação.

2.6.1 Subsistema de Bombeamento

Este subsistema é responsável por fazer o bombeamento do fluido. Para isso, possui os seguintes componentes: conjunto câmara e pistão; mecanismo de acionamento; motor e amplificador de potência.

A seguir, será apresentado o projeto de cada um destes componentes.

2.6.1.1 Conjunto Câmara e Pistão

O ponto de partida no projeto da bomba foi a escolha da geometria da estrutura por onde o fluido escoaria. Com base na pesquisa bibliográfica, foram consideradas duas possíveis soluções para a geometria da bomba:

- A bomba utilizada por Fonseca, et al. (2012) – um pistão que aciona um diafragma através de uma chapa quadrada, fazendo assim o bombeamento numa câmara;
- A bomba utilizada por Zannoli, et al. (2008) – semelhante a uma seringa.

Optou-se por mesclar as soluções. Foi projetada uma bomba composta por uma câmara, um pistão e uma membrana que liga os dois.

A membrana permite que a câmara da bomba tenha um comportamento elástico, semelhante ao do coração real, além de não exigir uma precisão muito grande no ajuste entre a câmara e o pistão, como seria no caso da seringa.

Foi escolhida uma geometria cilíndrica para a bomba (tanto para o pistão quanto para a câmara) como a utilizada por Zannoli, et al. (2008), visando uma maior simplicidade em sua construção, nos cálculos do volume deslocado e para tentar reduzir os danos à membrana na região em que esta membrana é presa à câmara.

Com base na pesquisa realizada e em conversas com os pesquisadores do Instituto Dante Pazzanese, chegou-se à conclusão de que as dimensões destes componentes não seriam um fator crítico ao funcionamento do sistema, sendo necessário apenas ser suficiente para o requisito de fluido bombeado por pulso – 62,5mL. Então, pensando em não ocupar muito espaço além do necessário, foram adotados os seguintes diâmetros:

- Pistão: 65,15mm
- Câmara: 85,30mm

Os comprimentos destes componentes foram dimensionados com apenas uma restrição, novamente de que o volume de trabalho deve ser coerente com a quantidade de fluido bombeado por pulso. Para obter um projeto mais compacto e levando em conta as peças que estavam disponíveis para serem usadas, estimaram-se os seguintes comprimentos:

- Pistão: 21mm
- Câmara: 55mm

Junto da câmara, estão as válvulas de retenção que controlam o sentido de escoamento. O diâmetro destas válvulas (e consequentemente da saída e entrada da bomba) é de 25mm, compatível com o diâmetro da artéria aorta de um adulto.

As válvulas foram colocadas na entrada e na saída da câmara de bombeamento, para garantir que o fluxo de bombeamento seja unidirecional. Além disso, a câmara terá mais dois furos: um na região inferior da câmara para drenagem de fluido ao final dos testes e um na região superior para retirada de todo ar dentro da câmara no início do funcionamento e tomada de pressão em seu interior, caso necessário.

2.6.1.2 Mecanismo de Acionamento

Para desenvolver o mecanismo que transforma o movimento rotativo do motor em linear do pistão foram considerados dois arranjos: um mecanismo do tipo biela-manivela e um acionamento por parafuso. Para fazer a escolha foram confrontadas as duas soluções, discutindo as vantagens de uma em relação à outra.

O mecanismo de biela-manivela permite uma relação de 1:1 entre a rotação do motor e o número de ciclos do mecanismo, sendo possível a utilização de um motor menos potente, visto que há restrições na redução que pode ser feita. Este mecanismo não apresenta inversões no sentido de rotação, logo o controle não terá que se preocupar com este fator, o amplificador de potência pode ser menos complexo e problemas como diferenças comportamentais do motor dependentes do sentido de rotação podem ser evitadas. Por fim, este mecanismo apresenta limitação no

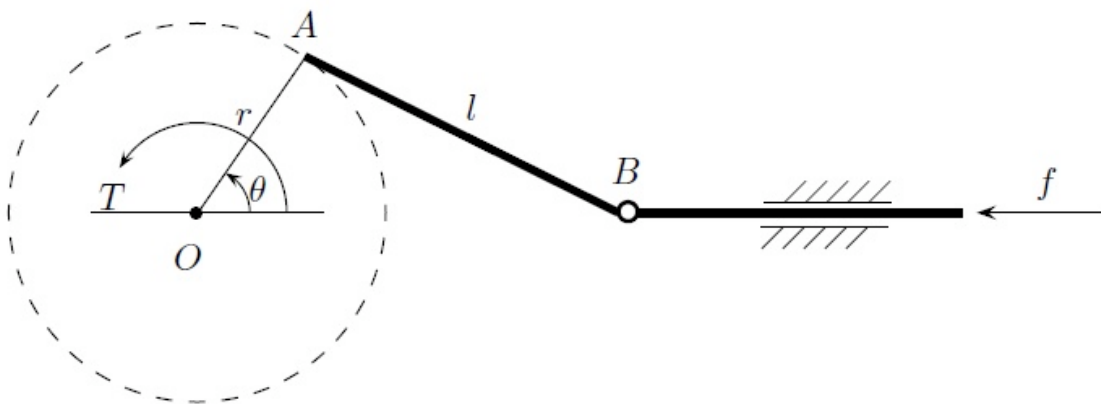
deslocamento linear, o que pode ser usado para garantir repetibilidade do mecanismo e deixar o controle e/ou o sensoriamento menos complexos, pois não haveria necessidade verificar se o mecanismo excedeu os limites de posição.

O acionamento por parafuso ocupa menos espaço e sua construção e implementação podem ser mais simples, por apresentar menos elementos a serem dimensionados. A sua maior vantagem é de que este mecanismo permite a aplicação de uma aceleração controlada, o que pode proporcionar uma maior quantidade de configurações, possui uma relação linear entre posições angular e linear e teoricamente não possui posições com singularidade.

Como em nosso projeto espaço não é um fator limitante e nosso objetivo inicialmente é apenas simular um ventrículo saudável, com no máximo uma configuração de hipertensão, escolhemos o mecanismo de biela-manivela, principalmente por exigir recursos mais simples. Além disso, apesar da alta não linearidade do mecanismo, espera-se que para a curva que se deseja obter, o controle seja tão complexo quanto o que seria necessário para o acionamento por parafuso.

Para dimensionar este mecanismo, utilizou-se o esquema mostrado na Fig. 1.

Figura 1 - Esquemática de um mecanismo biela-manivela



O raio r determinará o curso do pistão. Ele é calculado dividindo-se o volume deslocado por pulso pela área do pistão. Lembrando que o curso do pistão é correspondente ao diâmetro da circunferência, estimou-se um valor de $r = 15,0\text{mm}$. Decidiu-se que este raio (manivela) não será

implementado através de uma haste, a manivela será obtida através de um acoplamento excêntrico ao motor (ou a estrutura ligada ao motor).

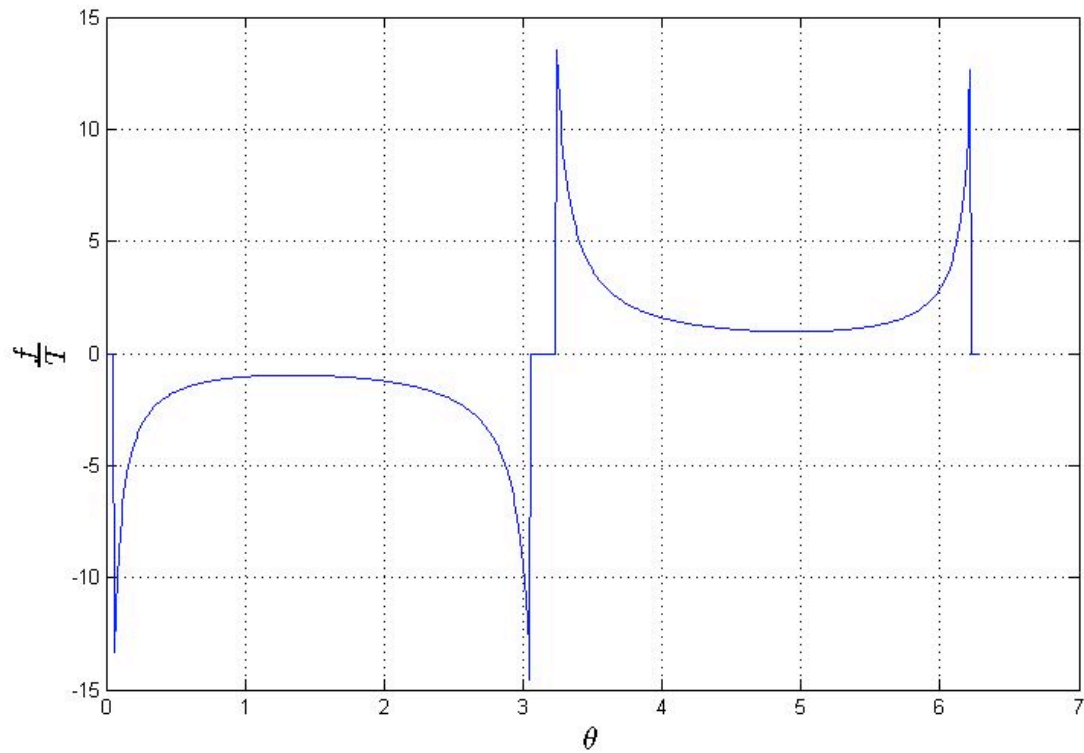
Neste trabalho, segue-se a seguinte convenção: quando o pistão está em sua posição mais avançada (mais perto da câmara) o ângulo θ será 0 e quando estiver em sua posição mais recolhida (mais afastado da câmara) o ângulo θ será π . Os ângulos irão variar de $-\pi$ a π .

O comprimento l aparentemente não influencia no volume deslocado, porém o comportamento da força transmitida para o pistão é significativamente influenciada por este comprimento e, consequentemente, a pressão na câmara também será afetada por este comprimento.

Aplicando trabalho virtual para o mecanismo, considerando apenas os esforços da Fig.1, utilizando a relação geométrica entre o deslocamento de θ e do ponto B, chega-se a relação mostrada pela Eq. (1).

$$\frac{f}{T} = - \frac{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}}{\frac{r}{2} \sin(2\theta) + (\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}) \sin(\theta)} \quad (1)$$

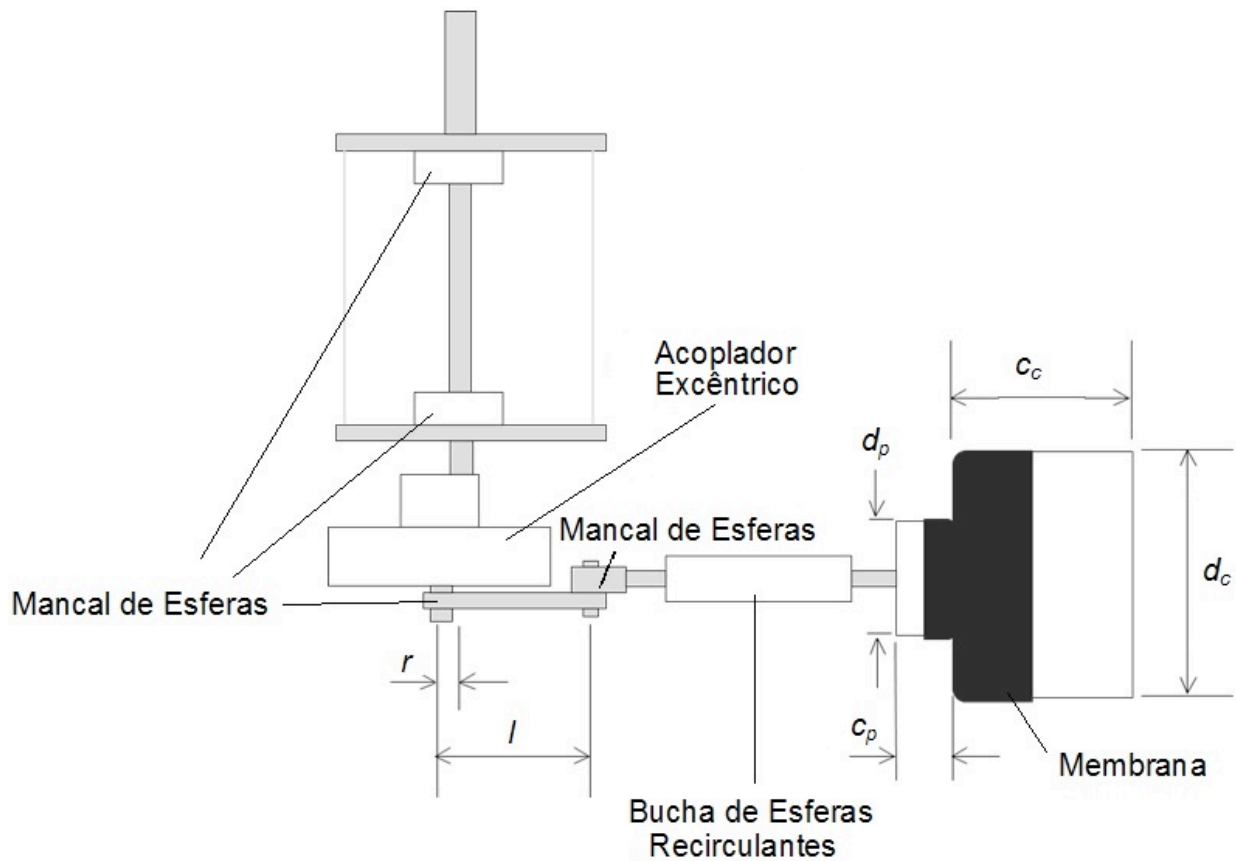
Utilizando o MATLAB, foram feitas simulações variando a relação l/r . Estimou-se, observando a inclinação da curva, que uma relação entre 3 e 5 fariam com que o mecanismo causasse o resultado desejado. Logo especificou-se que o comprimento l ficasse entre 4,5 e 7,5mm. Foi construída uma peça com dimensão de 54,4mm, ou seja, uma relação de 3,6. A Fig. 2 apresenta o gráfico da Eq. (1) a relação de 4,0.

Figura 2 - Gráfico da Eq. (1) para $l/r=4$ 

O gráfico foi alterado, pois para valores de θ múltiplos de π , a curva tende ao infinito pois nesta configuração há transmissão total de força, sendo que qualquer deslocamento gera esta força nesta posição. Como se deseja apenas estudar o comportamento da curva (inclinação) limitou-se o gráfico a um valor máximo de 15.

A Fig.3 apresenta um esboço do conjunto mecânico.

Figura 3- Esquematização da montagem.



Para resumir, a Tab. 1 apresenta as dimensões projetadas.

Tabela 1 - Dimensionamento dos parâmetros

Parâmetro	Dimensão (mm)
Raio manivela (r)	15
Comprimento biela (l)	54,4
Diâmetro pistão (d_p)	65,15
Comprimento pistão (c_p)	21
Diâmetro câmara (d_c)	85,30
Comprimento câmara (c_c)	55

Utilizando os mancais de esferas e da bucha de esferas recirculantes espera-se garantir que a movimentação do sistema não apresente movimentos indesejados.

As peças de cor cinza no esquema devem ser feitas de material metálico devido ao esforço que serão submetidos. As de cor branca podem ser feitas de material polimérico e a preta (a membrana) de material flexível.

2.6.1.3 Motor

Com a pressão já determinada, pode-se determinar qual a força que o pistão terá que exercer. Como não se sabe ao certo qual área terá maior influencia neste bombeamento, foram estimados 3 valores de área: a área do pistão, a da câmara e um área média entre as duas. Estimando a força para a pressão de 120mmHg (10^5 Pa equivale a 760mmHg aproximadamente), obteve-se as seguintes forças:

- $F_{pistão} = 4,95kgf = 49,5N$
- $F_{câmara} = 9,32kgf = 93,2N$
- $F_{média} = 7,14kgf = 71,4N$

Levando em conta estes valores, um motor que estava disponível no laboratório foi testado. Trata-se de um motor de limpador de para-brisa. A única especificação que foi encontrada deste motor é sua corrente máxima de 5A, que está em sua carcaça. Buscando por catálogos, foi possível estimar as especificações técnicas deste motor, que são mostradas na Tab. 2.

Tabela 2- Especificações Técnicas do motor de limpador de para-brisa

Característica	Valor Estimado
Tensão de Alimentação	12V
Corrente Máxima	5A
Torque Máximo	7 – 25Nm
Rotação Máxima	80 – 100rpm

Testes feitos comprovaram que o motor tem potência suficiente para bombear o fluido com velocidade aceitável e possui atraso desprezível para este trabalho em sua resposta devido a uma alteração em sua alimentação, logo foi o motor adotado.

O acionamento do motor é feito com um amplificador de potência alimentado com uma tensão de 12V, controlado por uma placa A/D-D/A (explicada com mais detalhes adiante).

Foi feita uma análise da velocidade do motor em função da tensão de alimentação em vazio. Variou-se a tensão de alimentação do motor e mediu-se o tempo em que este demorava a completar um determinado número de voltas, sendo possível estimar sua velocidade. A Tab. 3 apresenta os dados obtidos.

Tabela 3 - Dados para obtenção de curva de velocidade angular média do motor

Tensão(V)	Velocidade(rad/s)
4,91	1,8
6,02	2,2
7	2,7
8,07	3,2
8,98	3,7
9,98	4,3
11,15	4,9
12,04	5,5

Utilizando regressão linear, foi obtida a curva mostrada na Eq. (2).

$$\omega(V) = 0,5144V - 0,8469 \quad (2)$$

Colocando carga no motor (adicionando fluido ao circuito hidráulico e aumentando a resistência do circuito) e alimentando o motor com uma fonte de bancada que não impõe limitação de corrente ao motor, percebeu-se que, nessas condições, a velocidade do motor é pouco afetada pela carga.

2.6.1.4 Amplificador de Potência

O amplificador de potência tem como especificação um ganho de tensão nominal de 10 vezes e limitação na corrente de saída de 3A.

Sua alimentação nominal máxima é de 12V, sendo necessária uma alimentação simétrica de $+V$ e $-V$, onde V representa a tensão de alimentação. Este projeto utiliza a tensão de 12V, correspondente à tensão do motor. Esta tensão é fornecida por uma fonte de bancada regulável.

Para melhor compreender este amplificador, levantou-se uma curva experimental entre tensões de entrada e saída, sem nenhuma carga ligada ao amplificador. Esta curva foi levantada ajustando uma tensão na entrada do amplificador utilizando o conversor A-D/D-A e medindo a tensão na saída do amplificador com um multímetro. A tensão de entrada também foi verificada com um multímetro.

Tabela 4 - Pontos de calibração do amplificador de potência

Entrada(V)	Saída(V)
0,098	0,893
0,198	1,792
0,298	2,694
0,398	3,593
0,447	4,02
0,598	5,38
0,747	6,72
0,947	8,53
0,998	8,99
1,047	9,43
1,147	10,34
1,198	10,78

Fazendo regressão linear destes pontos, chega-se a um ganho de tensão de nove vezes para o amplificador.

2.6.2 Subsistema de Simulação

Este subsistema consiste no circuito hidráulico desenvolvido para realizar testes da bomba, que servem para avaliar seu desempenho e melhorar seu projeto. Para isso, este circuito deve modelar na medida do possível os componentes mais próximos à região de ejeção de sangue no corpo humano, que seria a artéria aorta, por onde passa o sangue logo após ser bombeado, sendo justamente a região de interesse deste trabalho.

2.6.2.1 Circuito Hidráulico

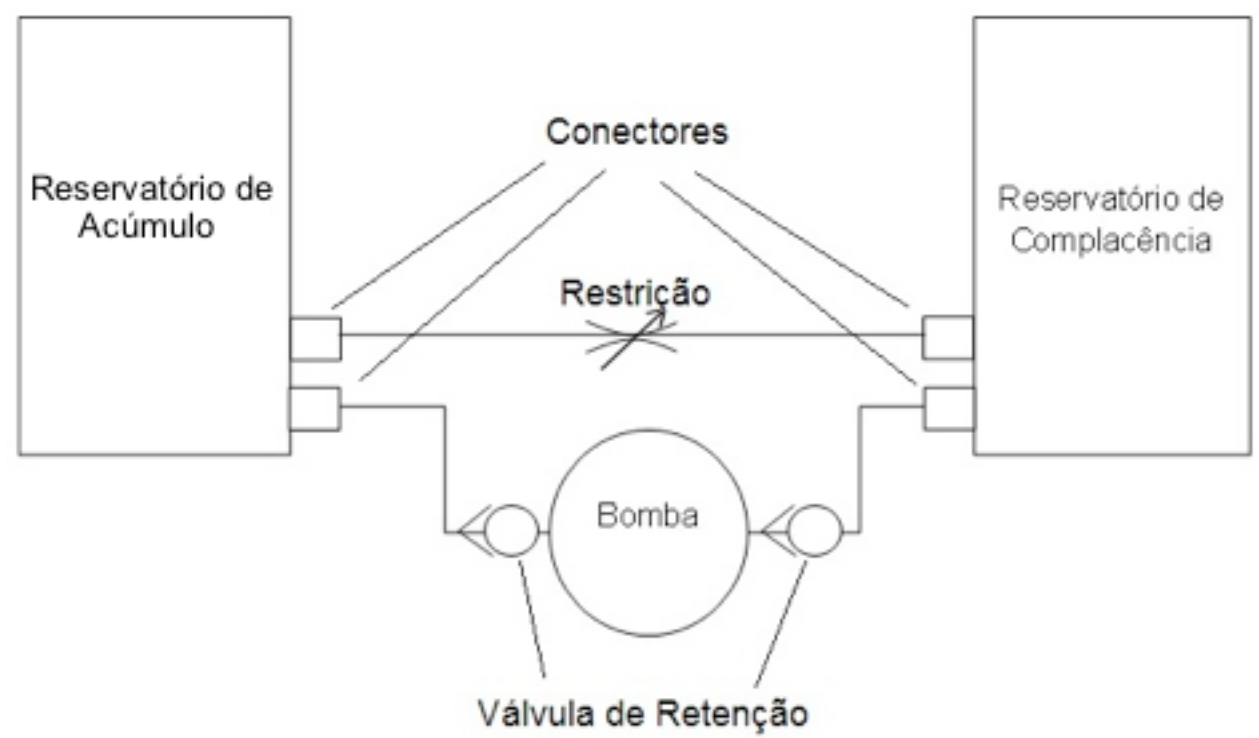
O projeto deste circuito foi feito de modo a obter um circuito que seja operável e permita realizar os testes desejados. Tendo como base o trabalho de Fonseca, et al. (2012), foram determinados e dimensionados os componentes do circuito e, em conjunto com o professor orientador, foram acertados os detalhes construtivos dos componentes. O professor orientador conduziu a fabricação dos componentes.

De maneira geral, o circuito consiste de dois reservatórios, uma bomba e tubos e mangueiras que conectam estes elementos, sendo que há uma restrição mecânica numa dessas conexões (a que liga os dois reservatórios). Os reservatórios possuem finalidades diferentes: um para o acúmulo de fluido e outro para modelar uma complacência. O reservatório de acúmulo tem como finalidade acumular fluido (à pressão atmosférica) e alimentar a bomba. O reservatório de complacência simula a elasticidade dos vasos sanguíneos subsequentes ao coração; a pressão neste reservatório deve ser controlada para obter a pressão desejada na bomba. Há uma restrição entre os dois reservatórios que simula a resistência mecânica dos vasos e que permite um ajuste de carga entre ambos. Esta restrição é feita utilizando dois parafusos prendendo duas chapas em volta de uma mangueira (conexão flexível); assim conforme esses parafusos são apertados, as chapas estrangulam a mangueira, criando a restrição desejada.

Para dimensionar o diâmetro das mangueiras e conectores que conectam o circuito, tomou-se o cuidado de não haver grandes diferenças entre os diâmetros, para o escoamento ser o mais próximo do laminar e reduzir as perdas de carga devido a singularidades, por isso foi adotado um diâmetro próximo ao da válvula, de 25mm. Também procurou-se limitar os comprimentos destas conexões para reduzir perdas de carga distribuídas, logo este comprimento é da ordem do comprimento dos elementos do subsistema de bombeamento.

A Fig. 4 apresenta um esquema ilustrativo deste circuito hidráulico.

Figura 4 - Esquema do Circuito Hidráulico.



2.6.3 Subsistema de Sensoriamento

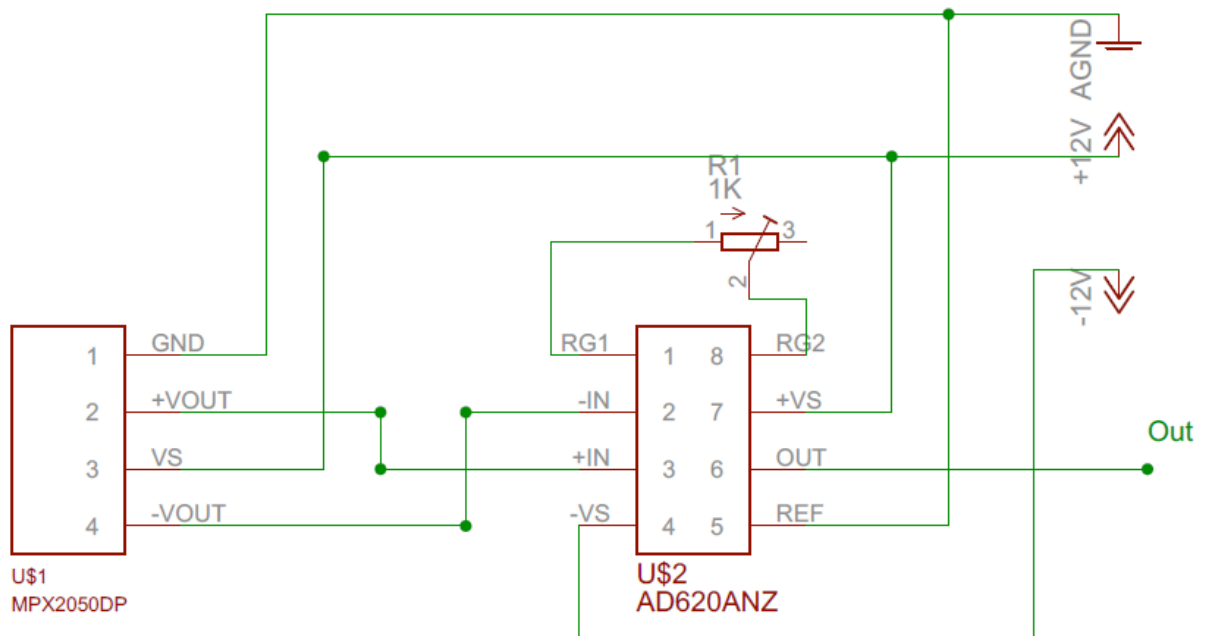
Este subsistema é responsável pela aquisição dos sinais de monitoração do sistema. Estes dados são tratados e então utilizados em algum algoritmo de atuação sobre o sistema e para gerar gráficos da resposta do sistema para avaliação de resultados.

Os principais componentes deste subsistema são os sensores utilizados, seus respectivos circuitos, e a placa A/D-D/A que faz a aquisição de dados.

2.6.3.1 Sensor de Pressão

Devido às especificações do projeto, decidiu-se monitorar dois tipos de sinais: pressão e volume. A pressão é monitorada no interior da bomba e em sua saída (após a válvula de retenção). O sensor utilizado é o MPX2050DP, que conta com entrada de pressão e saída diferenciais. As entradas de pressão serão alimentadas com a pressão que se deseja medir na entrada de pressão e com pressão atmosférica na entrada de vácuo. Como sua sensibilidade é muito baixa (08mV/kPa), é utilizado também um amplificador instrumental, o AD620ANZ, que permite um ganho regulável através de uma resistência elétrica. Para regular este ganho, é utilizado um trimpot. A Fig. 5 apresenta um esquema elétrico destes componentes.

Figura 5- Circuito eletrônico dos sensores de pressão.



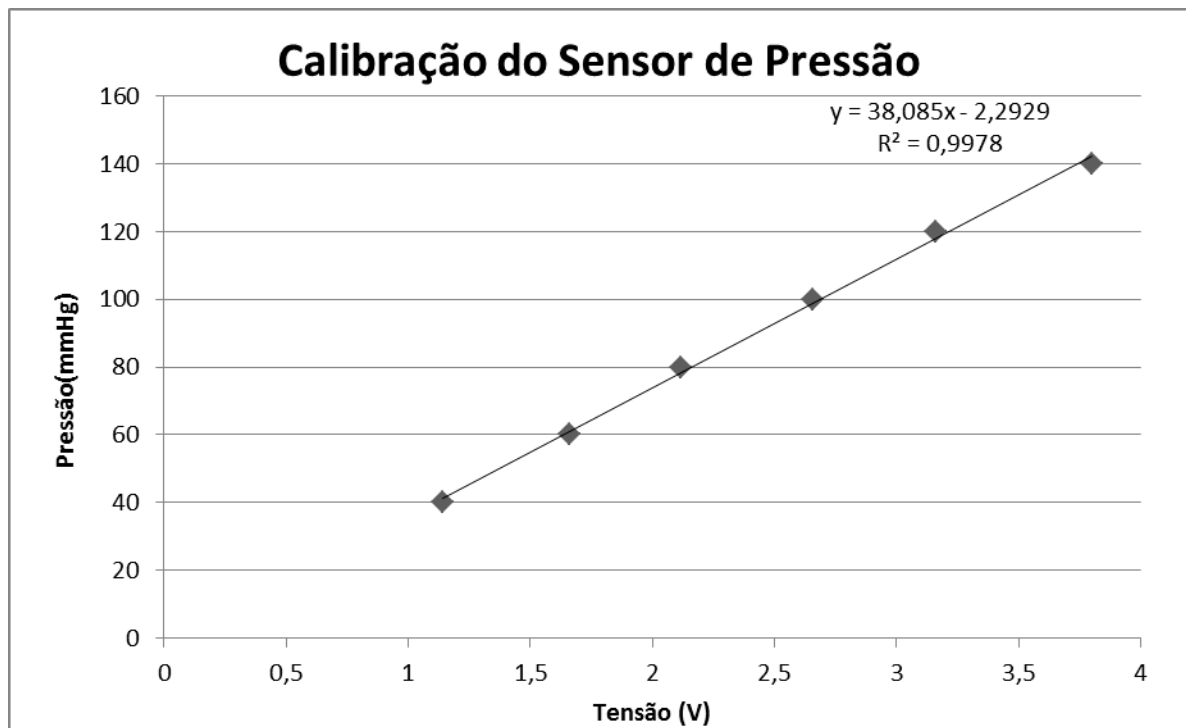
A calibração dos sensores de pressão foi feita aplicando um valor conhecido de pressão neles e medindo a tensão de saída. Com os valores obtidos foi feita uma regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados.

A seguir são apresentados os valores de medição obtidos e a curva de calibração calculada para cada sensor.

Tabela 5 – Dados de calibração do sensor de pressão 1

Pressão(mmHg)	Tensão(V)
40	1,14
60	1,66
80	2,12
100	2,66
120	3,16
140	3,80

Figura 6 - Curva da calibração do sensor de pressão 1, gerado em Excel



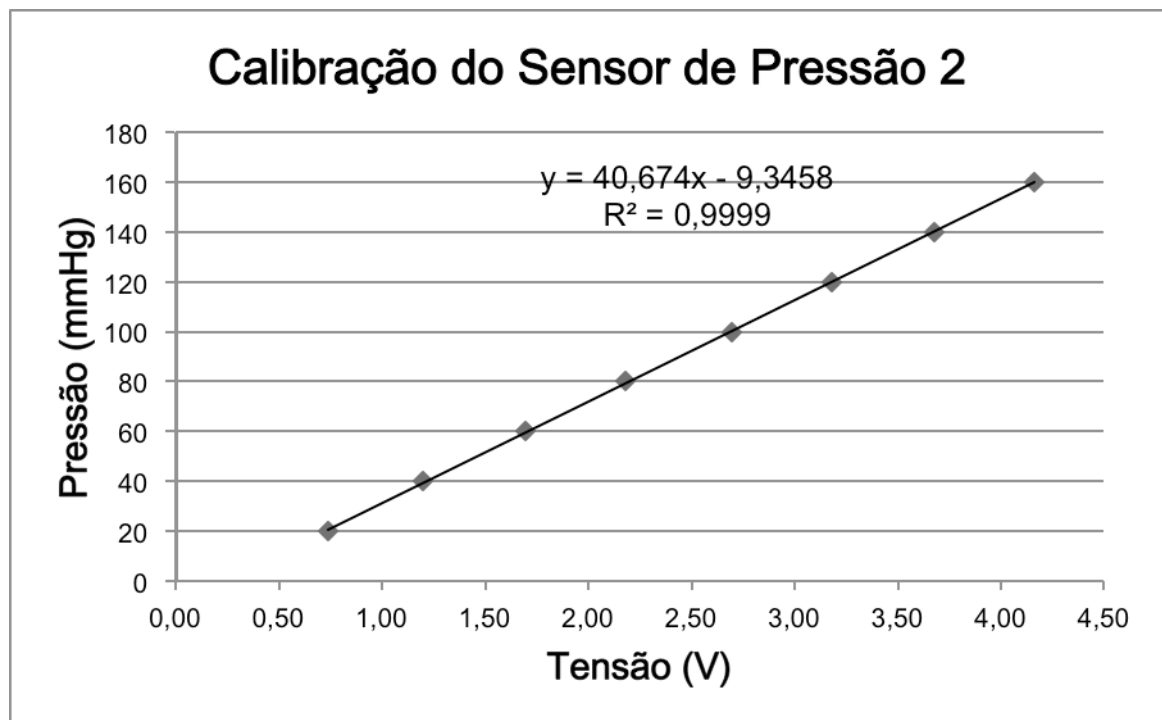
$$P(V) = 38,085V - 2,2929$$

(3)

Tabela 6 - Dados de calibração do sensor de pressão 2

Pressão(mmHg)	Tensão(V)
20	0,74
40	1,20
60	1,70
80	2,18
100	2,70
120	3,18
140	3,68
160	4,16

Figura 7 - Curva da calibração do sensor de pressão 2, gerado em Excel



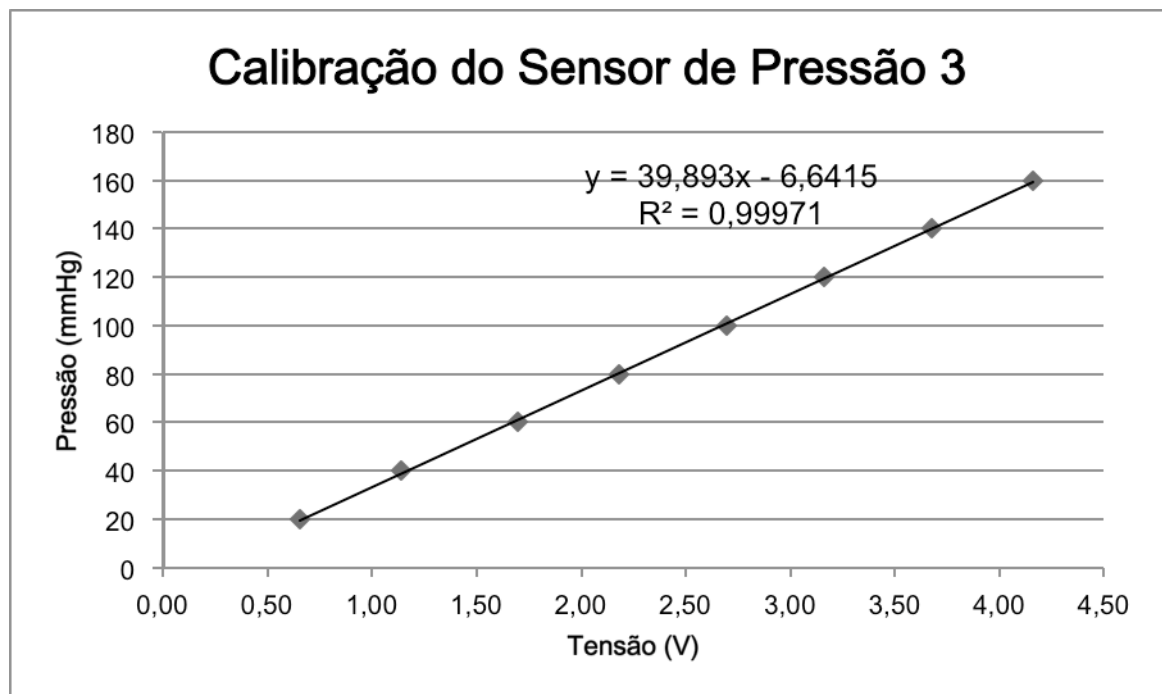
$$P(V) = 40,674V - 9,3458$$

(4)

Tabela 7 - Dados de calibração do sensor de pressão 3

Pressão(mmHg)	Tensão(V)
20	0,66
40	1,14
60	1,70
80	2,18
100	2,70
120	3,16
140	3,68
160	4,16

Figura 8 - Curva da calibração do sensor de pressão, gerado em Excel

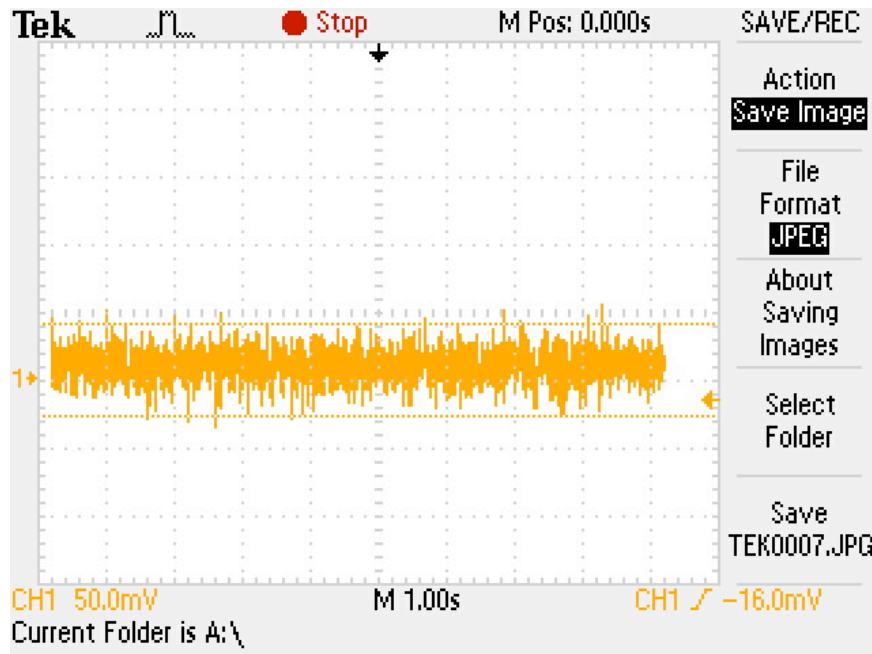


$$P(V) = 39,893V - 6,6415$$

(5)

Com o osciloscópio, foi possível observar um ruído de cerca de 70mV para este conjunto, como pode ser visto na Fig. 9. Portanto será adotado um limiar de pressão de 2mmHg.

Figura 9- Sinal de Pressão para um valor constante de 0,2V - intervalo de aproximadamente 70mV.

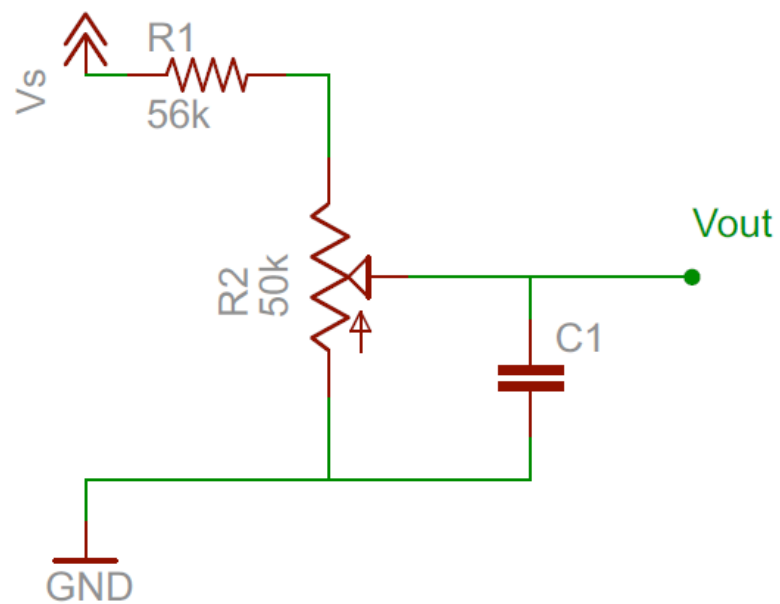


2.6.3.2 Sensor de Posição do Pistão da Bomba

Para medir a posição do pistão é utilizado um potenciômetro deslizante de 50k Ω (tolerância de 10%) conectado ao pistão, dessa forma, conforme o pistão se movimenta, há variação na resistência do potenciômetro. O potenciômetro é alimentado com uma tensão fixa de 12V em suas extremidades e monitorando a tensão em sua resistência variável. Para evitar que o sinal máximo não passe de 5V (máxima tensão admissível na placa de aquisição) um resistor de 56k Ω foi associado em série, diminuindo ainda mais a corrente pelo potenciômetro. Ameniza-se assim a deterioração do potenciômetro por fatores como aquecimento. O potenciômetro aqui empregado é uma solução paliativa para medição de posição e condução deste trabalho. Em trabalhos futuros é necessário substituir por potenciômetro próprio para medição de posição ou sensores de posição de outra modalidade.

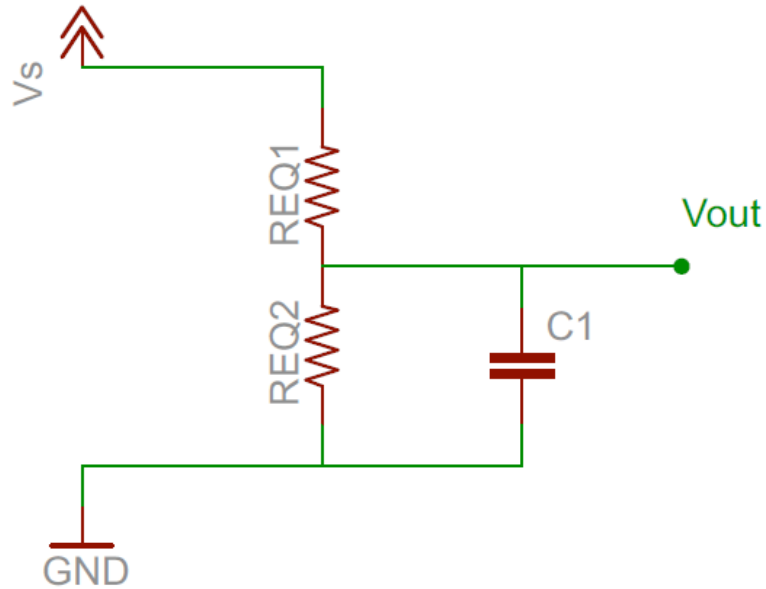
Após a montagem, testes foram realizados e notou-se ser necessário a utilização de algum filtro passa-baixas para o sinal. Foi dimensionado então um capacitor para reduzir o ruído. O esquema do circuito pode ser visto na Fig. 10.

Figura 10 - Esquema Elétrico do Sistema de Medição de Posição



Modelando o potenciômetro como dois resistores teóricos para uma dada posição, associando o resistor $R1$ a um destes resistores do potenciômetro, o circuito mostrado na Fig. 11 foi usado para obter um capacitor que filtrasse o sinal.

Figura 11 - Simplificação do circuito de sensoriamento de posição.



Medindo a resistência $R2$ máxima e mínima com o potenciômetro já acoplado ao pistão, montou-se a Tab. 8.

Tabela 8 - Resistências medidas com as configurações do modelo.

Deslocamento	Resistência (k Ω)
REQ2 Mínimo	9,8
REQ2 Máximo	41,5
REQ1+REQ2	113,4

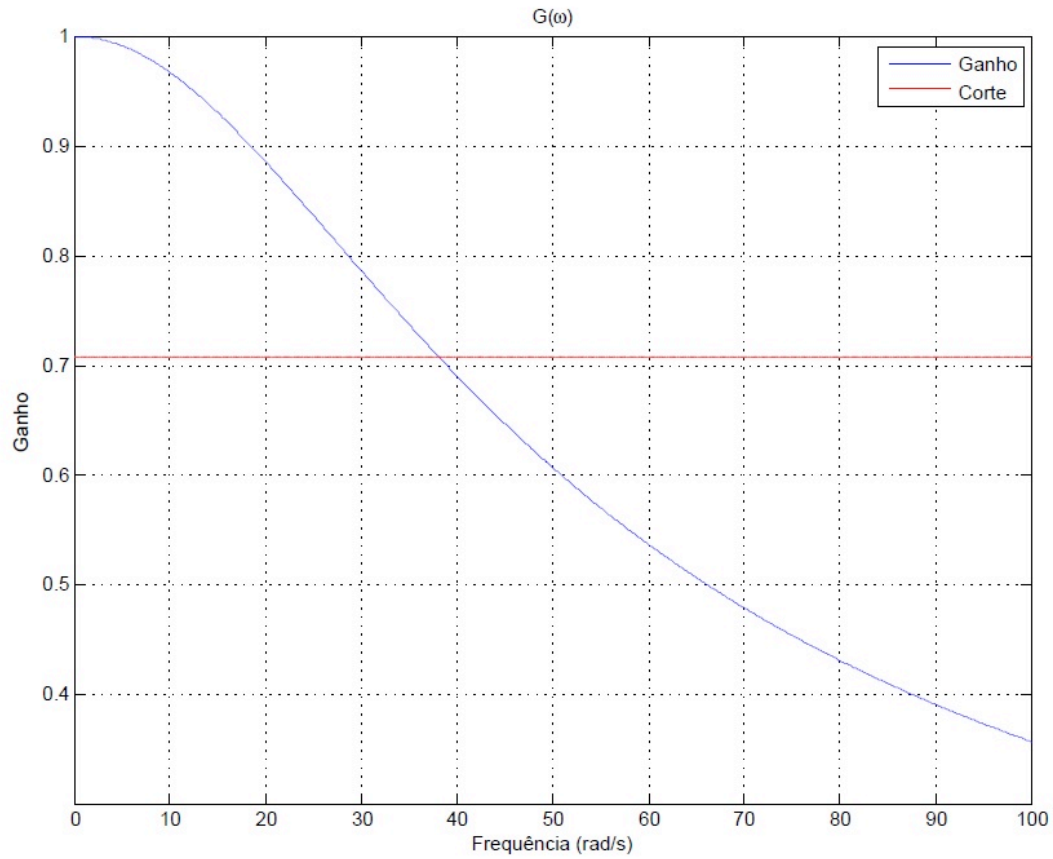
Calculando o ganho do sinal V_{out} em relação a V_s do esquema simplificado, chegou-se ao seguinte ganho mostrado na Eq. (6).

$$G(j\omega) = \frac{R_{eq2}(R_{eq1} + R_{eq2}) - j\omega R_{eq2}^2 R_{eq1} C}{(R_{eq1} + R_{eq2})^2 + (\omega R_{eq1} R_{eq2} C)^2} \quad (6)$$

Com estas informações (equação e valores de resistências), simulou-se no MATLAB a frequência de corte do circuito para alguns valores de capacitância. O valor adotado é o de 1 μ F, que

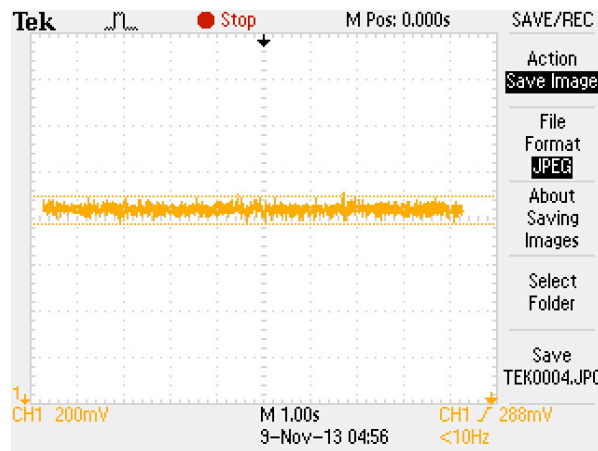
(teoricamente) gera uma frequência de corte de cerca de 6Hz. A Fig. 12 apresenta a plotagem para estas configurações.

Figura 12 – Resposta em frequência do filtro de sensor de posição



Com isto, o ruído medido com osciloscópio foi cerca de 120mV, como pode ser visto na Fig. 13.

Figura 13- Sinal de Posição para um valor constante de 2,3V - intervalo de aproximadamente 120mV.



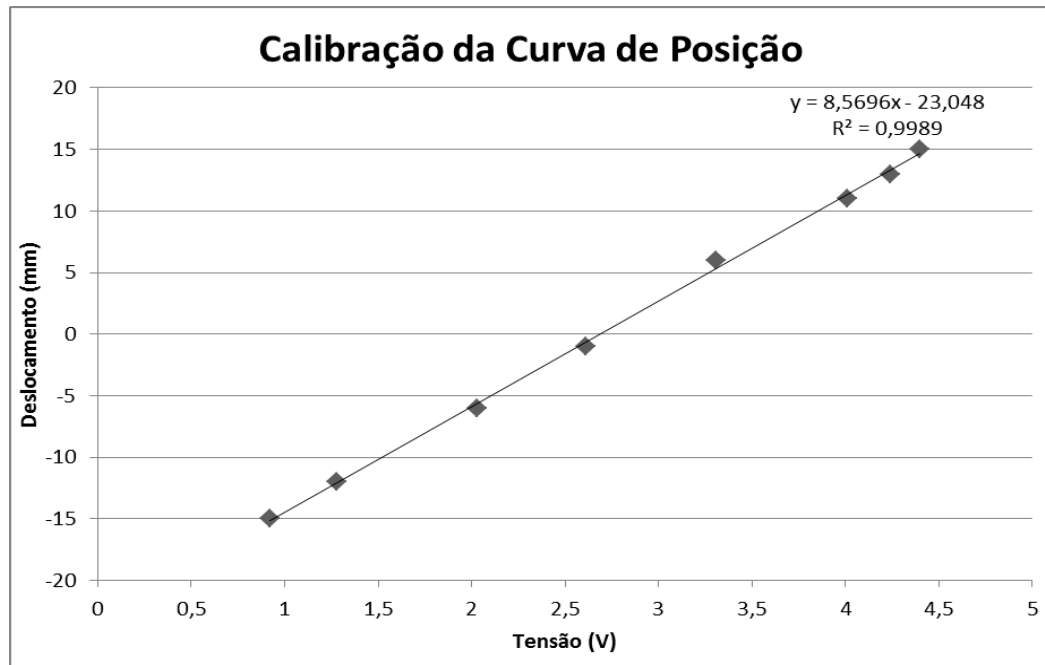
Foi feita então a calibração deste potenciômetro já com o capacitor. Para tanto uma régua graduada (divisões de 1mm) foi alinhada paralelamente ao curso do potenciômetro e a posição do deslizador do potenciômetro lida visualmente. Este processo permite uma aferição da posição com uma resolução de 0,5mm. Caso futuramente seja constatada a necessidade de uma resolução maior, é preciso adotar outro processo de aferição ou empregar outro tipo de sensor, o que é mais adequado. O resultado da calibração é apresentado na Tab. 9.

Tabela 9 – Dados de calibração do sensor de posição

Tensão (V)	Posição (mm)	Deslocamento em Relação ao Centro (mm)
4,4	153	15
3,31	162	6
2,03	174	-6
1,28	180	-12
0,92	183	-15
2,61	169	-1
4,01	157	11
4,24	155	13

Fazendo regressão linear destes pontos, obteve-se a curva de calibração:

Figura 14 - Curva de calibração do sensor de posição, gerada em Excel.



$$V(x) = 8,57x - 23,05$$

(7)

2.6.3.3 Placa A/D-D/A

Para este trabalho, foi disponibilizada a placa A/D-D/A de modelo A-812PG fabricada pela empresa ICP DAS. Trata-se de uma placa de conversão A/D-D/A de 12-bits com uma capacidade de aquisição de 62.500 amostragens/segundo, o que é suficiente para os fins deste projeto.

Juntamente com a placa A/D-D/A também é usado um osciloscópio. O osciloscópio é empregado para a visualização dos diversos sinais em tempo real. A placa de aquisição tem como finalidade a aquisição de dados para o controle e a gravação de dados para análise posterior. Esta gravação é feita em forma de arquivo de texto; este arquivo é então transmitido pela porta serial para outro computador, onde os dados podem ser tratados usando softwares como o Excel ou o MATLAB.

Como discutido anteriormente, o ciclo do sistema terá entre 70 e 80 rotações por minuto, o que é menor do que 1,5Hz.

2.6.4 Subsistema de Controle

Esse subsistema é o responsável pela aquisição dos sinais dos sensores, pelo tratamento dos sinais e aplicação do algoritmo de controle. Conforme delineado desde o início, este trabalho não tem como objetivo o desenvolvimento do sistema completo de controle que compreende o controle simultâneo da pressão e vazão do líquido no circuito hidráulico. São realizados testes de atuação de controle sobre o motor da bomba, por isso é necessário ter esse subsistema instalado e funcional. Além disso, é importante ter esse subsistema instalado para que possa ser implementado em trabalhos futuros um controlador no sistema.

Analisando as alternativas disponíveis, optou-se por utilizar uma placa A/D-D/A para fazer a aquisição de dados, tratar os dados num computador, executar o algoritmo de controle no computador e utilizar novamente a placa A/D-D/A para alimentar o amplificador de potência.

O computador utilizado possui um conector ISA para a instalação da placa A/D-D/A. Este computador tem como sistema operacional Windows 98, possui 48MB de memória RAM e 133MHz de processamento, configurações suficientes para este trabalho. A programação é desenvolvida em Pascal para ser possível aproveitar a documentação de programas já existentes e por ser suficiente às aplicações deste projeto.

Para testar o efeito do motor sobre a resposta do sistema, foi desenvolvido um teste de controle da velocidade do motor em função da posição do pistão. Para isso será utilizado o sinal proveniente do sensor de posição do pistão (potenciômetro) e do sensor de pressão na saída da bomba, após a válvula de retenção, para calcular o erro em malha fechada, ambos os sinais sendo coletados pela placa A/D-D/A.

A atuação é feita no amplificador de tensão do motor, já que a velocidade do motor é regulada por esta tensão.

2.6.4.1 Modelagem Circuito Hidráulico

O circuito hidráulico apresentado possui duas variáveis que influenciam a resposta na saída da bomba. Uma modelagem deste circuito é feita para analisar a importância destes graus, que seriam o nível de restrição e o nível da coluna de ar/água inicial no reservatório de complacência.

O primeiro elemento discutido aqui é a restrição. Sendo q a vazão através da válvula, P_1 a pressão a montante da válvula, P_2 , a pressão a jusante da válvula e K uma constante (coeficiente de descarga), é possível se escrever como mostrado na Eq. (7).

Figura 15 – Representação da Restrição



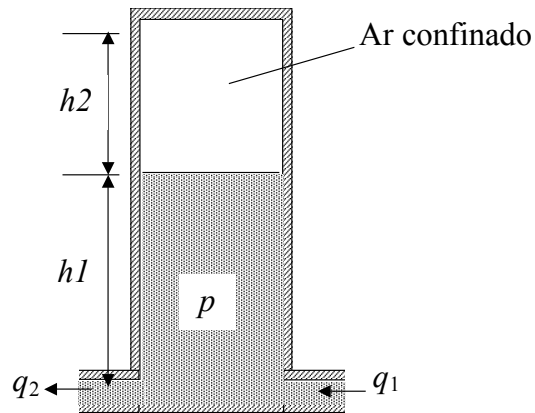
$$q = K(P_1 - P_2) \quad (8)$$

A constante K é função das dimensões da restrição, que pode ser obtida experimentalmente. A rigor, o valor de K é função do estado do escoamento através da válvula, mas numa primeira simplificação, este valor pode ser considerado constante. Esta forma simplificada permitirá a análise qualitativa do comportamento experimental do simulador que se pretende fazer adiante.

É de se esperar, a partir desta formulação, que quanto maior o nível de restrição, menor o valor de K , mantendo-se a pressão a jusante constante, a pressão a montante deve aumentar, enquanto a vazão diminui.

Com relação ao reservatório de complacência, sendo A_{ST} a área da seção transversal dos reservatórios, a taxa de variação na altura h_l da coluna de líquido é dada pela seguinte relação mostrada na Eq. (8).

Figura 16 - Reservatório de complacência



$$\dot{h}_1 = \frac{1}{A_{ST}}(q_1 - q_2) \quad (9)$$

As pressões de interesse neste trabalho são as pressões no reservatório de acúmulo, no interior da câmara e na saída da bomba, após a válvula de retenção.

No reservatório de complacência, há um volume de ar confinado. Este volume de ar está, inicialmente, à pressão atmosférica. Devido à restrição na saída do reservatório de complacência, à medida que a pressão do fluido que passa pelo reservatório aumenta, o ar é comprimido dentro do reservatório, ocorrendo um acúmulo de líquido no reservatório. Este volume acumulado é descarregado à medida que o pistão da bomba inicia a fase de recuo. Uma modelagem simplificada do comportamento do ar confinado no reservatório de complacência pode ser dada partindo-se da hipótese de que o ar é um gás perfeito e que a compressão seja adiabática. Isto resulta na seguinte relação mostrada na Eq. (9).

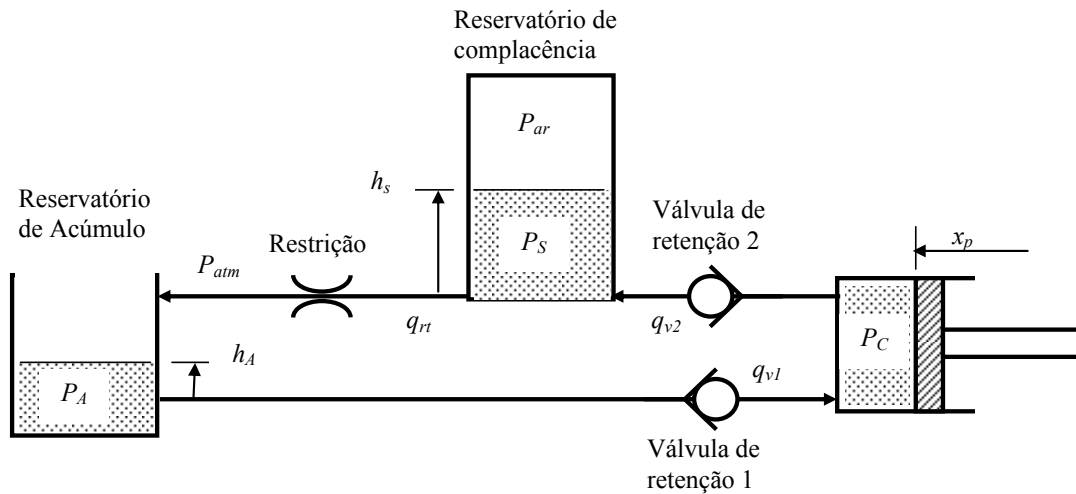
$$PV^\gamma = cte \Rightarrow P = \left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma P_0 \quad (10)$$

Onde γ é a relação entre os calores específicos do gás a pressão constante (C_p) e a volume constante (C_v). Para o ar, esta relação é de aproximadamente 1,4. P_0 e V_0 se referem, respectivamente, a pressão e volume inicial de gás e P e V à pressão e volume em um dado instante. Para esta equação, deve-se utilizar valores de pressão absoluta.

Visto que o volume total do reservatório é constante, quanto mais líquido inicialmente, menos ar há no reservatório. Visto que a vazão de entrada no reservatório (ou vazão de saída da bomba) varia pouco com esta altura para uma mesma frequência de bombeamento, quanto menos ar há no reservatório, menor a resistência encontrada pelo fluido de entrada, logo a variação de pressão, e consequentemente o valor de pressão, será maior. Resumindo quanto menos ar inicialmente no reservatório, maior a variação de pressão.

Com a modelagem dos elementos acima, é possível escrever uma equação de estados, em que os estados seriam as alturas de coluna de água no reservatório e a posição do pistão, como visto a seguir.

Figura 17 – Esquema do circuito hidráulico



$$\begin{cases} \dot{h}_A = \frac{1}{A_r}(q_{rt} - q_{v1}) & (11) \\ \dot{h}_S = \frac{1}{A_r}(q_{v2} - q_{rt}) & (12) \\ \dot{x}_p = \frac{1}{A_C}(q_{v1} - q_{v2}) & (13) \end{cases}$$

Onde A corresponde à seção transversal do elemento indicado pelo índice e

$$q_{v1} = \begin{cases} K_v(P_A - P_c) & ,\text{se } P_l > P_c \\ 0 & ,\text{senão} \end{cases} \quad (14)$$

$$q_{v2} = \begin{cases} K_v(P_c - P_s) & ,\text{se } P_l > P_c \\ 0 & ,\text{senão} \end{cases} \quad (15)$$

$$q_{rt} = K_{rt}(P_A - P_s) \quad (16)$$

com

$$P_A = \rho g h_A \quad (17)$$

$$P_s = \rho g h_s + P_{ar} \quad (18)$$

$$P_c = f(x_p) \quad (19)$$

$$P_{ar} = \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma - 1 \right] P_{atm} \quad (20)$$

$$h_{ar} = H_{\text{reservatório}} - h_s \quad (21)$$

onde P_{atm} é a pressão atmosférica absoluta, $H_{\text{reservatório}}$ é a altura do reservatório e h_{ar0} é a altura da coluna de ar inicial.

A Tab. 10 correlaciona os índices aos elementos.

Tabela 10 - Correlação entre os índices e elementos.

Índice	Elemento
A	Reservatório de Acúmulo
S	Reservatório de Complacência
P	Pistão
v1	Válvula 1 (entre o reservatório de acúmulo e a bomba)
v2	Válvula 2 (entre o reservatório de complacência e a bomba)
Rt	Restrição

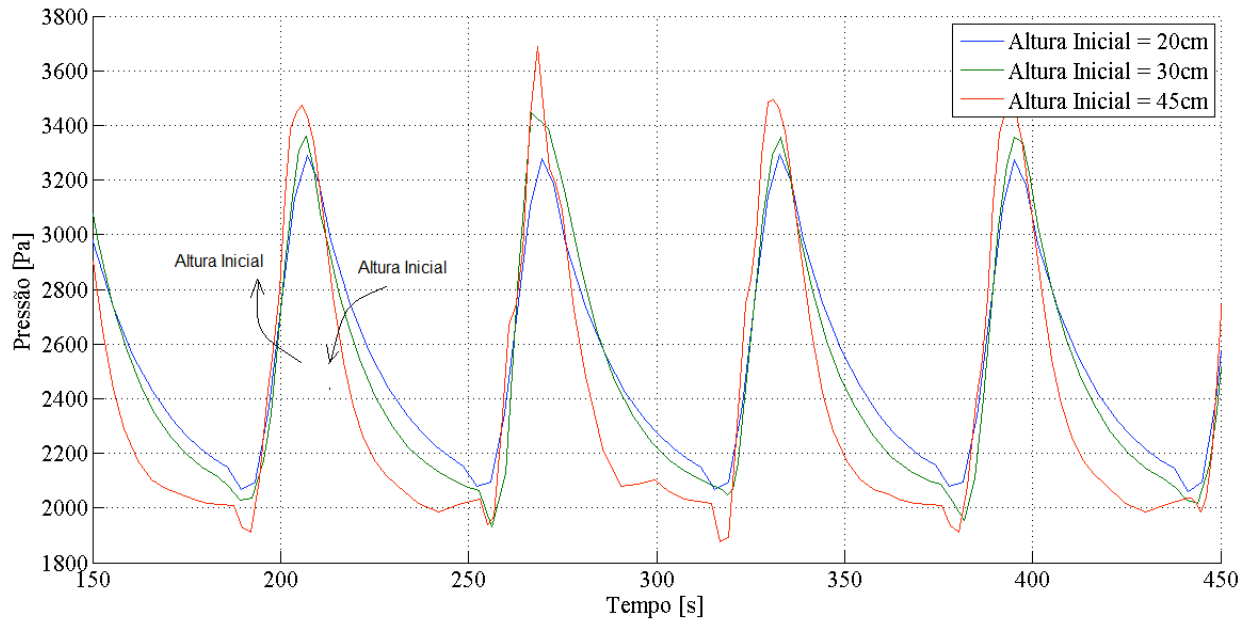
A entrada do sistema é a posição do pistão. Com essa entrada, considerando este caso estático, é possível controlar em partes a pressão na saída da bomba. O pistão (e em última instância o motor que aciona o pistão) só afeta a saída da bomba quando a válvula 2 está aberta, ou seja, quando q_{v2} é maior que zero, que ocorre quando a pressão no interior da câmara é maior do que a pressão após a válvula 2, o que acaba por introduzir uma não linearidade a esta parte da planta. Durante boa parte do ciclo da bomba (como o regresso do pistão), a influência da bomba sobre a saída pode ser desprezada, logo é necessário outro tipo de atuação no sistema para obter o desempenho desejado, tanto de pressão quanto de vazão. Este outro tipo de atuação poderia ser feito na válvula 2 ou até mesmo na restrição, porém este estudo não faz parte do escopo deste trabalho.

A restrição causa outro efeito que afeta a resposta na pressão de saída: dependendo do nível de restrição usado, a vazão de saída do reservatório de complacência é muito baixo em relação à vazão de entrada, o que faz com que o movimento de avanço do pistão resulte numa compressão do ar no interior deste reservatório, fazendo com que a pressão durante o avanço do pistão seja crescente, não havendo a possibilidade de diminuir esta pressão.

Utilizando parte das equações acima, realizou-se uma simulação simplificada do modelo. Esta simulação não tem como propósito validar o modelo, apenas realizar uma análise qualitativa; os valores dos parâmetros foram estimados a partir das ordens de grandeza envolvidas.

Primeiro, realizou-se uma simulação para avaliar a influência do nível inicial de coluna de água (quantidade de ar inicial). Para uma excitação de pressão senoidal de amplitude de 4000Pa e período de pouco mais de 60s, o nível de restrição (K_{rt}) foi mantido constante, com um valor de $5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa.s}$; o nível de coluna de água no reservatório de acúmulo foi mantido constante e então o nível de coluna de água no reservatório de complacência foi variado (com valores de 20, 30 e 45cm). Utilizando o MATLAB, resolveu-se a equação diferencial para a altura do reservatório de complacência, usando o método de Runge-Kutta de 4ª/5ª ordem, obtendo o gráfico de pressão na saída da bomba em função do tempo mostrado na Fig. 18.

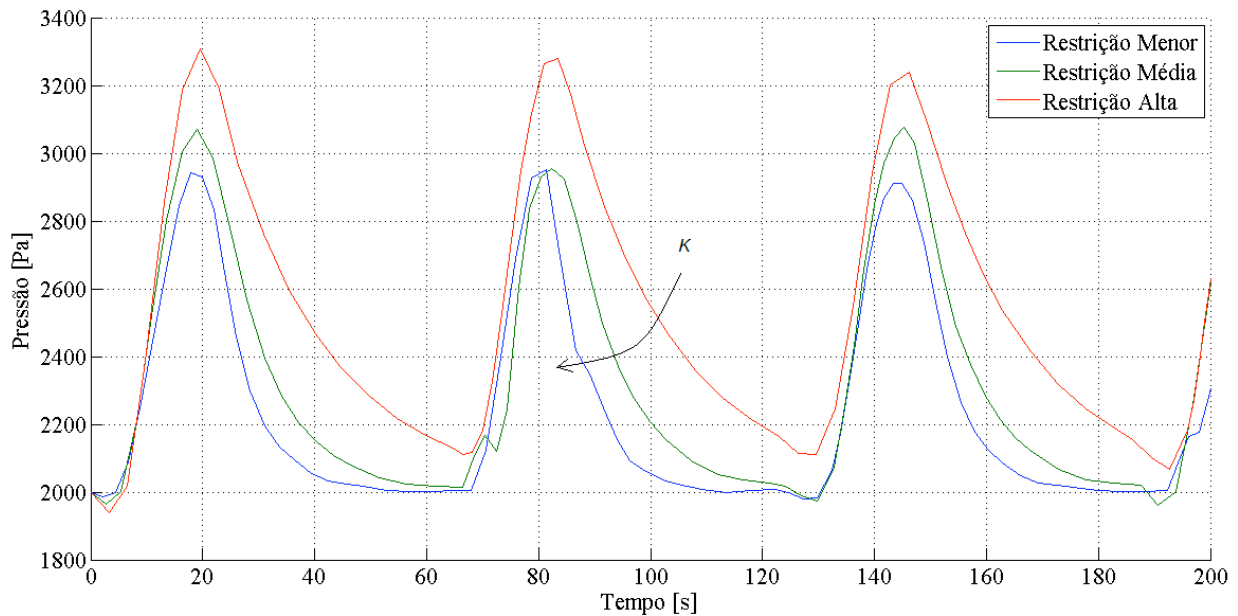
Figura 18 - Resposta da pressão para uma variação no nível inicial de coluna de água



Estes resultados mostram que quanto menos ar houver inicialmente (quanto maior a coluna de água) no reservatório de complacência, maior será a variação na pressão.

Em seguida foi feita uma simulação mantendo constante o nível de coluna de água nos reservatórios (20cm), variando o nível de restrição – quanto maior for o nível de restrição, menor será o valor de K_{rt} . Foram utilizados os valores de 15×10^{-8} , 10×10^{-8} e $5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Pa.s}$. Utilizando o mesmo procedimento da simulação anterior, obteve-se as curvas da seguinte figura.

Figura 19 - Resposta da pressão para uma variação no nível de restrição



Deste gráfico, pode-se concluir que quanto maior o nível de restrição, maior serão as pressões envolvidas, tanto o nível máximo de pressão quanto o mínimo.

Com estes resultados, para realizar o controle do sistema, estas duas variáveis devem ser pré-definidas, a partir de simulações teóricas ou práticas, para obter a resposta desejada.

A análise feita nesta seção estuda os efeitos descritos qualitativamente. Para realizar uma análise quantitativa, uma simulação das equações anteriores deve ser feita, além do levantamento dos parâmetros apresentados. Para os estudos realizados neste trabalho, a análise qualitativa é suficiente. Para realizar um projeto de controle é necessário considerar mais do que a análise quantitativa, deve-se realizar um estudo da dinâmica da planta, introduzindo no mínimo termos relacionados a inércia (massa) do fluido bombeado que é acelerado e modelar a dinâmica introduzida pela membrana elástica, que causa efeitos elástico e amortecedor entre o pistão e a câmara. Esta membrana simula a elasticidade do tecido cardíaco, e permite um acúmulo (até certo ponto) de fluido no interior da câmara. Adicionando todos estes termos, será possível notar um atraso entre a entrada (posição do pistão) e a saída (pressão na saída da bomba).

2.6.4.2 Modelagem Motor

O teste de controle será feito regulando-se a tensão de entrada do motor para modificar a pressão fornecida pela bomba, por isso, para análise do sistema, deve-se fazer o modelo matemático e determinar a função de transferência que relaciona a tensão de entrada com o torque fornecido pelo motor.

Um motor elétrico de corrente contínua pode ser modelado como um circuito RL (sendo R a resistência da armadura e L a indutância da armadura) com a presença de uma força contra-eletromotriz e . Utilizando as leis de Kirchhoff a Eq.(22) é obtida:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (22)$$

Onde V é a tensão de entrada do motor e i é a corrente da armadura. A força contra-eletromotriz é diretamente proporcional a velocidade angular do motor, então pode-se reescrever a equação da seguinte maneira:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + K_e \dot{\theta} \quad (23)$$

Onde θ é o deslocamento angular do motor e K_e a constante de força eletromotriz.

Analisando a parte mecânica do sistema, sabe-se que o torque T do motor é aplicado sobre o sistema mecânico que tem momento de inércia J e constante de fricção b , portanto, aplicando a segunda lei de Newton temos a Eq. (24).

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = T \quad (24)$$

O torque aplicado pelo motor é diretamente proporcional a corrente de armadura, então:

$$T = K_t i \quad (25)$$

E em unidades do SI, as constantes de torque e de força eletromotriz são iguais, por isso assume-se:

$$K_e = K_t = K \quad (26)$$

Aplicando a transformada de Laplace nas Eqs. (23) e (24):

$$\begin{cases} Ri + L \frac{di}{dt} = V - K\dot{\theta} \\ J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = T \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (Ls + R)I = V - Ks\theta \\ s(Js + b)\theta = T \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (Ls + R)\frac{T}{K} = V - Ks\Theta \\ s(Js + b)\Theta = T \end{cases} \quad (27)$$

$$(28)$$

Isolando Θ na Eq. (28) e substituindo na Eq. (27) obtêm-se:

$$\theta = \frac{T}{s(Js + b)} \quad (29)$$

$$(Ls + R)\frac{T}{K} = V - \frac{KsT}{s(Js + b)} \quad (30)$$

Reordenando os termos, obtêm-se a Eq. (31) que é a função de transferência que relaciona a tensão de entrada do motor com o torque aplicado.

$$\frac{T}{V} = \frac{K(Js + b)}{JLs^2 + (Lb + RJ)s + K^2 + bR} \quad (31)$$

Percebe-se que a função de transferência depende de muitos parâmetros e alguns deles são difíceis de se calcular ou de medir diretamente.

2.6.4.3 Modelagem Mecanismo

A pressão exercida pela bomba é determinada pela força aplicada pelo pistão. A conversão do torque aplicado pelo motor para força exercida pelo pistão é dada pela Eq. (1) que já foi apresentada na seção 2.6.1.2.

$$\frac{f}{T} = \frac{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}}{\frac{r}{2} \sin(2\theta) + (\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}) \sin \theta} \quad (1)$$

A presença de funções trigonométricas torna o sistema não linear e ainda, como há funções trigonométricas no denominador da função, o sistema apresenta singularidades em dois pontos (0 e π). Assim, não há possibilidade de usar as técnicas clássicas de controle linear nesse sistema.

Para fazer um modelo mais completo, pode-se incluir a contribuição da inércia do acoplador excêntrico no modelo. Pode-se ainda incluir termos amortecedores e elásticos, mas para a análise feita nesta seção, tal complexidade a mais não é necessária. Com a inclusão da inércia a seguinte função transferência é encontrada:

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{J_{eq} s^2} \quad (32)$$

Onde J_{eq} corresponde ao momento de inércia equivalente do acoplador e dos elementos entre o acoplador e o motor. Se a Eq. (32) for substituída na Eq. (1), não seria possível, com as técnicas aprendidas durante o curso, obter uma função transferência entre a força aplicada pelo pistão e o torque fornecido do motor.

Como não se atua na corrente do motor, mas sim na tensão, o mais adequado é utilizar também as relações geométricas entre θ e x_B .

$$\frac{\delta \theta}{\delta x_B} = - \frac{x_B - r \cos \theta}{x_B r \sin \theta} \quad (33)$$

$$x_B = r \cos \theta + \sqrt{l^2 + r^2 \sin^2 \theta} \quad (34)$$

Assim, é obtida a posição do pistão e sua velocidade para uma dada posição e velocidade angular do motor. Isto é importante na medida em que a forma de atuação deste trabalho é na posição do pistão.

Para completar, pode-se estimar a dinâmica entre a força aplicada pelo mecanismo no pistão e na pressão gerada no interior da câmara. A membrana pode ser modelada como um elemento elástico e um amortecedor. Nesta análise, também deve-se considerar a massa equivalente do pistão e de sua haste. Considerando os esforços envolvidos, pode-se montar a expressão:

$$f = M_{eq} \ddot{x}_B + c_{eqmb} \dot{x}_B + k_{mb} x_B + f_c \quad (35)$$

Onde M_{eq} é a massa equivalente de pistão e haste, c_{eqmb} é o coeficiente de amortecimento equivalente da membrana, k_{eqmb} é a constante elástica equivalente da membrana e f_c é a força transmitida a câmara.

A pressão no interior da câmara será então:

$$P_C = \frac{f_c}{A_{eq}} \quad (36)$$

Onde A_{eq} seria a área em que a força atua. Esta área pode ser modelada como uma função da posição do pistão, composta pela área do pistão somada a superfície tensionada da membrana em contato com o fluido.

Juntando todas estas equações, percebe-se que a pressão no interior da câmara é função da posição angular do motor, numa relação não linear.

Para esse sistema seria necessário aplicar técnicas de controle avançadas, não vistas durante o curso, como o controle não linear. Como estudo inicial, será empregado um algoritmo de controle

mais intuitivo para avaliar as alterações possíveis de se fazer entre a atuação no motor em malha aberta e em malha fechada. As equações levantadas nesta seção, assim como o trabalho de maneira geral, tem o propósito de servir de ponto de início para a utilização de técnicas de controle em trabalhos futuros.

2.6.4.4 Considerações Sobre a Modelagem

Conforme se observa na discussão acima referente à modelagem, o sistema considerado neste trabalho é de elevada complexidade. Embora apresente elementos simples e de dinâmica conhecida, como é o caso do motor, que introduzem termos lineares à planta, outros elementos estão presentes que aumentam a complexidade do sistema, como o mecanismo de biela-manivela e a válvula de retenção. Mesmo os elementos que podem ser representados por um modelo linear, ainda possuem parâmetros que exigiriam diversos testes para serem validados. Como o escopo deste trabalho é preparar a bancada para que trabalhos futuros desenvolvam um projeto efetivo de controle, apenas foram levantados quais parâmetros estão envolvidos, deixando por conta de trabalhos futuros a obtenção destes parâmetros. Este trabalho se limita em atuar no motor que possui relação linear.

A discussão acima torna evidente que o controle simultâneo da pressão e da vazão, apenas um sistema de atuação não é suficiente, sendo necessária a utilização de outro sistema de atuação.

2.6.4.5 Teste de Controle do Motor

Um sistema de simulação cardiovascular possui duas variáveis que devem ser reproduzidas com fidelidade em relação ao sistema real para que o modelo que o simulador emprega seja validado: pressão e vazão. No caso de um simulador da região de saída do coração (que corresponde à região do ventrículo esquerdo e aorta) as variáveis de interesse seriam a pressão na aorta e a variação de fluido no ventrículo, ou a vazão de entrada na aorta e vazão de entrada no ventrículo. Para controlar ambas variáveis, seriam necessários dois sistemas de atuação.

O arranjo proposto neste trabalho envolve a utilização de apenas um sistema de atuação: atuação sobre o motor que aciona a bomba pulsátil do sistema. Outros sistemas de atuação, que não fazem

parte do escopo deste trabalho, podem ser desenvolvidos em iterações futuras para melhorar o desempenho deste sistema de simulação. Um sistema possível seria uma válvula ativa, cuja abertura seria controlada para obter as curvas da maneira desejada. Como possui apenas um sistema de atuação, o protótipo inicial de bancada desenvolvido neste trabalho dificilmente conseguirá emular o comportamento de um sistema cardiovascular real, sendo possível reproduzir apenas parte de seu comportamento.

O objetivo deste trabalho é de iniciar o desenvolvimento de uma bancada de simulação cardiovascular, com foco no estudo da pressão na saída da bomba pulsátil, que corresponde a pressão na aorta; tal estudo é utilizado para levantar alternativas para realizar o controle dessa pressão. Este estudo envolve etapas teóricas, com a modelagem da bancada e simulação utilizando essa modelagem; e etapas práticas, como a observação do comportamento do sistema em malha aberta. Após estes estudos, é avaliado até onde o sistema pode ser controlado dadas as configurações propostas neste trabalho.

Para a fase de testes, foi desenvolvido um controle de velocidade em malha aberta que possibilitou a análise da planta. Notou-se que no retorno do pistão, a pressão na saída da bomba é independente do comportamento do motor, pois a pressão na câmara da bomba é menor que a pressão na sua saída e, por isso, a válvula de retenção na saída da bomba está fechada, fazendo com que a bomba deixe de influenciar a pressão em sua saída. Quando o pistão está avançando, a resposta de pressão é influenciada pela velocidade do pistão. Por isso, foram projetados dois algoritmos de controle diferentes, uma para o avanço do pistão e outro para o regresso.

O regresso do pistão é feito com velocidade constante do motor e a tensão de alimentação é escolhida de forma que a duração do regresso seja longa o suficiente para que a pressão no início do avanço do pistão seja de 80mmHg. Portanto compara-se a pressão no início do avanço do ciclo anterior com este valor de 80mmHg, alterando a tensão (que determina a velocidade do motor) conforme necessário.

Notou-se por meio de testes que durante o avanço, os picos de pressão podem ser ajustados apenas de acordo com as configurações do circuito hidráulico, logo o controlador será responsável apenas pelo controle do comportamento da curva de pressão.

Deseja-se que o sistema siga a referência que apresenta funcionamento cíclico, ou seja, em cada posição o sistema deve apresentar uma saída igual ao sinal de referência na mesma. Pode-se pensar que cada posição tem como referência um degrau diferente (discretizando a posição), sendo assim seria possível elaborar requisitos para um controlador que deveria garantir estes requisitos para cada posição. Estes requisitos deveriam ser algo como o tempo de subida correspondente ao tempo em que o sistema permanece em cada posição e sem sobressinal. A partir dos requisitos, seria projetado um controlador a partir do método do lugar das raízes com alocação de polos e zeros. Entretanto, este projeto exigiria conhecimento da planta, da relação entre os ganhos de uma posição para outra e do atraso na resposta, elementos que são muitos e difíceis de serem estimados, além de envolverem questões não lineares.

Foi desenvolvido um algoritmo para atuar sobre o ciclo de funcionamento do sistema. Esse algoritmo calcula o erro entre a saída de pressão atual do sistema e a pressão de referência e incrementa o esse erro no esforço de controle do ciclo seguinte (funcionando como um integrador). O erro coletado é uma curva correspondente a cada posição do ciclo, e é acumulado ciclo a ciclo. O acúmulo deste erro será feito multiplicando o erro por um fator (seguindo um princípio semelhante a constante de tempo do integrador), que será ajustada para evitar que o esforço de controle alcance a saturação do sistema. Após este incremento, um ganho proporcional será usado para ajustar este esforço aos ganhos da planta, evitando mais uma vez que o esforço de controle entre na região de saturação da placa de aquisição. O erro será somado até que seja menor do que um limiar (relacionado com o ruído sensor de pressão).

2.6.4.6 Algoritmo de Atuação no Motor do Sistema

O algoritmo que executa as atuações sobre o motor do sistema segue os seguintes passos:

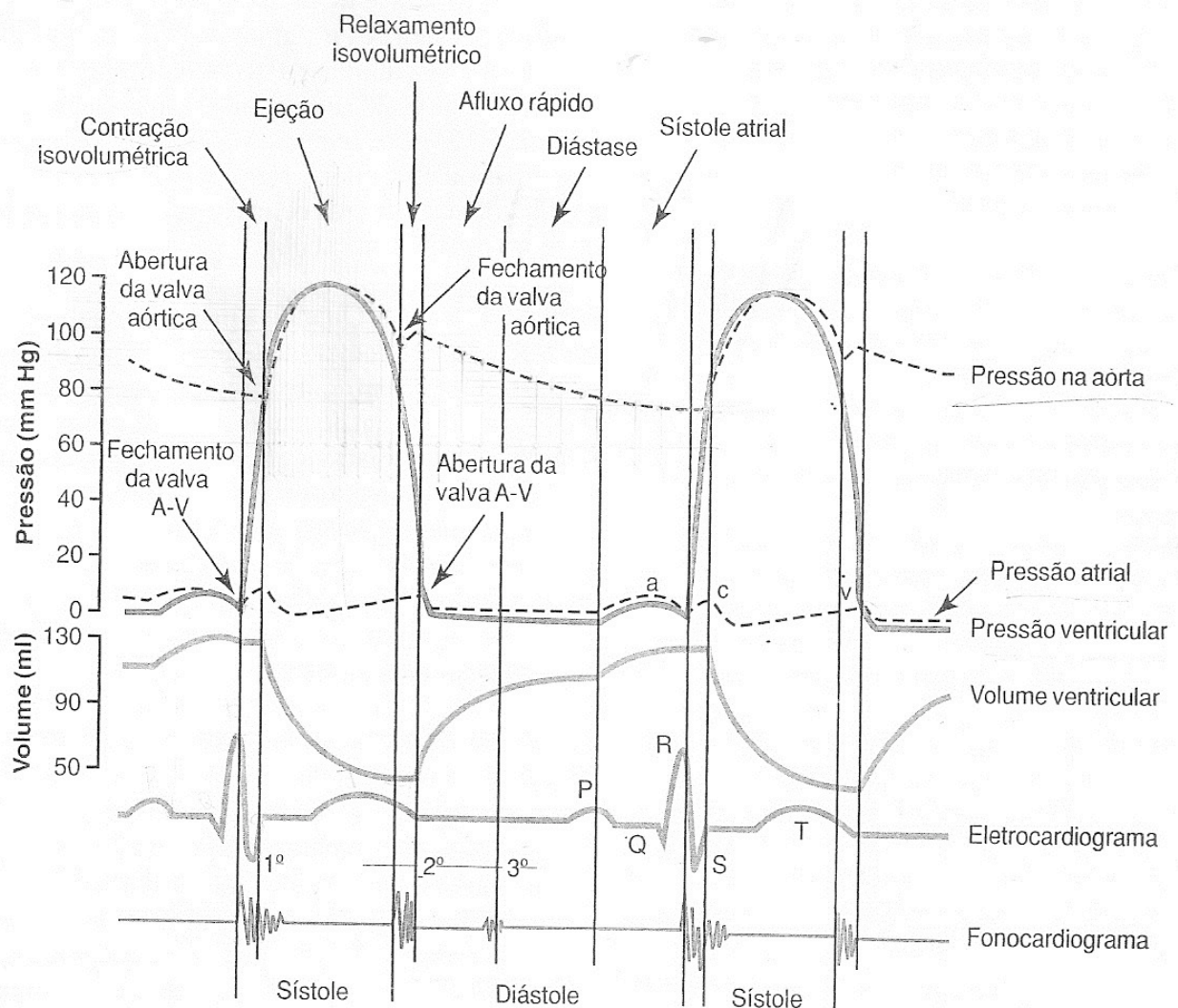
- Em um ciclo
 - Leitura de posição - x;
 - Solta saída correspondente à posição atual, a partir do esforço para este ciclo;
 - Leitura da pressão atual;
 - Associação da pressão atual à posição atual.
- Ao fim de um ciclo
 - Cálculo do erro de pressão no início do avanço
 - Cálculo da tensão de regresso
 - Soltar tensão de regresso
 - Cálculo do erro a partir da referência e da pressão medida para cada posição;
 - Cálculo de esforço controle.

A listagem completa do programa que implementa esse algoritmo pode ser vista no apêndice B.

2.6.4.7 Curva de Referência

Utilizando como referência o livro de fisiologia de Guyton e Hall (2006) foi desenvolvida uma curva de referência de pressão, que o sistema deve seguir na saída da bomba.

Figura 20 - Gráficos que mostram o comportamento da circulação sanguínea humana utilizados neste trabalho como base para a confecção da curva de referência



Fonte: Guyton e Hall (2006)

Foram coletados pontos no gráfico de pressão exibido no livro de fisiologia de Guyton e Hall (2006). Utilizando o método dos mínimos quadrados foi encontrada uma função polinomial de 4º grau para representar a pressão em função da posição do pistão. Foi necessário avaliar com cuidado a posição e a correlação entre os pontos no domínio no tempo e no domínio da posição para que a resposta do sistema não fosse afetada por problemas na discretização.

A curva foi dividida em duas partes. A primeira representa o momento inicial do bombeamento em que ocorre a subida da pressão, esta curva foi utilizada como referência para o controlador. O polinômio obtido é mostrado na Eq. (37).

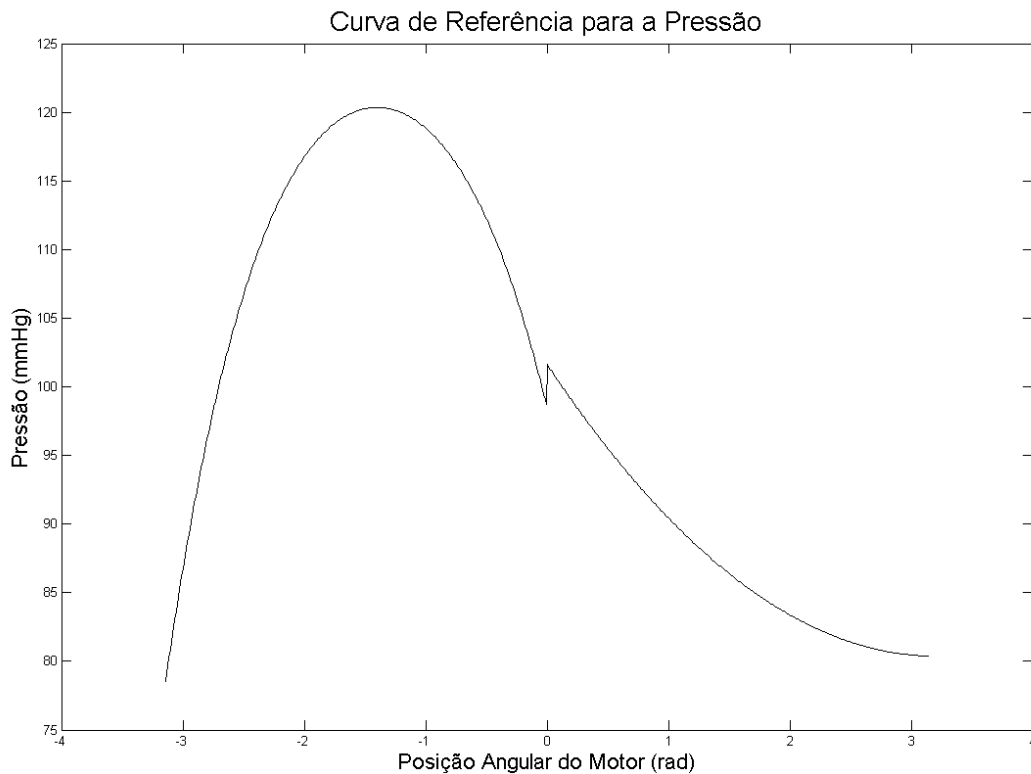
$$P(x) = -0,0001x^4 + 0,0015x^3 - 0,1067x^2 + 0,343x + 120,06 \quad (37)$$

A segunda parte da curva é a queda de pressão do ciclo de bombeamento. Embora ela não tenha sido usada no controlador, ele foi feita para ser utilizada na avaliação dos resultados. A Eq. (38) mostra o polinômio obtido.

$$P(x) = 0,0225x^2 + 0,7074x + 85,909 \quad (38)$$

Na Fig. 21 é apresentada a curva obtida com os polinômios. O ponto em que há uma descontinuidade na curva é ponto em que há a ligação do dois polinômios.

Figura 21 - Curva de referência de pressão



2.7 Construção e Implementação

Nesta seção são apresentados detalhes construtivos do protótipo utilizado neste trabalho.

Seguindo a metodologia apresentada, assim que projetados, os componentes foram construídos. A Fig. 22 mostra o protótipo indicando seus principais componentes.

Figura 22 - Bomba e Circuito Hidráulico.

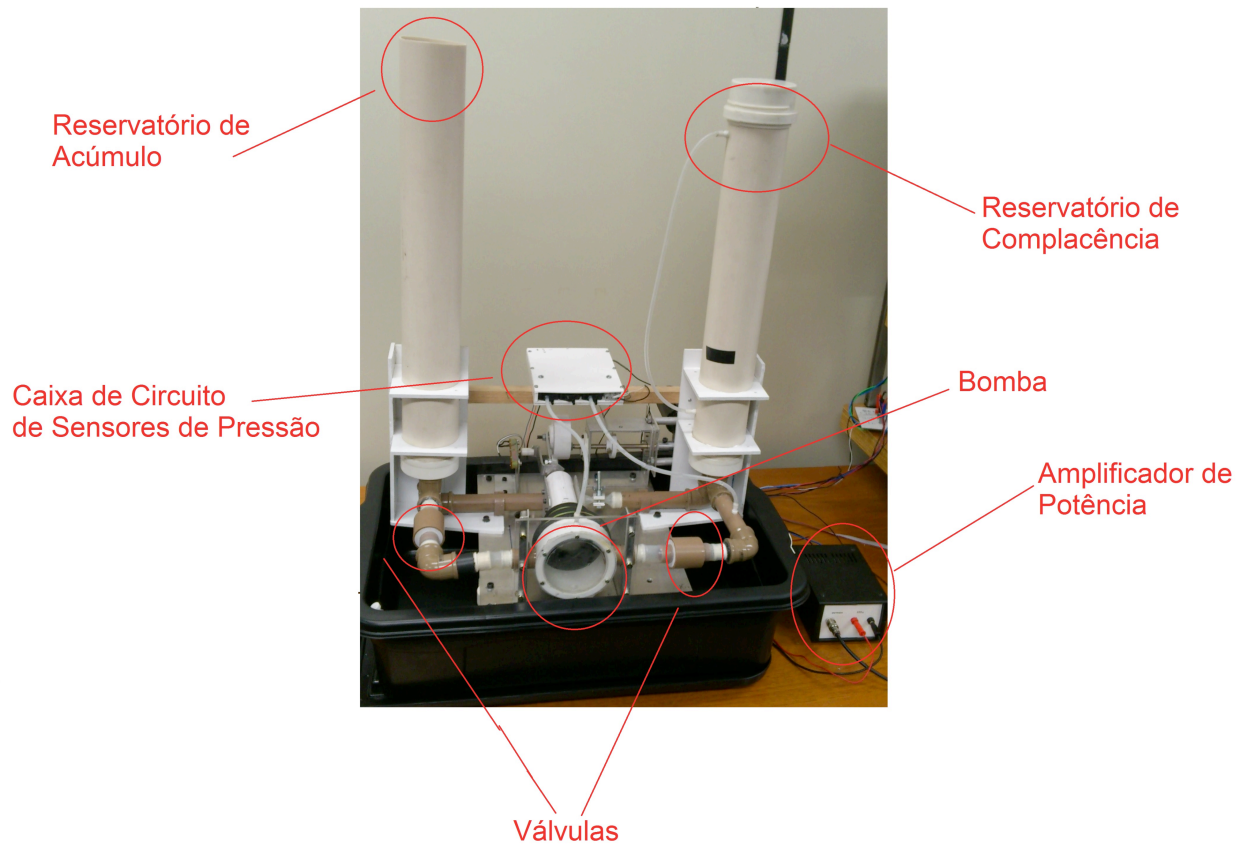
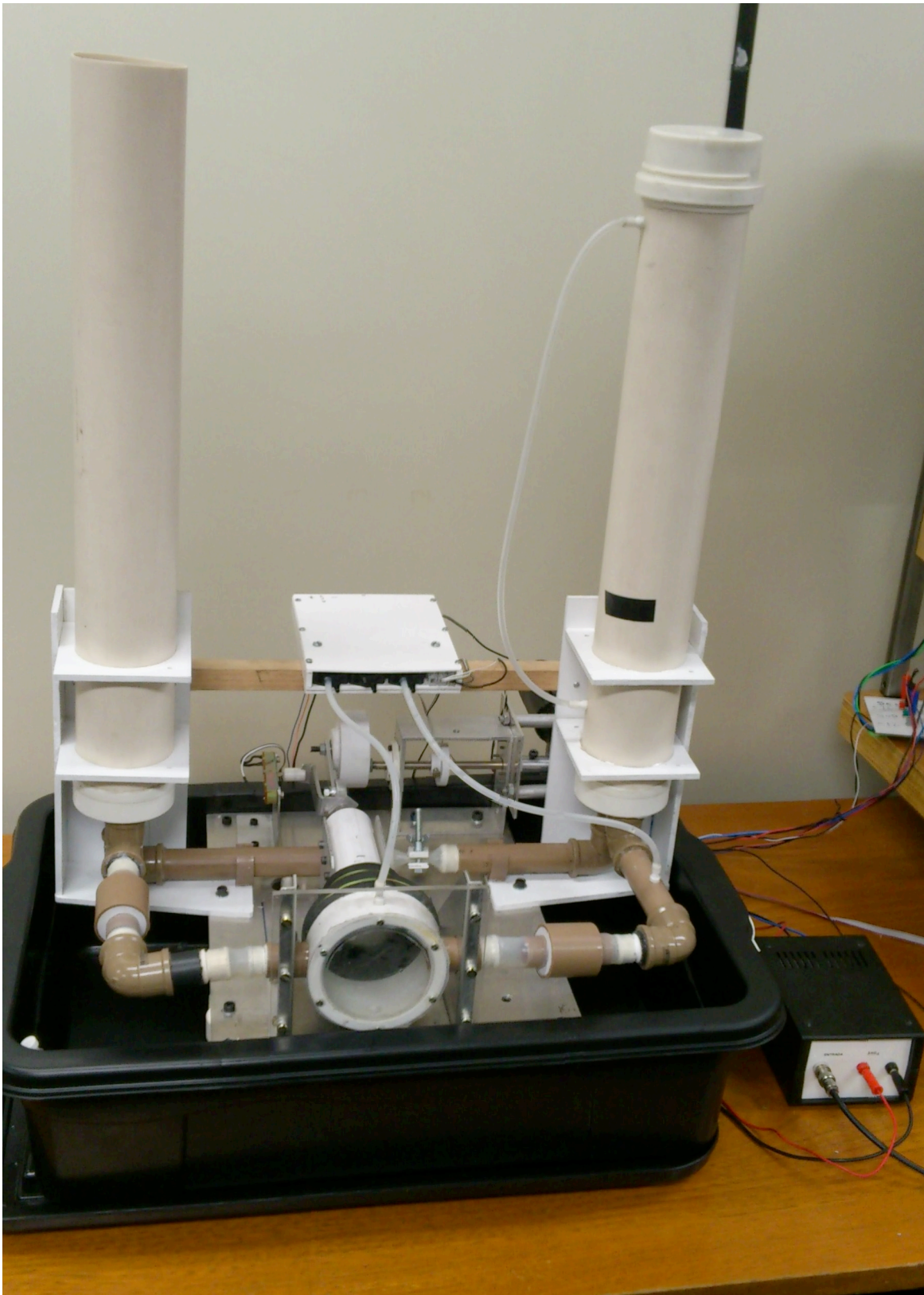


Figura 23 - Figura anterior ampliada.



Além destes componentes visíveis pela imagem, constam também do protótipo o computador que realiza o algoritmo de controle e em que está instalada a placa A-D/D-A; a fonte de bancada que alimenta o circuito dos sensores de pressão e o amplificador de potência; a fonte de 12V que alimenta o circuito do sensor de posicionamento e o osciloscópio que permite a visualização da curva de pressão em tempo real.

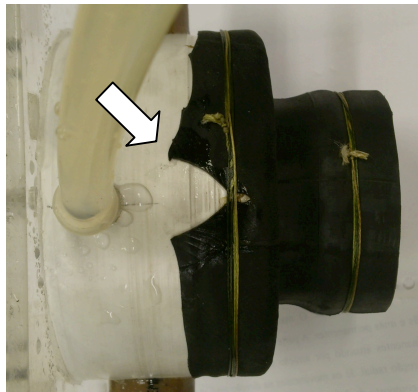
2.7.1 Subsistema de Bombeamento

Nesta seção são apresentados detalhes construtivos sobre os componentes mecânicos que integram o subsistema de bombeamento.

2.7.1.1 Conjunto Câmara e Pistão

Devido a facilidade de usinagem e uma resistência mecânica relativamente elevada, o PVC é empregado em diversas porções do simulador, inclusive na câmara de bombeamento e no pistão. Depois de usinadas, as peças foram unidas e vedadas com uma membrana de borracha. Inicialmente, a maior preocupação com esta borracha está numa eventual falha por fadiga, visto que ela seria esticada e relaxada inúmeras vezes durante o funcionamento da bomba. No entanto o que ocorreu foi uma falha devido a um pequeno rasgo na membrana, o que se propagou tal qual uma trinca. A Fig. 24 mostra esta falha. A membrana foi fixada à câmara com o uso de cordões multifilamento de aramida. Para fechar a câmara e ainda ser possível visualizar seu interior, foi utilizada uma chapa de acrílico retangular, que também auxiliou na fixação da bomba à base.

Figura 24 - Membrana rasgada.



Foram construídas válvulas com o mesmo princípio das valvas bicúspides (válvulas mitrais) para utilização neste protótipo. Estas válvulas consistem em tubos de látex, com duas presilhas de alumínio em uma de suas extremidades. Quando há pressão maior num lado a válvula abre, caso contrário ela fecha.

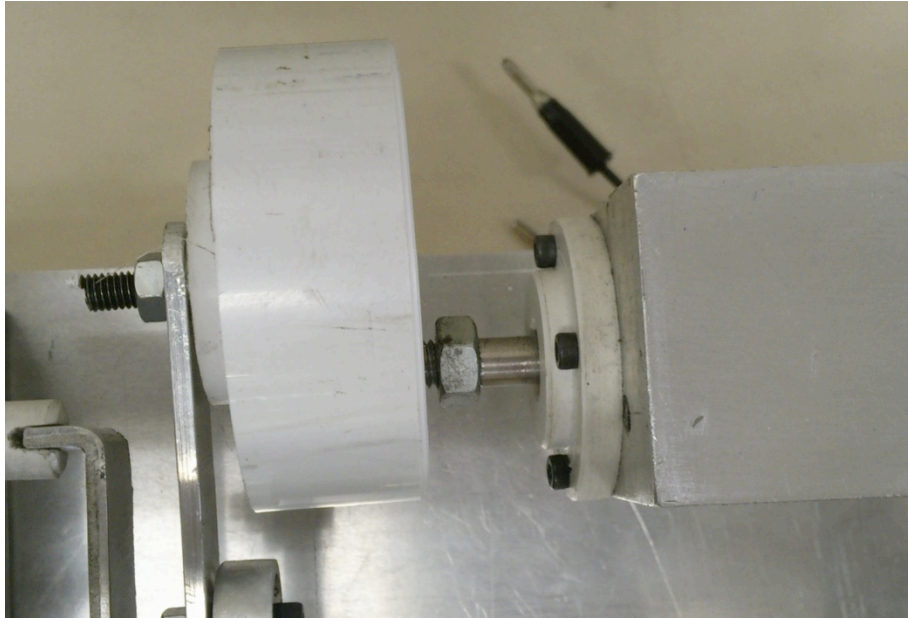
Foi feito um revestimento para as válvulas com PVC e tubo de PVC, para evitar vazamentos e para fixar as válvulas à bomba. Além disso, a câmara e estes revestimentos fora ligados através de tubos e conectores de PVC e mangueiras de plástico.

2.7.1.2 Mecanismo de Acionamento

O acoplador funciona como a manivela do mecanismo de biela-manivela. Para isso, é necessário acoplar o eixo do motor de maneira excêntrica ao elemento que representa a biela, ou seja, foram feitos furos em posições assimétricas nos lados opostos do acoplador. Este acoplador foi usinado a partir de PVC. Se houver necessidade de alterar o tamanho da manivela, basta usinar outro furo na distância que for conveniente. A fixação entre o eixo do motor e do acoplador é devido a uma rosca.

A biela foi usinada a partir de uma haste de alumínio, com os furos posicionados de forma a atender o projeto. Porém foi deixado um sobremetal para o caso de existir a necessidade de alterar o tamanho da biela.

Figura 25 - Detalhe do acoplador com excentricidade entre eixo do motor e eixo de rotação da manivela.



Para fazer a haste do pistão, foi utilizada uma haste cilíndrica de aço, por ser uma peça mais esbelta, necessitando assim de mais resistência do que o alumínio, na qual foram usinadas roscas nas extremidades. Para fazer o acoplamento de biela e haste do pistão foi usinada uma peça de alumínio com rosca interna por onde a haste anterior é rosqueada e com um furo onde o mancal é encaixado.

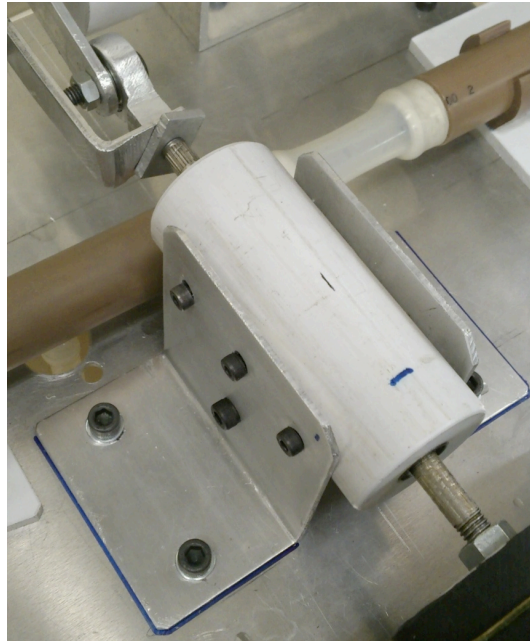
Figura 26 - Detalhes da peça que acopla haste à biela



Para fazer o acoplamento entre o acoplador e a biela e entre a biela e a haste do pistão, foram utilizados mancais de esfera.

Foi utilizada uma bucha de esferas recirculantes da Schaeffler, de 8mm de diâmetro e 95mm de comprimento, para guiar a haste do pistão. Para fixar esta bucha a estrutura da bomba (a base) foi feito um revestimento de PVC, de 40mm de diâmetro.

Figura 27 - Detalhes do revestimento da bucha



2.7.1.3 Motor

O motor possui um eixo muito curto e não cilíndrico. Foi conectada uma haste cilíndrica a este eixo, tornando-o mais comprido. Para acoplar estes elementos, foi usinada uma peça cilíndrica de alumínio com um rasgo para o eixo do motor de um lado de sua extremidade e um furo para o novo eixo do outro lado. Este novo eixo possui um rebaixo, para fixação do eixo por meio de um parafuso.

O amplificador de potência do motor é alimentado por uma fonte de bancada ajustada para fornecer tensões de +12V e -12V. Esta é a mesma fonte utilizada para o circuito dos sensores de pressão.

Figura 28 - Motor de limpador de para-brisa

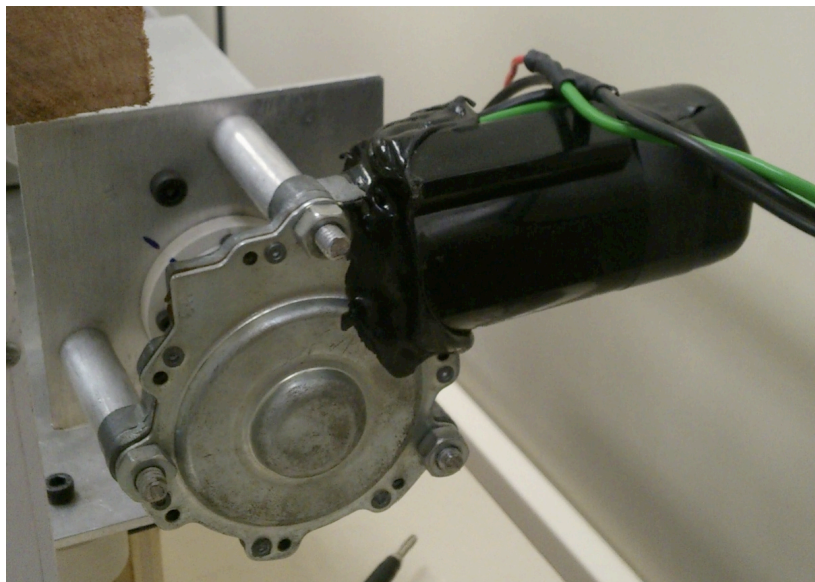


Figura 29 - Eixo prolongado do motor e fixação

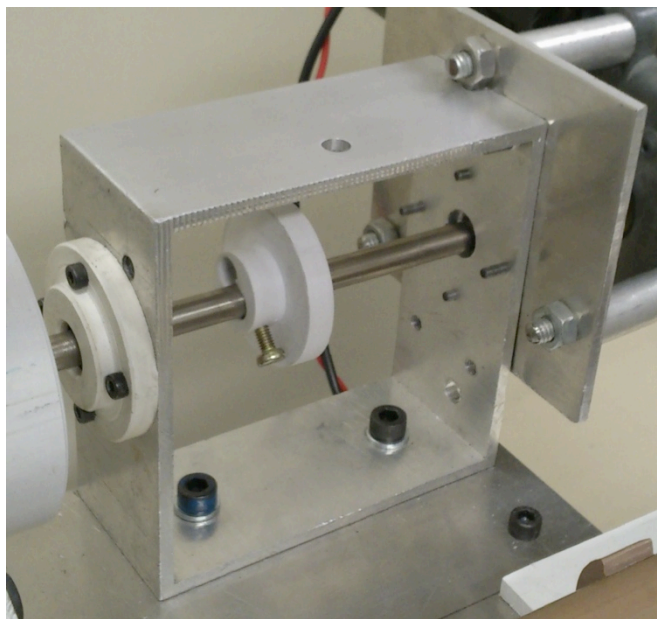


Figura 30 - Acoplamento entre o eixo do motor e o prolongamento do eixo



2.7.1.4 Estrutura e Fixação

Todos os componentes foram posicionados e fixados a uma chapa de alumínio, que está servindo como base para a bomba, para o circuito hidráulico e para os sensores de pressão e o potenciômetro.

A fixação da câmara, bucha e do motor a estrutura foi feita com chapas de alumínio, dobradas em “L” ou num perfil retangular. O acoplamento entre o eixo do motor e a sua estrutura de fixação foi feita com mancais de esfera.

2.7.2 Subsistema de Simulação

O circuito hidráulico utilizado no protótipo foi projetado baseando-se na arquitetura utilizada por Fonseca, et al. (2012) e a fabricação dos componentes foi feita pelo professor-orientador. O objetivo do circuito hidráulico é possibilitar que sejam realizados testes com a bomba.

2.7.2.1 Circuito Hidráulico

Os principais elementos do circuito hidráulico são os reservatórios e a restrição.

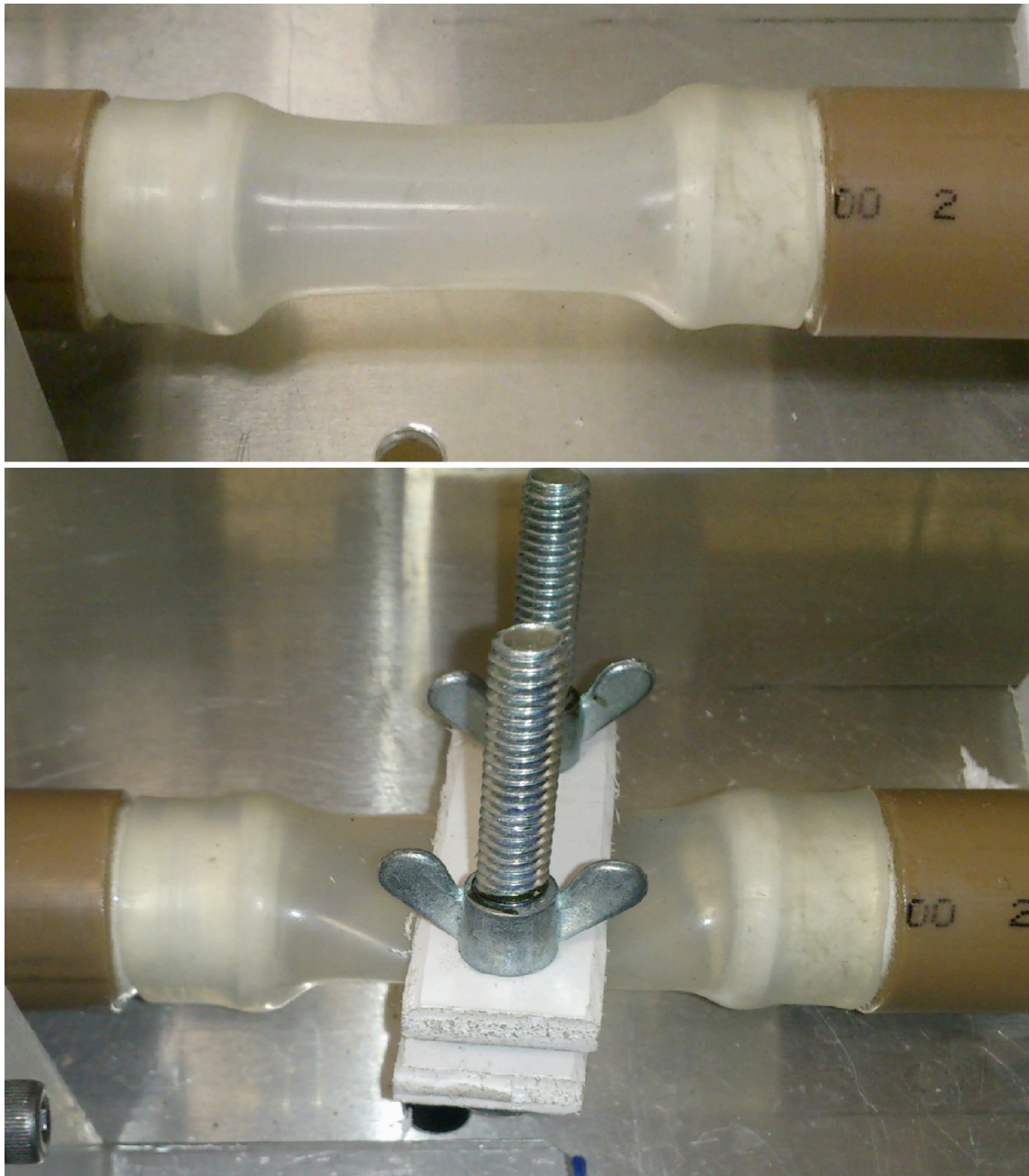
O circuito hidráulico foi feito com tubos e conectores de PVC, e mangueiras de plástico. Foram usinados conectores em PVC, para conectar as mangueiras aos tubos. Também foram feitas duas zonas de drenagem de fluido, para esvaziar o circuito. Uma na região inferior da câmara e outra próxima à entrada do reservatório de acúmulo. Os tubos e mangueiras usados possuem diâmetro de 25mm.

Foi utilizado PVC para o circuito por ser um dos materiais mais utilizados em encanamentos domésticos, havendo assim grande diversidade de tamanhos e grande diversidade de elementos padronizados, facilitando a obtenção e utilização dos elementos. Para fazer os encaixes, foi utilizada cola de PVC.

Os reservatórios são cilíndricos e possuem 75mm de diâmetro e cerca de 600mm de altura, porém estas dimensões não são críticas, apenas tomou-se cuidado para o volume total de fluido durante o funcionamento não ser pequeno. O reservatório de acúmulo está aberto, estando à pressão atmosférica, enquanto o de complacência está fechado, para ser possível aplicar pressão neste reservatório. Também foi feito um vaso comunicante neste reservatório para verificar o nível de fluido nele antes de iniciar o funcionamento da bancada e aproveita-se o escape superior para fazer retirada inicial de ar do reservatório, sendo possível regular a quantidade inicial de ar e água no reservatório.

A restrição está sendo aplicada a uma mangueira que participa na realimentação de fluido do reservatório de complacência para o de acúmulo. Para demarcar o nível de restrição, foi feita uma marca a tinta nos parafusos da restrição. A restrição aplicada corresponde a uma distância de 5mm entre as chapas. Nesse ponto do circuito hidráulico, quando não está sendo aplicado nenhum estrangulamento, a seção transversal é um círculo de 491mm^2 de área. Quando aplicada a restrição, a seção transversal da mangueira é um retângulo de área de cerca de 175mm^2 , o que representa 36% da área anterior. Com este dimensionamento, é possível estimar a resistência hidráulica da restrição.

Figura 31 - Mangueira com e sem restrição



O circuito está preso à base utilizando estruturas de madeira.

2.7.3 Subsistema de Aquisição

Montou-se uma caixa para armazenar os sensores de pressão e seus circuitos, e conectar os fios que ligam o potenciômetro a sua fonte e outra caixa para facilitar o acesso aos conectores que

ligam os pinos utilizados da placa A-D/D-A. Além destes fatores, um osciloscópio é usado para monitorar a pressão na saída da bomba em tempo real.

2.7.3.1 Placa A-D/D-A

A placa A-D/D-A foi conectada ao computador, que executa o algoritmo de testes de controle, através de um conector ISA. Além disso, utilizou-se um cabo flat para conectar as entradas e saídas da placa que serão utilizadas a um barramento com conectores, bastando ligar estes conectores aos sensores de pressão e à entrada do amplificador.

2.7.3.2 Sensores

Como no início não havia certeza de quantos sensores de pressão seriam usados, foram montados 3 circuitos (sensor + amplificador). Mas, como apenas uma medição de pressão está sendo feita, apenas um dos sensores está sendo utilizado. Foi construída uma caixa para abrigar os circuitos e anexá-los ao circuito hidráulico.

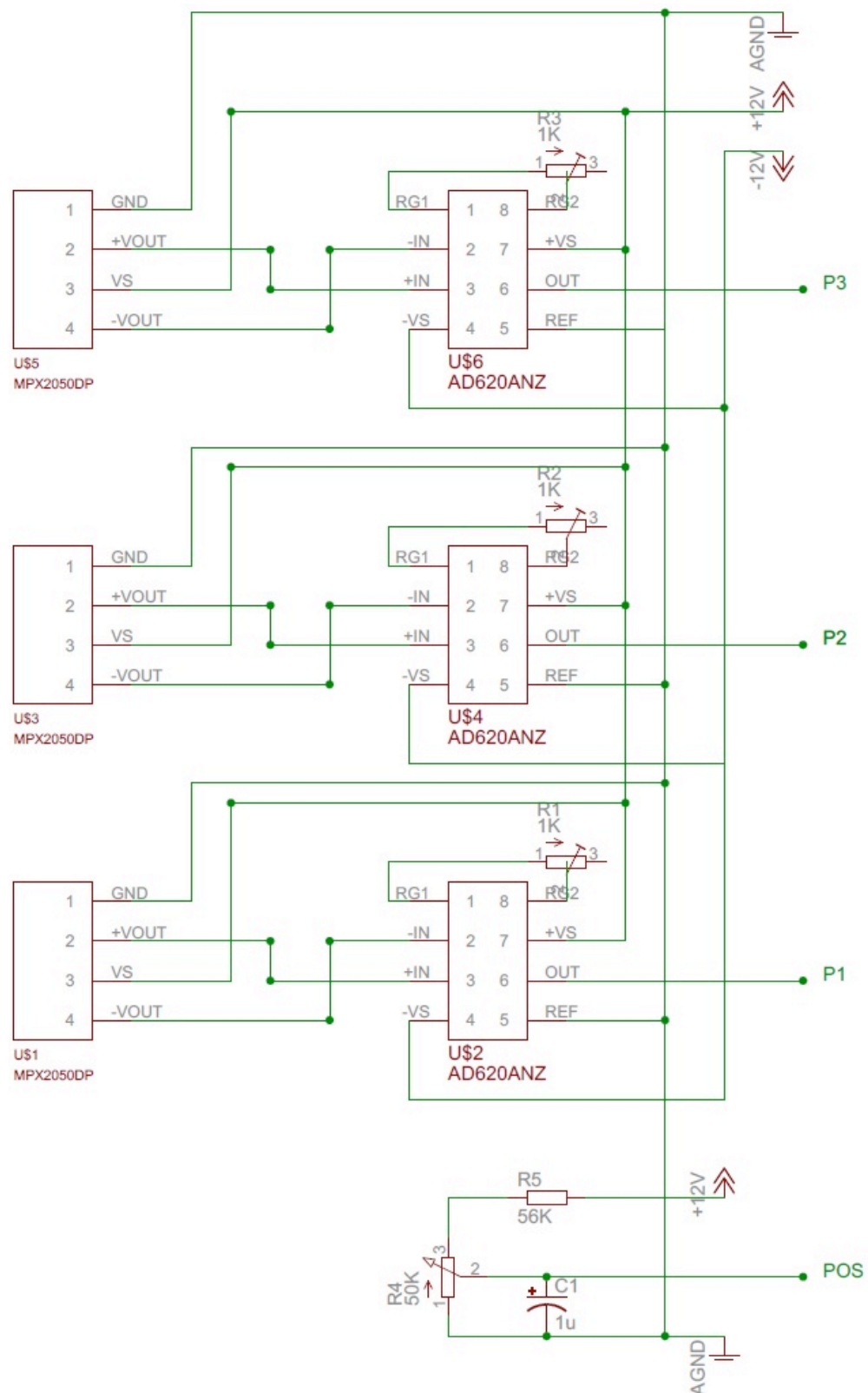
O potenciômetro foi preso a base da bomba por meio de uma chapa de alumínio dobrada em “L”, e seu cursor está vinculado a haste do pistão, por meio de um acoplador de borracha e uma chapa de alumínio.

Figura 32 - Potenciômetro acoplado à haste do pistão



O circuito dos sensores de pressão é alimentado com uma fonte de bancada, a mesma que alimenta o amplificador de potência. Para isso, foi feita uma chapa com conectores ligados aos conectores da fonte. O potenciômetro é alimentado com uma fonte de tensão fixa e nominal de 12V, pois a tensão de alimentação influencia muito a calibração do potenciômetro. A seguir um esquema do circuito com os sensores.

Figura 33 - Circuito eletrônico dos sensores



Para verificar se o potenciômetro estaria filtrando o sinal sem introduzir um atraso de fase ou atenuação do sinal (com relação ao sistema sem filtragem), foram testados capacitores de $10\mu\text{F}$, $1\mu\text{F}$ e $0,1\mu\text{F}$. Acionou-se o motor em malha aberta, com a mesma configuração em todos os testes (nível de água baixo, nível de restrição alto e sinal de 1V para o amplificador de potência). Observou-se que o capacitor de $10\mu\text{F}$ gerava atraso de fase e atenuação do sinal, enquanto os outros dois não apresentavam atraso e atenuação. Também foi observado que o ruído do sinal filtrado dos capacitores varia pouco (variação de cerca de 30mV), então é possível empregar um capacitor com capacitância numa faixa de valores entre 1 e $0,1\mu\text{F}$. Os sinais de posição adquiridos com um osciloscópio para o circuito sem e com capacitor é apresentado.

Figura 34 - Sinal de posição sem capacitor

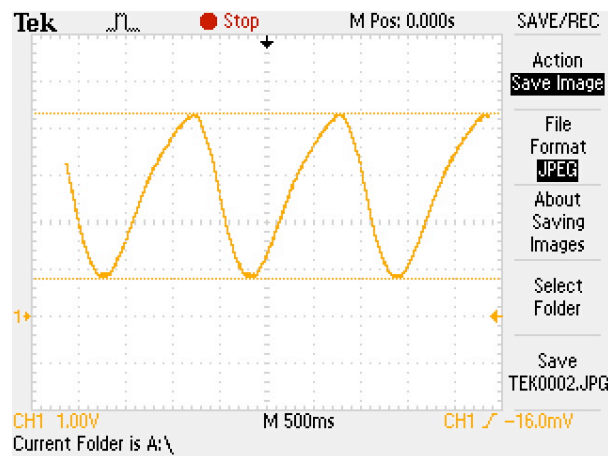
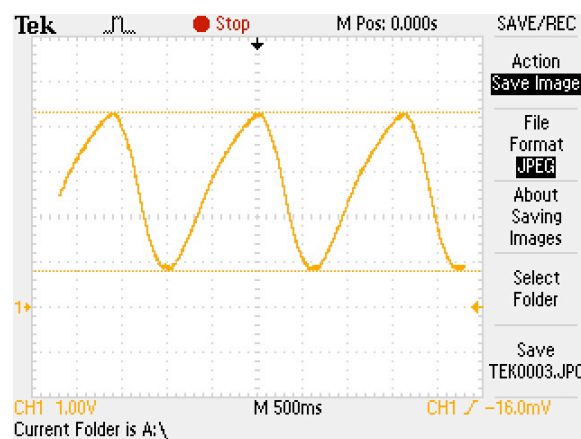


Figura 35 - Sinal de Posição com capacitor de $1\mu\text{F}$.



Ambos os sinais apresentaram período de 1,62s, tensão mínima de 0,92V e tensão máxima de 4,4V.

2.7.4 Subsistema de Controle

Toda a programação desenvolvida neste projeto foi feita na linguagem Pascal, utilizando o software TurboPascal 7.0. O algoritmo de atuação sobre o motor foi implementado utilizando vetores que armazenam as variáveis de controle (pressão medida, erro, esforço, referência) a cada posição do pistão. As posições do pistão foram discretizadas em 0.1mm, então num deslocamento de 30mm (de -15 a 15mm), haverá 301 posições em cada vetor. Caso uma mesma posição seja medida mais de uma vez, é feito uma média ponderada pelo número de vezes em que aquela posição foi medida com o valor já armazenado para aquela posição.

São usados o canal 14 para aquisição do sinal de posição e canal 10 para aquisição do sinal de pressão. A saída analógica 1 é usada enviar o sinal de controle para o amplificador.

Para determinar o ângulo do motor, é utilizada a posição do pistão através de um cálculo do arco cosseno. Porém, só com esta informação não é possível determinar o ângulo. Então, o programa só realizará a primeira medição quando o motor estiver no 1º ou 2º quadrante. Esta convenção é implementada da seguinte forma: ao executar o programa, o motor começa a girar, então o programa espera que qualquer tecla seja pressionada para realizar a primeira medição. Após isso, o programa estará constantemente realizando medições de pressão e posição.

Ao fim de cada ciclo, há a impressão num arquivo de texto contendo os vetores de pressão no avanço, esforço de controle, erro, pressão na volta; o número da volta e a tensão utilizada durante o recolhimento do pistão. Este arquivo é sobrescrito a cada execução, logo deve ser salvo em outro lugar se necessário. Os valores de pressão são dados em milímetros de mercúrio e os outros em volts.

Foram determinados níveis de saturação para o controlador: mínimo de 0,45V (pois para menos de 4V não há resposta do motor) e máximo de 1,5V (pois para mais do que isso, a saída no amplificador não muda). Além disso, como há regiões de singularidade, o algoritmo não atua nessas regiões para evitar instabilidades no sistema.

2.8 Testes

Foram realizados testes nos componentes para avaliar o seu funcionamento. A apresentação nesta seção será dividida por elementos testados. Em sua apresentação, os procedimentos de sua execução são descritos, uma análise é feita e conclusões com as consequências para este trabalho são exibidas.

2.8.1 Motor

Foram realizados testes para verificar o funcionamento do motor e do amplificador de potência. Foram realizados testes com o motor sem carga (apenas acoplado ao mecanismo) e com carga (líquido no circuito hidráulico, com quantidade de líquido semelhante aos demais testes) e com o motor ligado numa fonte de bancada e no amplificador de potência.

Com a configuração referente ao teste a ser feito, alterou-se pouco a pouco a tensão – tensão de saída da fonte ou tensão enviada à entrada do amplificador de potência – e foram observados elementos tais como velocidade do motor, corrente e tensão de alimentação para avaliar o desempenho do motor naquela configuração.

A velocidade foi observada medindo-se o tempo em que o motor levava para completar um determinado número de voltas, a corrente foi observada olhando para o display de corrente da fonte de bancada e a tensão de alimentação foi observada medindo-a com um multímetro ou osciloscópio, caso a medida com o multímetro indicasse um valor muito oscilatório.

Com o motor ligado direto na fonte, notou-se que seu comportamento é muito semelhante com ou sem carga. Há pouca perda de velocidade, a tensão de alimentação é constante e o motor puxa

mais corrente com carga. Também foi notado que o motor não respondia quando a tensão de alimentação fosse menor do que cerca de 4V.

Com o motor sendo alimentado pelo amplificador de potência, notou-se que a tensão de alimentação passou a ter um comportamento oscilatório, mesmo sem oscilar a tensão de entrada do amplificador. Foi adquirido este sinal, junto com o de entrada do amplificador e com o sinal de posição.

Sem carga, notou-se uma oscilação menor que ocorria quando o motor estava chegando ao final do avanço. Porém notou-se que a tensão medida não correspondia a curva levantada do amplificador, apresentada em seção anterior. Então, variando-se a tensão na entrada do amplificador, foram obtidos os pontos na Tab. 11. Os valores de saída são valores medianos (entre os picos máximo e mínimo).

Tabela 11 – Dados de calibração do amplificador de potência

Entrada (V)	Saída (V)
0,2	0,96
0,3	1,84
0,4	2,72
0,5	3,6
0,6	4,4
0,7	5,3
0,8	6,2
0,9	7,0
1,0	7,8
1,1	8,6
1,2	9,4
1,3	10,1
1,4	10,6
1,5	10,9

Notou-se que a partir de uma entrada de 1,5V, a saída de tensão pouco muda. Na região linear da curva (até cerca de 1,2V), fazendo regressão linear dos pontos chegou-se a curva mostrada na Eq. (39).

$$V_s = 8,4V_e - 0,62 \quad (39)$$

Por fim, foram adquiridas imagens do osciloscópio com os sinais de saída, entrada (ajustada com valor de 1V) e de posição.

Figura 36 - Canal 1 com tensão de saída, oscilando entre 7,5 e 8,2V e canal 2 com entrada do amplificador

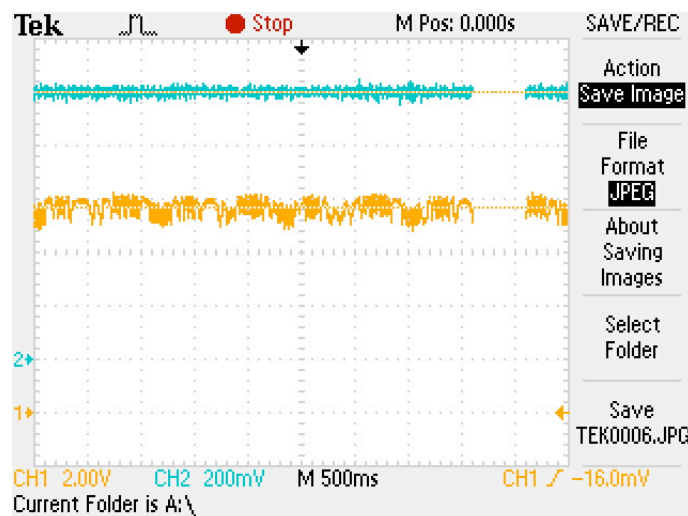
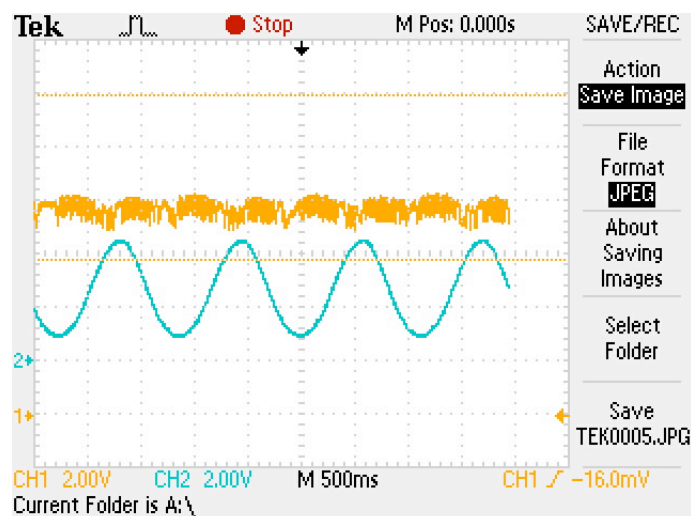


Figura 37 - Canal 1 com saída de tensão e canal 2 com sinal de posição



Das Figs. 36 e 37, nota-se que quando o pistão está chegando ao final do avanço (sinal de posição chegando a seu valor máximo), há uma leve redução no sinal de saída.

Adicionando carga ao motor, o mesmo procedimento de aquisição de sinais a partir do osciloscópio foi feita.

Figura 38 - Canal 1 com Tensão de Saída, oscilando entre 6 e 8V e Canal 2 com Entrada do Amplificador

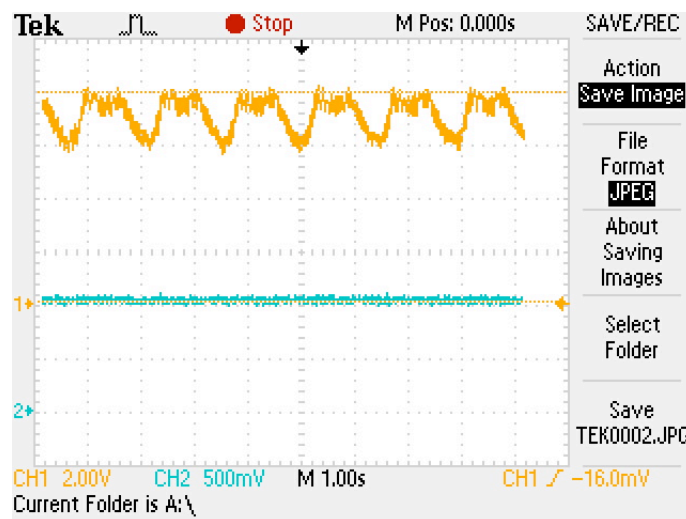
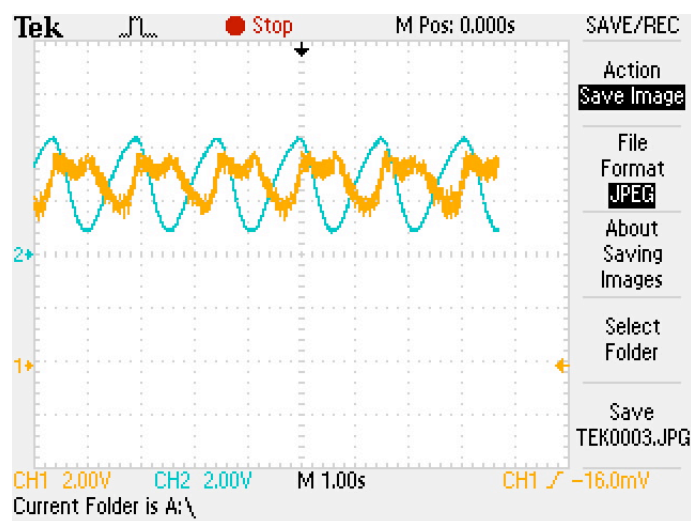


Figura 39 - Canal 1 com Saída de Tensão e Canal 2 com Sinal de Posição



As mesmas observações podem ser feitas, mas num grau maior. Quando o pistão está retornando (sinal de posição diminuindo), o comportamento é semelhante ao caso anterior. Porém, quando o pistão está avançando, há uma queda progressiva na tensão de saída. Para uma entrada de 1V, esta queda chega a ser de 2V.

Com estes dados, pode-se concluir que embora o motor consiga lidar com a carga imposta sobre ele, há uma saturação no amplificador de potência devido à limitação de corrente.

2.8.2 Circuito Hidráulico

Uma análise da influência da restrição e do nível inicial de coluna de água e consequentemente da coluna de ar no reservatório de complacência na pressão de saída da bomba foi feita realizando um experimento simples. Este experimento é descrito a seguir, e uma análise é feita, avaliando a influência destes dois fatores.

Variando o nível da coluna inicial de água em três níveis (baixo, médio e alto) e variando a restrição em três níveis (solto, pouco apertado e muito apertado), a bancada de testes foi ligada, operando o motor em malha aberta. Foram adquiridas curvas de pressão com um osciloscópio.

2.8.2.1 Análise da Influência do Nível de Coluna de Ar/Água

Foram realizados testes para avaliar qual a influência do nível inicial de água do reservatório de complacência na resposta do sistema, lembrando que, como o reservatório de complacência é fechado, o nível de água inicial determina diretamente a quantidade de ar dentro do reservatório, quanto maior a coluna de água, menor é a quantidade de ar inicial.

Percebeu-se que este influencia na variação entre a pressão máxima e mínima na saída da bomba, sendo que, quanto menos ar há dentro do reservatório, maior é a variação de pressão. Isto se deve ao fato de que quanto mais ar existe dentro do reservatório maior a resistência que esta quantidade maior de ar exerce, havendo um efeito parecido com o de mola. A Tab. 12 mostra dados experimentais coletados que ilustram esse comportamento.

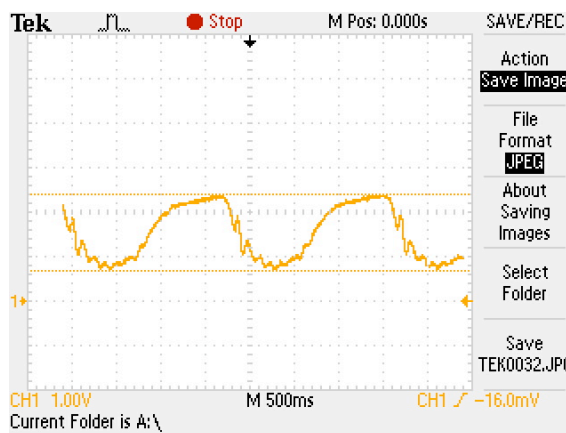
Tabela 12 – Dados experimentais do teste de variação da coluna de água do reservatório de complacência

Coluna de Água	ΔP (mmHg)	$P_{\text{máx}}$ (mmHg)
Baixo (23 cm)	31,99	57,12
Médio (38 cm)	47,22	75,40
Alto (49 cm)	65,51	89,11

Figura 40 – Leitura do sensor de pressão na saída da bomba feita com o osciloscópio no teste de variação da coluna de água no reservatório de complacência. Teste realizado com nível baixo da coluna de água



Figura 41 - Leitura do sensor de pressão na saída da bomba feita com o osciloscópio no teste de variação da coluna de água no reservatório de complacência. Teste realizado com nível alto da coluna de água



Estes resultados comprovam o que já havia sido concluído com a modelagem do circuito hidráulico de que para uma mesma frequência da bomba, quanto menos ar há no reservatório, menor a resistência encontrada pelo fluido de entrada, logo a variação de pressão, e consequentemente o valor da pressão, será maior.

2.8.2.2 Análise da Influência da Restrição

Foram realizados testes para avaliar qual a influência da restrição na saída do reservatório de complacência na resposta do sistema

Verificou-se que quanto mais apertada a restrição, maiores os valores de pressão obtidos, sendo que há uma pequena alteração na variação entre pressões mínima e máxima. Isto se deve ao fato de quanto maior a restrição aplicada, maior será o esforço necessário ao bombeamento. O que foi observado é que variando a restrição a curva se move verticalmente, havendo uma pequena alteração em seu comportamento.

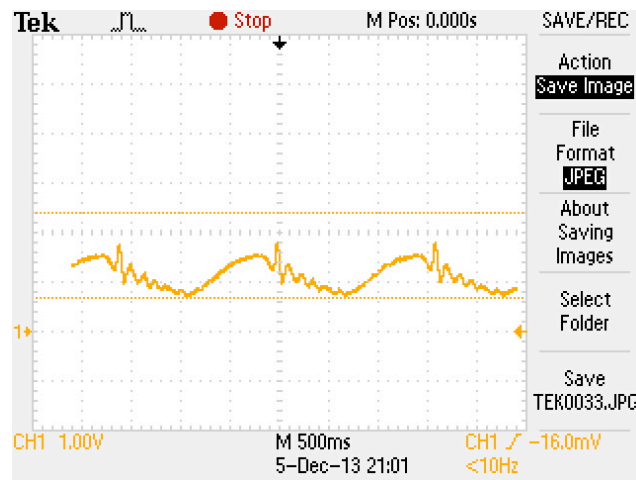
Tabela 13 - Dados experimentais do teste de variação da restrição na saída do reservatório de complacência

Nível de Restrição	ΔP (mmHg)	$P_{\text{máx}}$ (mmHg)
Sem Restrição	33,51	17,51
Pouco Apertada	30,47	25,13
Muito Apertada	31,99	57,12

Figura 42 - Leitura do sensor de pressão na saída da bomba feita com o osciloscópio no teste de variação da restrição na saída do reservatório de complacência. Teste realizado sem restrição



Figura 43 - Leitura do sensor de pressão na saída da bomba feita com o osciloscópio no teste de variação da restrição na saída do reservatório de complacência. Teste realizado com a restrição muito apertada



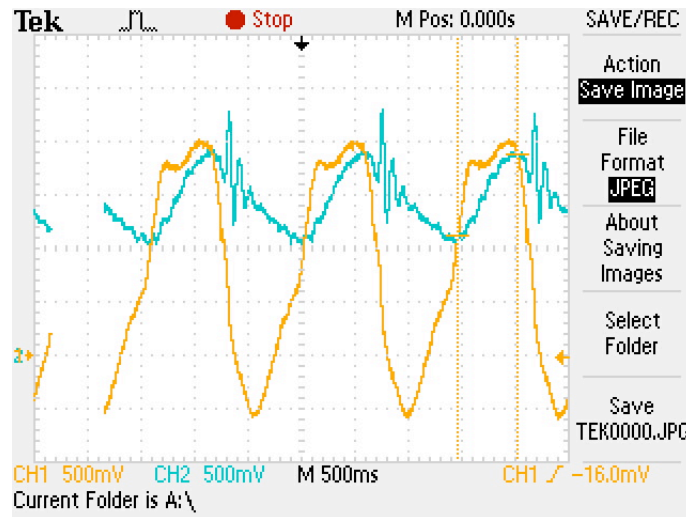
2.8.3 Controle

2.8.3.1 Teste de Atraso na Resposta da Pressão

Foi feito um teste para verificar o atraso entre a pressão no interior da câmara e a pressão após a válvula de retenção. O pistão atua na pressão no interior da câmara, porém devido à membrana elástica há uma dinâmica entre estes dois elementos (pistão e câmara) que pode gerar atrasos, porém não foi possível verificar esta dinâmica com os recursos de que o projeto dispõe no momento.

Acionando o motor em malha aberta, foram observadas com o osciloscópio as pressões no interior da câmara e na saída da bomba. Uma destas imagens capturadas do osciloscópio é utilizada para realizar a análise.

Figura 44 - Sinais de pressão no interior da câmara (em amarelo) e na saída da bomba (em azul).



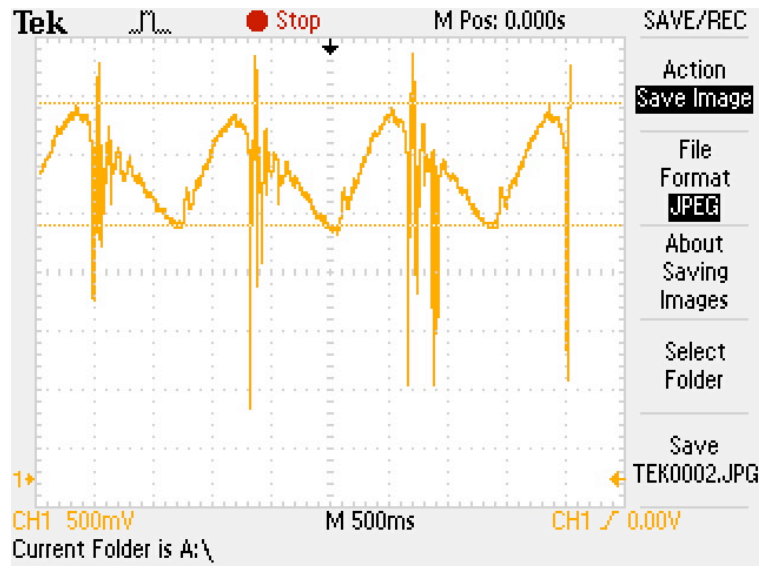
Em amarelo o sinal de pressão no interior da câmara e em azul o sinal de pressão na saída da bomba.

Verificou-se que há uma defasagem entre as pressões. A partir desta imagem, também é possível concluir que a bomba só atua no sistema durante menos da metade de um ciclo de bombeamento, pois a bomba só influencia a resposta na saída do sistema quando a pressão na câmara é maior do que a pressão na saída. Isto evidencia a necessidade de outro sistema de atuação para que o sistema de simulação emule o comportamento do sistema real na região da aorta, além de uma inclusão de um termo de avanço de fase na malha de controle.

2.8.3.2 Testes de Atuação de Controle sobre o Motor

Foram realizados os testes para verificar o funcionamento do algoritmo de atuação sobre o motor do sistema.

Figura 45 - Resposta do sistema com o controlador medida com o osciloscópio. As linhas horizontais indicam os níveis de tensão que representam os limites de pressão desejados para o sistema de 80 e 120 mmHg



Como se pode ver na Fig. 45, com o algoritmo em funcionamento a resposta do sistema começou a apresentar mudanças em seu perfil, porém o sistema ainda não atingia os níveis de pressão desejados.

Analisando o sistema, percebeu-se que o sistema já estava operando com o máximo de sua capacidade. Os comandos de tensão enviados ao amplificador de potência ultrapassavam os limites do sistema, fazendo com que o amplificador de potência trabalhasse no máximo de seu limite de operação e entregasse a sua maior tensão possível na maior parte do ciclo de operação, além disso, a restrição na saída do reservatório de complacência estava quase totalmente fechado. Portanto, não havia maneira de aumentar a pressão de operação do sistema.

Ao operar o sistema nessas condições, é possível notar o aparecimento de grandes perturbações na resposta do sistema, elas são geradas pela válvula de retenção na saída da bomba. Já havia sido notado que as válvulas causavam perturbação na saída do sistema, mas elas são intensificadas quando o sistema é operado nessas condições. Mais comentários sobre as válvulas serão feitos em seções posteriores deste trabalho.

Começou-se a observar também uma instabilidade em alguns dos componentes da estrutura, havendo a possibilidade de rompimento de alguns dos componentes. Para não comprometer a integridade do equipamento, optou-se por fazer a operação em um patamar mais baixo de pressão.

Definiu-se então uma faixa de operação em que fosse possível trabalhar com o sistema com mais tranquilidade. Analisando o sistema, foi concluído que ele trabalharia tranquilamente na faixa de 30 a 70 mmHg. Para não precisar fazer grandes alterações no controlador, optou-se por apenas recalibrar o sensor de pressão. Definiu-se que o controlador calcularia uma tensão de 0,92V no sensor como sendo uma pressão de 80 mmHg e uma tensão de 1,86V, uma pressão de 120 mmHg.

Tabela 14 – Tabela de equivalência para nova calibração do sensor de pressão

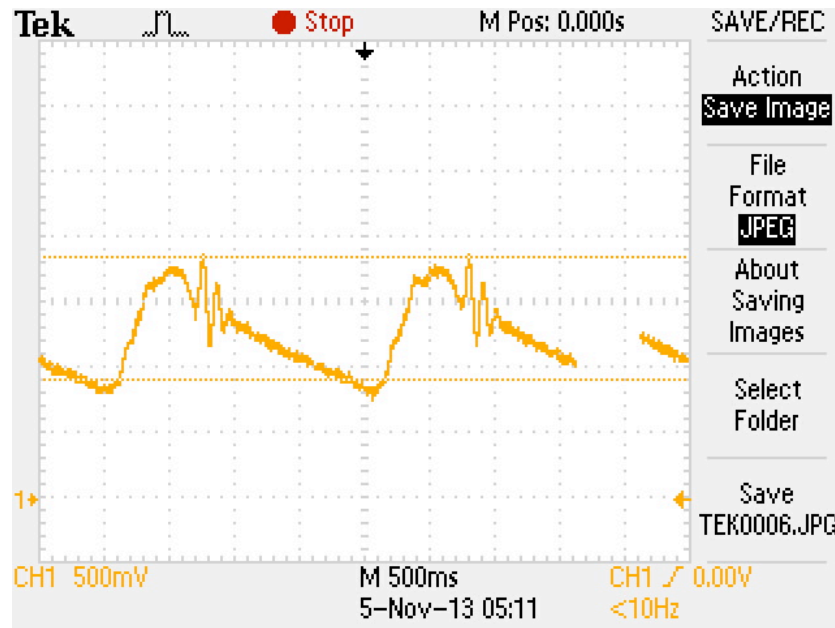
Tensão(V)	Pressão(mmHg)
0,92	80
1,86	120

Como comparação, os níveis reais de tensão são 2,16V para 80 mmHg e 3,21V para 120 mmHg. A nova curva de calibração é a Eq. (40).

$$P(V) = 42,553191V + 40,851063 \quad (40)$$

Com os novos níveis de tensão, efetuou-se novos testes do controlador e foram obtidos resultados como o ilustrado na Fig. 46.

Figura 46 - Resposta do sistema depois das alterações no controlador monitorada com o osciloscópio. As linhas horizontais indicam os limites de pressão desejado para o sistema.



Pode-se perceber pela Fig. 46 que diminuiu a perturbação gerada pela válvula na resposta do sistema. Além disso a resposta ficou um pouco mais estável, o que facilitou análises posteriores.

Nessa faixa de operação, o sistema pareceu mais seguro do ponto de vista estrutural. Porém o amplificador continuou a limitar a corrente, não disponibilizando corrente o suficiente para o motor corresponder ao comando de controle, o que era esperado a partir de testes anteriores. Porém neste faixa, é possível ver o controlador funcionando, o que era quase imperceptível, visto que na faixa anterior a resposta do sistema estava sempre abaixo da referência, o que fazia com que o esforço de controle subisse, até atingir a saturação do controlador, que trabalhava sempre saturado, apresentando desempenho semelhante a um comando em malha aberta com sinal de comando constante.

Além disso, o controle proposto não apresenta nenhum requisito quanto ao tempo de cada ciclo. Nos testes realizados, o tempo de cada ciclo é de, em média, 1,6 segundos, diferente da operação de um coração sadio (cerca de 0,85s).

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com os testes de atuação de controle sobre o motor da bomba.

3.1 Discussões

O objetivo deste trabalho é iniciar o desenvolvimento de um sistema de simulação cardiovascular e um dos aspectos que seria analisado é o efeito de atuações sobre a velocidade do motor na resposta do sistema. Para isso foi desenvolvido o algoritmo de atuação descrito em seções anteriores deste trabalho.

Sistemas de simulação cardiovascular, em geral, têm o interesse de controlar pelos menos duas variáveis da resposta: a pressão e vazão. Para controlar essas duas variáveis seria necessário utilizar, ao menos, duas formas de atuação. Como este trabalho tem apenas uma forma de atuação (velocidade do motor) não há como conseguir que este sistema reproduza fielmente a circulação sanguínea. O objetivo destes testes é avaliar como a resposta do sistema é influenciada com a variação da velocidade no motor de acionamento da bomba, e determinar como este tipo de atuação modifica o comportamento do sistema.

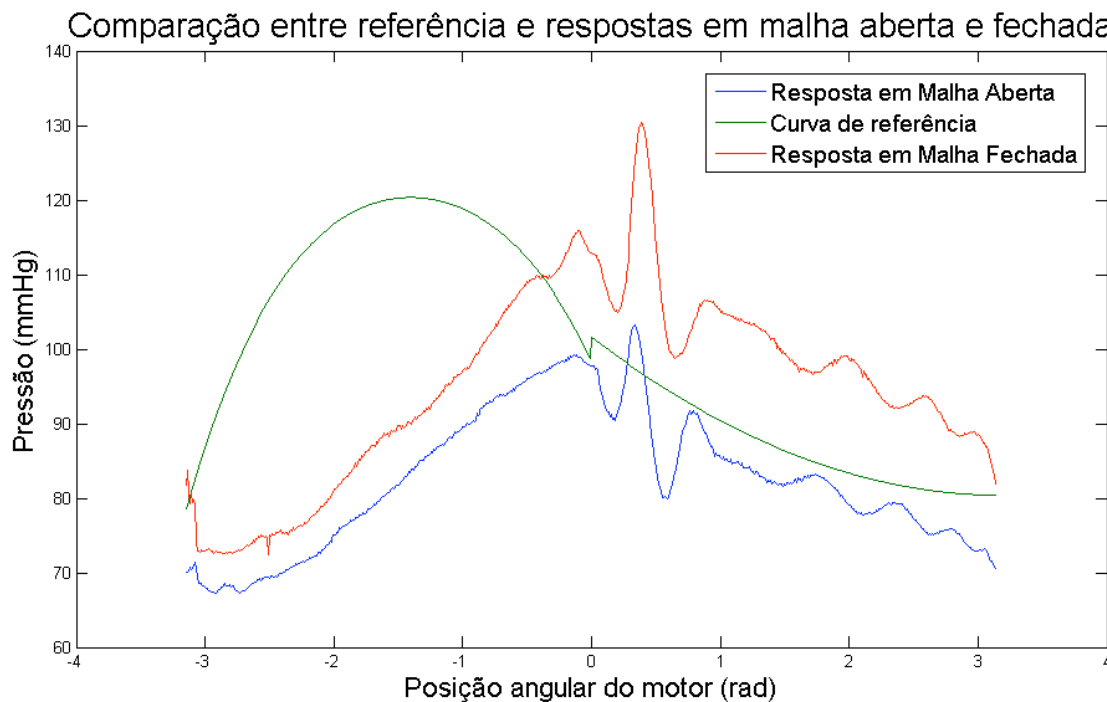
Todos os gráficos apresentados nessa seção são a representação de um ciclo de bombeamento, medido a partir da posição angular do motor. Um ciclo de bombeamento corresponde a uma volta completa do motor, ele se inicia com o pistão completamente recuado (representado no gráfico pela posição angular $-\pi$ do motor), passa pelo avanço do pistão até chegar novamente na posição com pistão completamente recuado (representado no gráfico pela posição angular π do motor). Para os gráficos que representam um ciclo completo de bombeamento, foram utilizados 600 pontos para confeccionar os gráficos, para os gráficos que apresentam apenas a subida de pressão (ou seja, metade do ciclo) são utilizados 300 pontos.

Para avaliar os resultados obtidos, são mostrados gráficos da resposta do sistema operando em malha aberta, ou seja, do sistema com o motor operando em velocidade constante sem fazer a

leitura dos sensores e sem qualquer algoritmo fazendo atuações sobre o sistema e também gráficos do sistema operando em malha fechada, ou seja, operando com o algoritmo de atuação sobre a velocidade do motor em funcionamento.

O primeiro teste do algoritmo foi feito utilizando a curva que representa o funcionamento do coração como referência para o algoritmo de atuação sobre o motor. Foi utilizado o polinômio da Eq. (37) como referência para o algoritmo fazer as atuações sobre a velocidade do motor no avanço do pistão. O polinômio da Eq. (38) não foi utilizado como referência para o algoritmo de controle, já que o retorno do pistão é feito com velocidade constante, porém, como ele representa o funcionamento esperado do coração, ele será utilizado para analisar os resultados obtidos. A plotagem dos dois polinômios pode ser vista na Fig. 47.

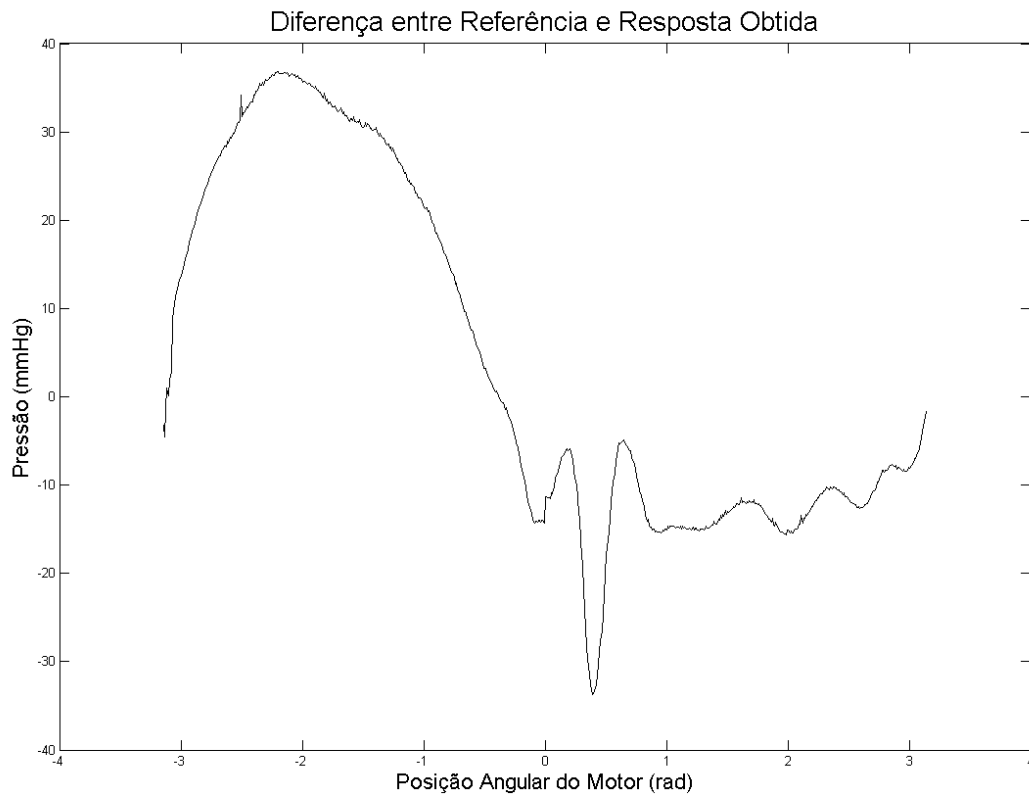
Figura 47 - Comparação entre sistema em malha aberta, malha fechada e curva de referência do algoritmo



Analisando a resposta obtida percebe-se que com atuação sobre a velocidade do motor não foi possível reproduzir o perfil de pressão desejado para o sistema. A resposta deveria apresentar uma subida mais acentuada do nível de pressão, fazendo com que o pico de pressão ocorresse num ponto próximo de -1,2rad e não próximo de 0. A Fig. 48 mostra a diferença entre a curva de

referência e a resposta obtida. Isto foi discutido na modelagem, de que devido à restrição muito apertada, poderia ocorrer o caso em que todo o movimento de avanço do pistão resultasse numa compressão de ar no reservatório de complacência.

Figura 48 – Diferença entre referência e resposta obtida



Pelo gráfico da Fig. 48 pode-se ver que, de fato, o lugar em que ocorre a maior diferença é o início do ciclo. Essa demora deve-se ao atraso do sistema para responder às atuações de controle, devido a diferença de pressão entre a câmara e a saída da bomba, o que faz com que a válvula de retenção entre estes dois elementos esteja fechada nestes instantes iniciais. Além disso, o amplificador de potência limitava a corrente a alimentação do motor, fazendo com que o motor não utilizasse todo o torque possível.

Outro ponto em que a diferença também foi grande foi próximo à posição angular de 0,5 rad. Nesse ponto é observada a perturbação que a válvula de retenção na saída da bomba causa no

sistema, já comentada em seções anteriores deste trabalho. A troca das válvulas pode corrigir esse problema.

A região que apresenta a menor diferença é o fim do ciclo. Pode-se considerar isso como indício de que se pode realmente fazer o retorno do pistão com tensão constante, não havendo necessidade de fazer um controle em cada ponto do retorno.

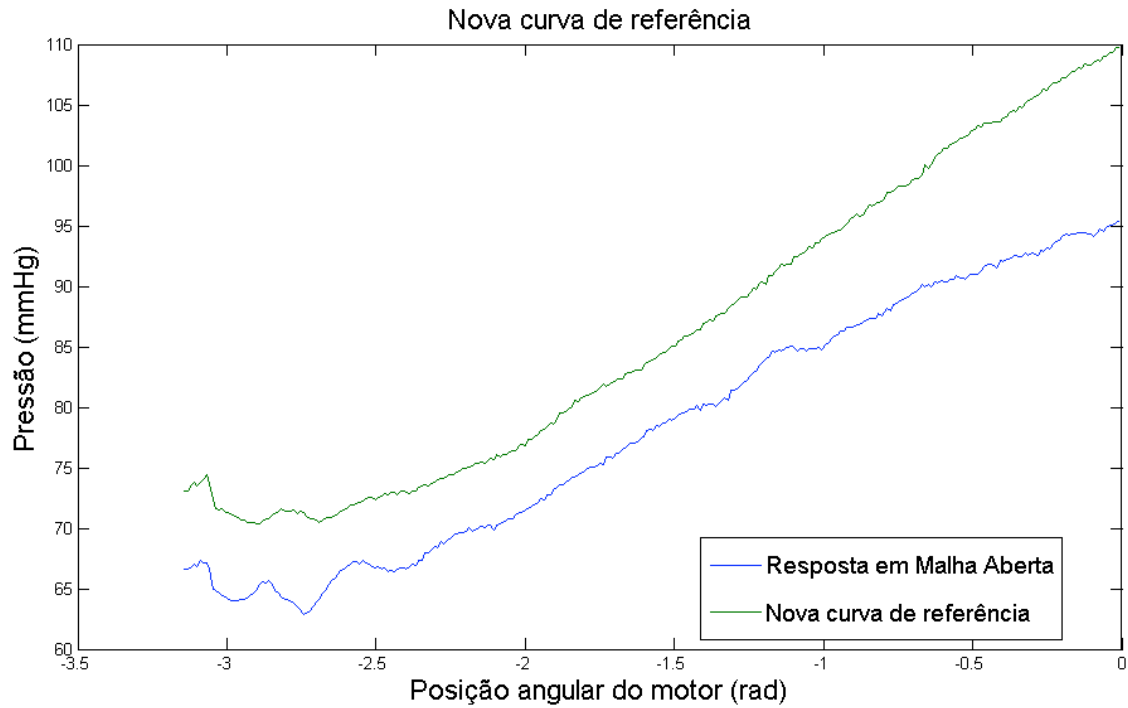
Outro ponto que se pode observar é que a atuação sobre o motor fez com que a resposta do sistema ocorresse em uma faixa melhor de pressão em comparação ao sistema em malha aberta. O funcionamento esperado ocorre com a pressão variando entre 80 e 120 mmHg. A válvula de retenção na saída da bomba impede que ela tenha qualquer influência na resposta do sistema se a pressão no interior da câmara for menor que a pressão na saída da bomba, mas ela tem a ação efetiva quando a pressão na câmara é maior que a da saída. Como a atuação na velocidade do motor consegue aumentar a pressão dentro da câmara da bomba, essa atuação consegue fazer o sistema operar em um patamar mais elevado de pressão.

Os resultados expostos nessa seção mostram que utilizando apenas uma atuação sobre a velocidade do motor não é possível fazer o sistema reproduzir os perfis de pressão da circulação sanguínea humana e nem controlar outras variáveis na resposta do sistema, como a vazão. De fato, são necessárias outras atuações no sistema e a inclusão de outros componentes ativos.

Para uma análise mais completa, o sistema foi testado com outras curvas de pressão de referência. Dessa maneira, esperava-se avaliar melhor como o sistema de controle consegue atuar sobre a resposta do sistema.

Inicialmente foi proposta uma curva de referência que representasse um comportamento próximo ao apresentado pelo sistema em malha aberta. Foi proposta uma curva em que a subida de pressão fosse um pouco mais acentuada que a do sistema em malha aberta e que a resposta do sistema acontecesse em um nível superior de pressão. A Fig. 49 mostra a curva de referência proposta.

Figura 49 - Nova curva de referência, comparada à resposta do sistema em malha aberta

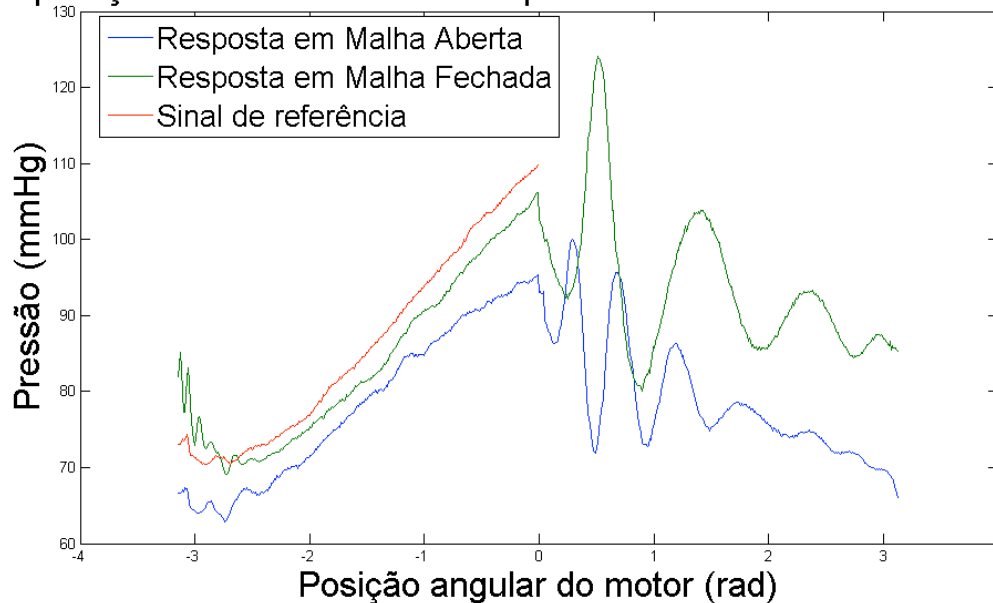


Ressaltando que, no sistema de controle proposto, a atuação de controle seguindo a curva de referência é feita apenas no avanço do pistão.

A Fig. 50 mostra o resultado obtido com a nova referência.

Figura 50 - Comparação entre a resposta do sistema sem controle, a nova curva de referência e a resposta do sistema com o controle

Comparação entre referência e respostas em malha aberta e fechada

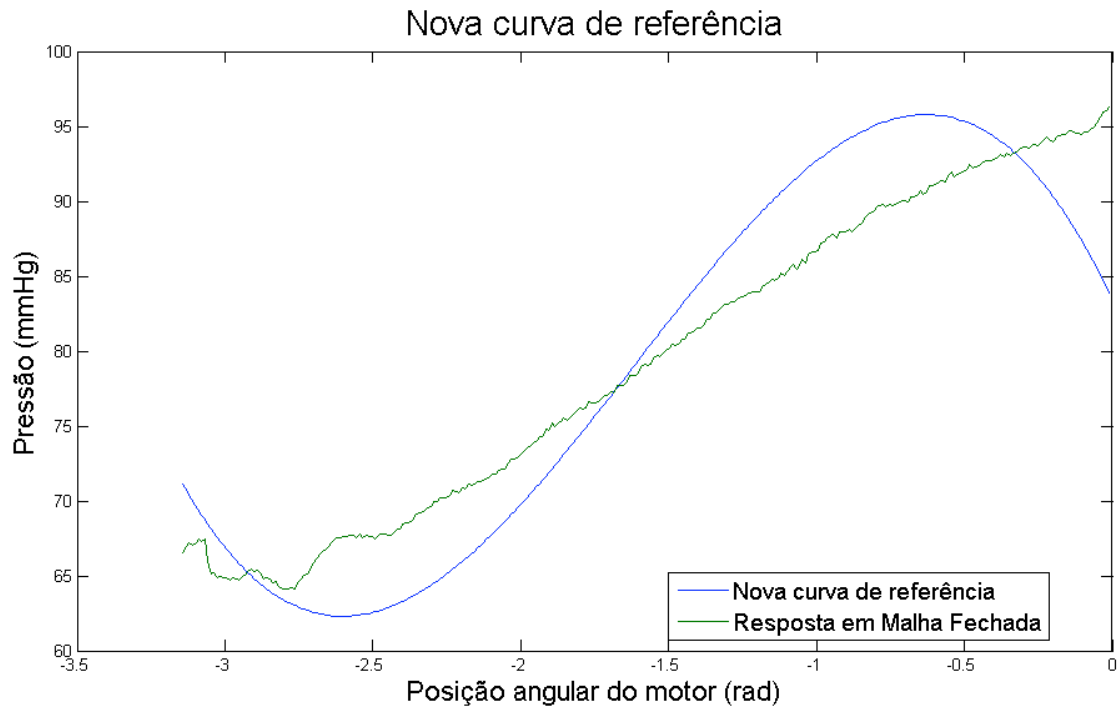


Percebe-se pelo gráfico que o a atuação feita na velocidade do motor fez com que o sistema operasse em um patamar mais elevado de pressão e ele também causou uma subida mais acentuada de pressão, mesmo no fim do avanço do pistão, quando a pressão no sistema em malha aberta subia mais vagarosamente, o sistema em malha fechada continuou com a mesma inclinação da curva de referência.

Porém ainda há diferença entre a curva de referência e a resposta do sistema. Com apenas a atuação sobre a velocidade do motor não foi possível fazer com que o erro em relação a curva de referência seja nulo, mesmo nessa situação em que a curva de referência é mais simples. Conclui-se que o algoritmo de atuação na velocidade do motor consegue, até certo ponto, fazer com que a subida de pressão seja mais acentuada em relação a do sistema em malha aberta, mas não garante que a diferença entre o sinal de referência e a resposta do sistema seja nula.

Então, foi proposta outra curva para ser usada como referência, mais complexa que a anterior. A Fig. 51 mostra a curva proposta.

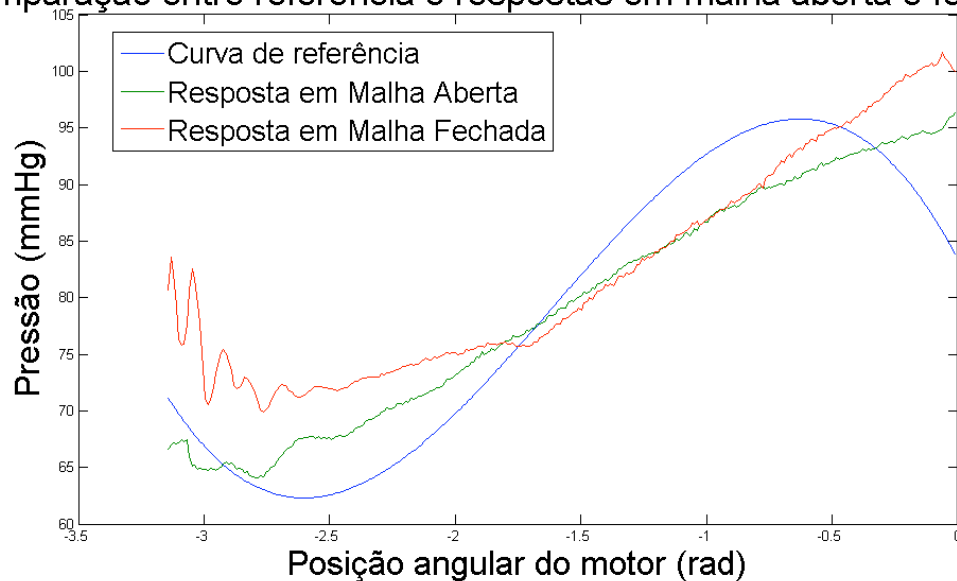
Figura 51 - Segunda curva de referência proposta



Essa nova referência novamente trabalha com valores próximos ao do sistema sem controle, mas desta vez a proposta é de fazer o sistema ter inicialmente um nível mais baixo de pressão seguido por uma subida rápida de pressão. A Fig. 52 mostra o resultado obtido.

Figura 52 - Comparação da segunda curva de referência, do sistema em malha aberta e fechada

Comparação entre referência e respostas em malha aberta e fechada



Pela resposta do sistema, percebe-se que com apenas a atuação sobre a velocidade do motor não é possível diminuir a pressão a um nível muito menor do que o nível ajustado (no caso, 80mmHg). As válvulas de retenção impedem que a pressão dentro da câmara da bomba influencie a pressão na saída da bomba.

Esse teste evidencia também que a atuação sobre a velocidade do motor não consegue fazer o sistema ter subidas muito rápidas de pressão. Isso se deve à saturação que ocorre no amplificador de potência, que não é capaz de fornecer ao motor toda a corrente necessária para que o motor tenha as variações de torque desejadas. Outro fator que pode estar relacionada a esta subida é o dimensionamento do mecanismo.

3.2 Proposta de Melhorias

Nesta seção serão apresentadas áreas do projeto que podem ser melhoradas. Estas soluções são necessárias para corrigir o funcionamento da bomba e/ou visam melhorar o desempenho do sistema e torná-lo mais robusto.

3.2.1 Amplificador de Potência

A principal alteração que precisa ser feita é a troca do amplificador de potência. O amplificador utilizado atualmente não fornece corrente o suficiente para o motor responder ao comando de controle, afetando muito o desempenho do sistema. Deve-se utilizar neste projeto um amplificador que forneça ao menos 5A de corrente para o motor.

3.2.2 Outros Componentes Ativos para o Sistema

Para reproduzir com exatidão a circulação sanguínea, deve-se monitorar mais que a pressão na saída da bomba, outras variáveis como a vazão também devem ser consideradas. Porém não é possível modificar o comportamento do sistema para que ele gere um escoamento semelhante ao da circulação humana atuando apenas sobre uma variável do sistema.

Para ter maior controle sobre variáveis do sistema e possibilitar a implementação de um sistema de controle que controle ao menos pressão e vazão, deve-se incluir no sistema outros componentes ativos que influenciem diretamente a resposta do sistema e que possam receber atuações de controle. Pode-se, como sugestão, incluir alguma válvula ativa que possa controlar a vazão do sistema.

3.2.3 Projeto de Controle

Neste trabalho foram estudados alguns componentes que integram um sistema de simulação cardiovascular. Esses estudos devem ser aprofundados e utilizados para o desenvolvimento de um controlador para o sistema.

Deve-se realizar um estudo mais completo da planta, determinando os parâmetros já discutidos e aumentar o grau de detalhamento da modelagem conforme necessário. Uma sugestão de estudo da planta é o levantamento da curva de “torque x velocidade” do motor, analisar a resposta da pressão na saída da bomba ao aplicar um degrau de pressão no interior da câmara e obter os parâmetros das válvulas e da restrição.

A instalação de outros componentes ativos no sistema, como já foi discutido, possibilita que mais atuações de controle sejam feitas no sistema e permite que seja projetado um controlador que de fato consiga fazer com que o sistema reproduza as condições de escoamento da circulação sanguínea.

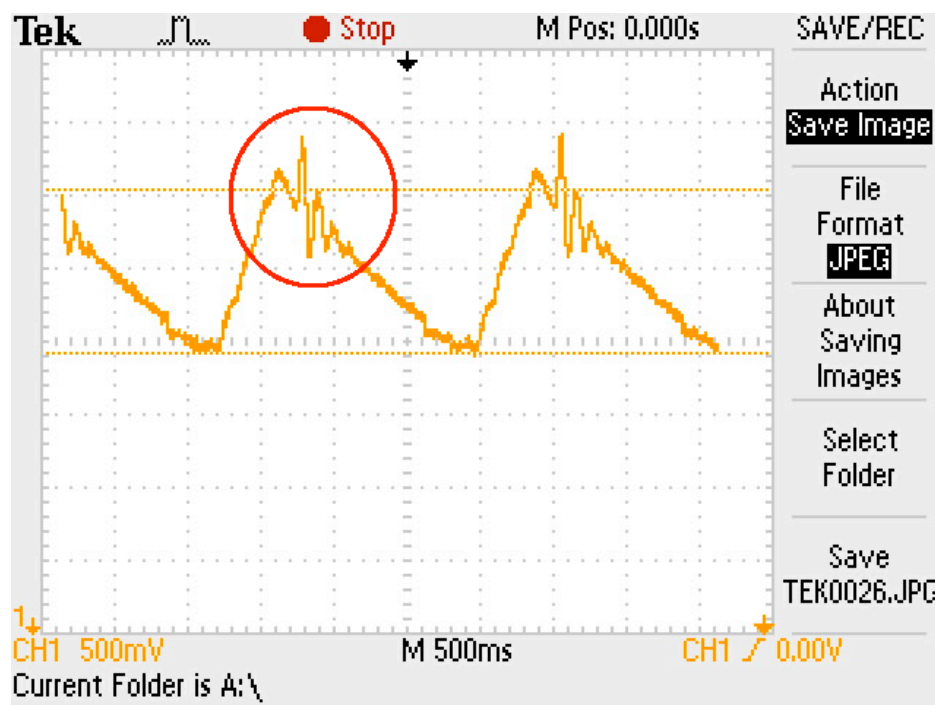
Com mais informações sobre a planta, pode-se definir os requisitos de desempenho do controlador. Como o sinal de referência é periódico e deseja-se seguir este sinal, um dos requisitos de desempenho seria de erro estacionário de posição nulo para sinais periódicos. Hara et al. (1988) propõe um sistema de controle que consegue seguir uma referência com alta acurácia para sinais periódicos, o controle repetitivo. Este controle parte do conceito de um controle seguidor de uma referência. Neste caso, a referência é um sinal periódico, e os autores desenvolvem técnicas para projetar um controlador introduzindo um gerador do sinal periódico de referência na malha de controle, obtendo um controlador sem erro de posição estacionário.

Também são desenvolvidas técnicas para garantir a estabilidade deste controle. O controle proposto pode ser aplicado a uma classe de sistemas não-lineares, então seria necessário avaliar se a não linearidade do sistema pode ser devidamente controlada por um controle deste tipo. Se este controlador for adotado, um dos requisitos de controlador seria de que ele tivesse um gerador do sinal periódico de referência. Porém é possível que com apenas este requisito de controlador não haja a possibilidade de lidar com as não linearidades da planta. Seria necessário estudar técnicas de controle não linear para gerar requisitos que permitam ao sistema lidar com estas não linearidades.

3.2.4 Válvulas

Observando a saída do sistema, é possível observar que as válvulas de retenção causam perturbações na resposta do sistema.

Figura 53 - Em destaque, perturbação gerada pela válvula de retenção



Uma proposta de resolução desse problema é utilizar nesse sistema válvulas de retenção mais adequadas que tenham um comportamento mais eficiente. Para esse sistema em especial, é possível utilizar válvulas de retenção projetadas para serem utilizadas em sistemas circulatórios

reais, sendo assim, as válvulas já são fabricadas seguindo normas rígidas de funcionamento, garantindo maior eficiência, fazendo com que o sistema se assemelhe ainda mais a um sistema circulatório real. A Fig. 54 mostra uma válvula de retenção esférica cedida pelo Instituto Dante Pazzanese que é utilizada em operações cardíacas.

Figura 54 - Válvula Esférica cedida pelo Instituto Dante Pazzanese



3.2.5 Reforço do Circuito Hidráulico

Um reforço do circuito hidráulico permitiria realizar testes com uma pressão maior do que a utilizada durante este trabalho. Seria possível, além de simular a operação normal de circulação, simular uma configuração com problemas, como a hipertensão. Para fazer este reforço, pode-se colar alguns dos tubos e conectores que ainda não foram colados. O problema é que uma vez colados, não poderão ser separados sem danificar os elementos. Portanto deve-se fazer um estudo para verificar que não serão feitas mais alterações na configuração do circuito hidráulico.

3.2.6 Sensor de Posição

O potenciômetro utilizado atualmente tem desempenho satisfatório, porém apresenta um ruído não desprezível e uma calibração pouco rigorosa. Caso seja desejado ou necessário algo mais confiável, uma sugestão é um encoder linear absoluto para substituir o potenciômetro, ou um encoder rotativo absoluto ou incremental para ser acoplado ao motor. Caso seja escolhido o incremental, a implementação será mais complicada; adotando um absoluto (tanto linear quanto rotativo), deve-se analisar o número de bits da saída. Acredita-se que uma discretização com 8 bits (256 posições) seja suficiente.

3.2.7 Análise do Arquivo de Texto

Atualmente, para analisar a saída do programa proveniente do arquivo de texto, utiliza-se a porta serial do computador para transferi-la para outra máquina. Este é um processo lento, pois os arquivos tem em média 1MB, enquanto a velocidade máxima que se consegue atingir é de 56kbps. Uma alternativa seria a instalação de uma placa de rede para haver um compartilhamento de pastas, tornando este processo mais ágil. Outra solução seria a aquisição de uma placa A-D/D-A que pudesse ser usada em computadores mais novos. Caso isso fosse feito, seria possível desenvolver uma interface gráfica de usuário (GUI) mais amigável, e apresentar os dados coletados em tempo real, utilizando um software como o LabView, dispensando o uso do osciloscópio.

3.2.8 Controle no Tempo

Um aspecto importante que não foi considerado neste trabalho é a influência do tempo na circulação sanguínea. A frequência de pulsação tem influência significativa no comportamento da circulação sanguínea e no funcionamento do corpo humano como um todo. Deve-se incluir no controlador do sistema algum tipo de atuação sobre a frequência de pulsação. Com um projeto de controle, este problema deve ser solucionado.

O sistema como foi feito opera com cerca de 35 pulsos por minuto, o sistema circulatório em condições saudáveis de operação realiza cerca de 70 pulsos por minuto.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho se insere dentro de um projeto maior cujo objetivo final é a de se desenvolver um simulador cardiovascular no qual se exerce controle em tempo real sobre diversos elementos do circuito hidráulico para se obter um perfil cíclico de oscilação desejado, tanto da pressão como de vazão.

Como atividade preparatória neste desenvolvimento, este trabalho teve como objetivo a conclusão do projeto e implementação do circuito hidráulico do simulador assim como o projeto e implementação dos elementos necessários para o controle da rotação do motor elétrico que aciona a bomba pulsátil. O trabalho incluiu ainda:

- A modelagem dos diversos subsistemas que compõem o simulador cardiovascular e a comparação entre o comportamento previsto através dos modelos e o comportamento observado experimentalmente;
- A implementação e execução de teste de controle simples em malha-fechada, da pressão na saída da bomba (equivalente à pressão aórtica). Através dos experimentos de controle, pretendeu-se coletar subsídios para futuros trabalhos que envolvam o controle pleno (pressão e vazão) do simulador cardiovascular.

Como resultado:

- Os modelos desenvolvidos para cada subsistema são eficazes para a determinação de parâmetros mecânicos como o nível de restrição e volume da ar no reservatório de complacência, de modo a se ajustar a forma das curvas de variação da pressão no circuito manualmente;
- Apesar do algoritmo de controle, os elementos implementados para o controle da pressão aórtica operaram corretamente;
- Com o simulador na configuração atual e com o algoritmo testado não foi possível obter um controle satisfatório da pressão, ou seja, obter um perfil de oscilação de pressão que se aproxime de uma curva desejada de oscilação. Contudo, as ações de controle foram constatadas.

4.1 Trabalhos futuros

Foram realizados os passos preparatórios para o desenvolvimento futuro de um simulador cardiovascular para o controle simultâneo da pressão e vazão. Evidentemente, o trabalho futuro fundamental é o desenvolvimento de um segundo elemento ativo ao sistema. Neste trabalho, foi empregada uma restrição ajustável manualmente. Mostrou-se por simulação e por meio de experimentos a possibilidade de alterar significativamente o perfil de oscilação, ao menos da pressão de saída da bomba. Este trabalho não abordou o parâmetro de vazão do sistema, contudo a restrição exerce evidente influência sobre este parâmetro. Assim, a restrição de ajuste automático é objeto de desenvolvimento futuro. A restrição de ajuste automático, ao ser incluída ao sistema aqui desenvolvido possibilitará o controle pleno do simulador cardiovascular, ou seja o controle simultâneo da pressão e da vazão.

Mesmo com o foco restrito à regulação da rotação do motor elétrico que aciona a bomba, este trabalho se restringiu a realizar somente a modelagem dos diversos subsistemas de forma isolada. Devido à presença de elementos essencialmente não-lineares, como é o caso do mecanismo biela-manivela, o trabalho de modelagem completa do sistema e a simulação da análise do comportamento do simulador será tarefa para um trabalho futuro.

Por fim, o protótipo de simulador construído servirá de base para o desenvolvimento futuro de um simulador com características de desempenho, funcionalidade e robustez mais elevadas. Ao longo dos ensaios no protótipo foram verificados diversos problemas construtivos que devem ser sanados em versões futuras. As melhorias incluem ainda o uso de sensor de posição mais robusto e uso de um sistema computacional mais moderno, por exemplo, um microprocessador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAZMANI, A.; KEELING, D.G.; WALKER, P.G.; ABBAS, S.K.; JABER, O.; WATTERSON, K.; LEVESLEY, M.C. **Introducing a hardware-in-the-loop simulation of the cardiovascular system.** Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 4th IEEE RAS & EMBS International Conference, 2012. p.153,158, 24-27.

BAZAN, O.; ORTIZ, J.P. **Concepção de bancada e montagem de experimento para a análise in vitro de próteses cardíacas mitrais.** Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular, 2011. 26, p. 197-204.

FELIPINI, C.L.; DE ANDRADE, A.J.P.; LUCCHI, J.C.; DA FONSECA, J.W.G.; NICOLOSI, D. **An Electro-Fluid-Dynamic Simulator for the Cardiovascular System.** Artificial Organs, 2008. 32, p.349–354.

FONSECA, J.; ANDRADE, A.; NICOLOSI, D.E.C.; BISCEGLI, J.F.; LEME, J.; LEGENDRE, D.; BOCK, E.; LUCCHI, J.C. **Cardiovascular Simulator Improvement: Pressure Versus Volume Loop Assessment.** Artificial Organs, 2011. 35, p.454–458.

FONSECA, J.; UTIYAMA, B.; ANDRADE, A.; UEBELHART, B.; LEME, J.; SILVA, C.; BISCEGLI, J.; LUCCHI, J. **Hybrid cardiovascular simulator performance evaluation.** 7º Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, 2012.

GUYTON, A.C.; HALL, J.E. **Tratado de Fisiologia Médica.** Capítulo 9. 11ª ed. Rio de Janeiro, Elsevier Ed., 2006.

HARA, S.; YAMAMOTO, Y.; OMATA, T.; NAKANO, M. **Repetitive Control Systems: a New Type of Servo System for Periodic Exogenous Signals.** IEEE Trans. AC, 1988. vol. 33, no. 7, pp.659 -668 1988.

LEGENDRE, D.; FONSECA, J.; ANDRADE, A.; BISCEGLI, J.F.; MANRIQUE, R.; GUERRINO, D.; PRAKASAN, A.K.; ORTIZ, J.P. AND LUCCHI, J.C. **Mock Circulatory System for the Evaluation of Left Ventricular Assist Devices, Endoluminal Prostheses, and Vascular Diseases.** Artificial Organs, 2008. 32, p.461–467.

PANTALOS, G.M.; KOENIG, S.C.; GILLARS, K.J.; EWERT, D. L. **Mock circulatory system for testing cardiovascular devices.** 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society EMBS/BMES Conference, 2002. Proceedings of the Second Joint , 2002. 2, p.1597,1598.

TIMMS, D.L.; GREGORY, S.D.; GREATREX, N.A.; PEARCY, M.J.; FRASER, J.F.; STEINSEIFER, U. **A Compact Mock Circulation Loop for the In Vitro Testing of Cardiovascular Devices.** Artificial Organs, 2011. 35, p.384–391.

ZANNOLI R.; CORAZZA I.; BRANZI A. **Mechanical simulator of the cardiovascular system.** Physica Medica, 2007. 25, p. 94-100.

WHO, 2010. **Global Status Report on Noncommunicable Diseases.** Disponível em < http://www.who.int/nmh/publications/ncd_report2010/en/ >. Acesso em: 10 Junho 2013.

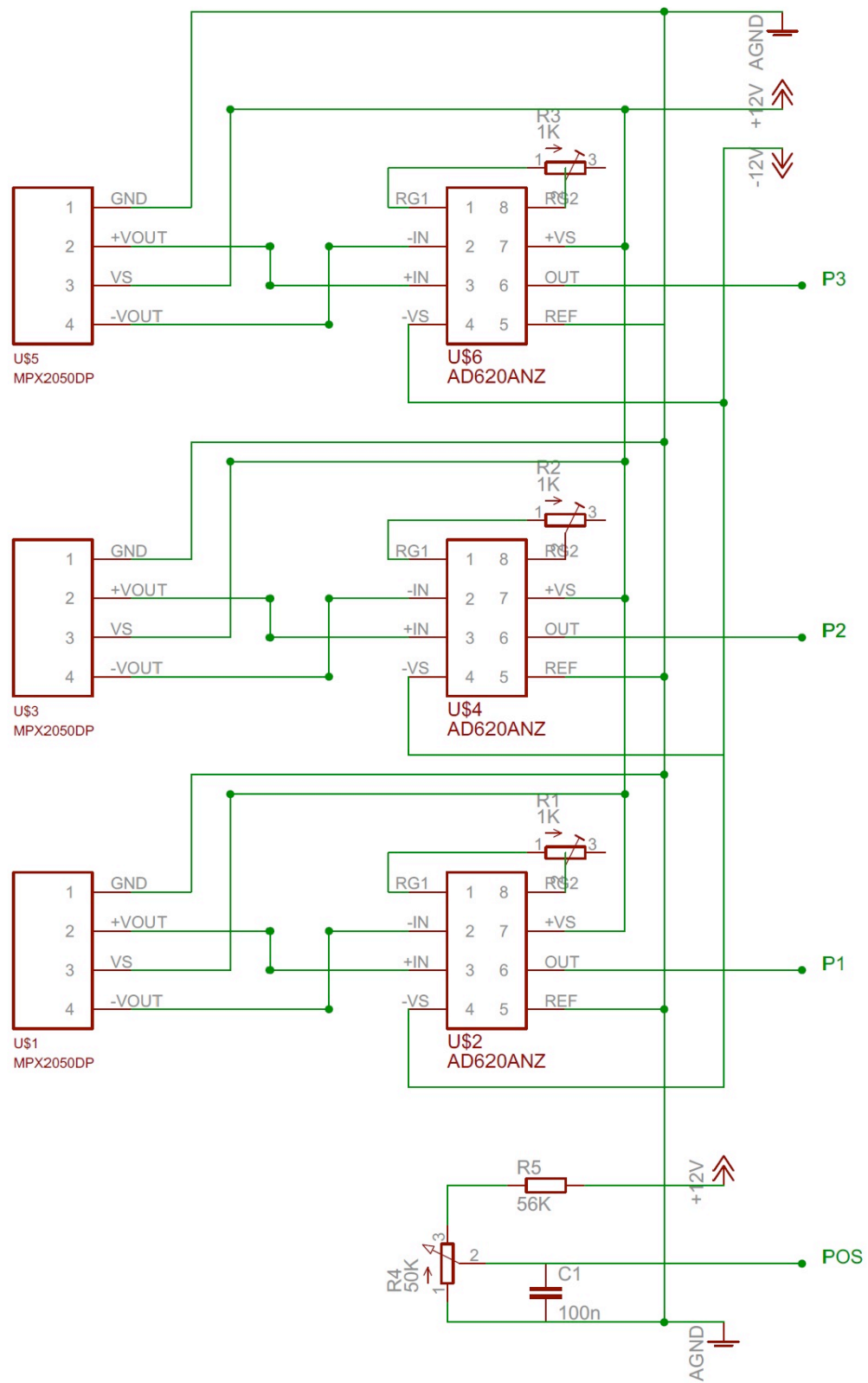
APÊNDICE A – LISTA DE COMPONENTES DO CIRCUITO ELETRÔNICO

Segue uma lista com os componentes do circuito eletrônico e um esquema do circuito.

Tabela 15 - Lista de componentes eletrônicos

Componente	Quantidade
Sensor de Pressão MPX2050DP	3
C.I. AD620ANZ	3
Trim-pot de 1k Ω	3
Potenciômetro de 50 k Ω , tol. 10%	1
Resistor de 56 k Ω	1
Capacitor de 1 μ F	1

Figura 55- Esquema do circuito eletrônico



APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE DO ALGORITMO DE ATUAÇÃO SOBRE A VELOCIDADE DO MOTOR

```

{*****}
{*Programa para Controle do motor da bancada para
 simulacao cardiovascular          *}
{*****}
{*****}
{Ver. 1                               }
{Prof. Dr. Oswaldo Horikawa          }
{Fabio Seiti Aguchiku                 }
{Filipe Vieira Mendes dos Santos      }
{*Sao Paulo EPUSP 2013*              }
{*****}
{$N+}
{*Cabecalho do programa*}
program Controlador_Bomba;
{*Bibliotecas utilizadas pelo programa*}
Uses crt, dos;
{*Variaveis globais*}
var
{*Escrita*}
arquivo           :text;
{*Leitura e saida*}
entrada_binario   :real;
entrada,entrada_0 :real;
saida,saida_0     :real;

{*Variaveis de Controle e Monitoramento*}
tensao_volta      :real;
leitura_pos,leitura_pre :real;
pressao_min       :real;
posicao, posicao_0, pressao :real;
theta, theta_tmp, theta_0 :real;
cos_tmp           :real;
quad, quad_0      :longint;
i,cont,cont_pos   :longint;
conversao,lsb,msb :longint;
nvoltas           :longint;
tecla             :char;
{*Controlador*}

```

```

aSetpoint          :array[1..301] of real;
aNvezes, aNvezesVolta :array[1..301] of real;
aPressao, aPressaoVolta :array[1..301] of real;
aErro              :array[1..301] of real;
aEsforco           :array[1..301] of real;
aPosicao            :array[1..301] of real;
cont_array         :integer;
indice             :integer;
{*Constantes*}
const
base=$220;          {endereco base da placa 220h}
offset=0;           {Volts}
diametro=30;        {mm}
pi=3.141592654;
tensao_fonte=12.22; {Volts}
canal_pos=$E;       {canal 14}
canal_pre=$A;       {canal 10}
K=0.1;
Ti=1;
pressao80=0.92;     {Volts}
threshold_pressao=0.025;
A_press=40.85;      {P=A+B*V}
B_press=42.55;
A_pos=-23.05;
B_pos=8.57;

{*****}
function ArcSin(seno: real):real;
begin
  if (seno>=1) or (seno<=-1){evitar divisao por 0} then
    ArcSin:=pi/2
  else ArcSin:=arctan(seno/sqrt(1-seno*seno));
end;
{*****}
function ArcCos(cosseno: real):real;
var
  ArcCostmp      :real;
begin
  if cosseno=0.0 then ArcCostmp:=pi/2.0
  else ArcCosTmp:=ArcTan(sqrt(1-(cosseno*cosseno))/abs(cosseno));
  if cosseno<0.0 then ArcCos:=pi-ArcCostmp
  else ArcCos:=ArcCostmp;
end;
{*****}
procedure seta_placa;
begin
  Port[base+ 9]:= 0;  {Ganho 0 (leitura de +-10V)}

```

```

Port[base+11]:= $1; {Tipo de disparo - software}
end;

{*****}
procedure le_canais;
begin
  Port[base+12]:=$ff; {dispara leitura / escreve algo}
  repeat until (Port[base+5] and $10) = 0; {espera conversao A/D}
  entrada_binario := (Port[base+5]-$10)*256 + Port[base+4]; {converte o sinal digital para
um valor decimal}
  entrada :=(entrada_binario-2048)/204.8;

end;
{*****}
procedure solta_saida;
begin
  {Limitacao do conversor D/A e tensao positiva}
  if saida > 1.5 then saida := 1.5;
  if saida < 0.45 then saida := 0.45;
  conversao := round((saida+offset)*409.5);
  lsb := conversao mod 256;
  port[base+4] := lsb;
  msb := (conversao div 256);
  port[base+5] := msb;
end;
{*****}
procedure solta_saida_2; {faz motor parar quando acaba o programa}
begin
  {Limitacao do conversor D/A e tensao positiva}
  if saida > 1.5 then saida := 1.5;
  if saida < 0 then saida := 0;
  conversao := round((saida+offset)*409.5);
  lsb := conversao mod 256;
  port[base+4] := lsb;
  msb := (conversao div 256);
  port[base+5] := msb;
end;
{*****}
procedure le_posicao;
begin
  posicao_0:=posicao;
  Port[base+10]:= canal_pos;
  cont_pos:=0;
  leitura_pos:=0;
  repeat
    {media de 10 leituras}
    le_canais;

```

```

        leitura_pos:=leitura_pos+entrada;
        cont_pos:=cont_pos+1;
    until cont_pos>=10;
    leitura_pos:=leitura_pos*0.1;
    posicao:=B_pos*leitura_pos+A_pos; {mm}
    if posicao < -diametro/2 then posicao:=-diametro/2;
    if posicao > diametro/2 then posicao:=diametro/2;
end;
{*****}
procedure le_pressao;
begin
    Port[base+10]:= canal_pre; {leitura pressao - canal 15?}
    le_canais;
    leitura_pre:=entrada; {V}
    pressao:=(leitura_pre*B_press) + A_press; {mmHg}
end;
{*****}
procedure acha_quad_0;
begin
    Port[base+10]:= canal_pos;
    le_canais;
    leitura_pos:=entrada; {mV}
    posicao:=B_pos*leitura_pos+A_pos; {mm}
    if posicao >=0 then quad_0:=1
    else quad_0:=2;
end;
{*****}
procedure acha_quad;
begin
    if cos_tmp>=0 then
        if ((cos_tmp>=0.95) and (quad_0=4)) or (quad_0=1) then quad:=1
        else if (quad_0=3) or (quad_0=4) then quad:=4
        else quad:=1
    else
        if ((cos_tmp<=-0.95) and (quad_0=2)) or (quad_0=3) then quad:=3
        else if (quad_0=2) or (quad_0=1) then quad:=2
        else quad:=3;
    {quad_0:=quad;}
end;
{*****}
procedure calcula_theta;
begin
    cos_tmp:=posicao/(diametro/2.0);
    theta_tmp:= ArcCos(cos_tmp);
    acha_quad;
    if (quad=3) or (quad=4) then theta:=-theta_tmp
    else theta:=theta_tmp;
end;

```

```

end;
{*****}
procedure acha_indice;
begin
    indice:=round(posicao*10)+151;
end;
{*****}
procedure define_posicao;
begin
    repeat
        aPosicao[indice]:=indice*0.1-15.1;
        indice:=indice+1;
    until indice>301;
end;
{*****}
procedure define_setpoint;
var
    p_set, pos      :real;
begin
    indice:=1;
    repeat
        pos:=aPosicao[indice];
        {em mmHg}
        p_set:=-0.0001*pos*pos*pos*pos+0.0015*pos*pos*pos-
0.1067*pos*pos+0.343*pos+120.06;
        {em V}
        aSetpoint[indice]:=(p_set-A_press)/B_press;
        indice:=indice+1;
    until indice>301;
end;
{*****}
procedure acha_erro;
var
    p_volt    :real; {variavel que guarda sinal em volts da pressao correspondente}
begin
    for cont_array:= 1 to 301 do
        begin
            p_volt:=(aPressao[cont_array]-A_press)/B_press;
            if abs(aSetpoint[cont_array]-p_volt)<=threshold_pressao then {menor que limiar}
                aErro[cont_array]:=0
            else aErro[cont_array]:=aSetpoint[cont_array]-p_volt;
        end;
    end;
{*****}
procedure acha_esforco;
begin
    for cont_array:= 1 to 301 do

```

```

begin
    aEsforco[cont_array]:=aEsforco[cont_array]+Ti*aErro[cont_array];
end;
end;
{*****}
procedure acha_Nvezes;
begin
    {acha_indice;}
    aNvezes[indice]:=aNvezes[indice]+1;
end;
{*****}
procedure acha_NvezesVolta;
begin
    {acha_indice;}
    aNvezesVolta[indice]:=aNvezesVolta[indice]+1;
end;
{*****}
procedure reset_arrays;
begin
    for cont_array:= 1 to 301 do
        begin
            aNvezes[cont_array]:=0;
            aPressao[cont_array]:=0;
            aErro[cont_array]:=0;
        end;
    end;
{*****}

procedure acha_tensao_volta;
var
    pmin_volt    :real; {pmin em volts}
begin
    pmin_volt:=(aPressao[3]-A_press)/B_press;
    if pmin_volt<(pressao80-threshold_pressao) then
        tensao_volta:=K*(pressao80-pmin_volt)+tensao_volta
    else if pmin_volt>(pressao80+threshold_pressao) then
        tensao_volta:=tensao_volta-K*(pmin_volt-pressao80);
    end;
{*****}
procedure reset_arraysVolta;
begin
    for cont_array:= 1 to 301 do
        begin
            aNvezesVolta[cont_array]:=0;
            aPressaoVolta[cont_array]:=0;
        end;
    end;
end;

```

```

{*****}
procedure end_of_cycle;
begin
    pressao_min:=aPressao[1];
    acha_erro;
    acha_esforco;
    writeln(arquivo, 'Pressao Avanco', char(9), 'Esforco', char(9), 'Erro');
    for cont_array:= 1 to 301 do
    begin
        writeln(arquivo, aPressao[cont_array], char(9), aEsforco[cont_array], char(9),
aErro[cont_array]);
    end;
    writeln(arquivo, 'PressaoVolta');
    for cont_array:= 1 to 301 do
    begin
        writeln(arquivo, aPressaoVolta[cont_array]);
    end;
    reset_arrays;
    reset_arraysVolta;
end;
{*****}
procedure inicializa_arrays;
begin
    reset_arrays;
    reset_arraysVolta;
    for cont_array:= 1 to 301 do
    begin
        aEsforco[cont_array]:=aSetpoint[cont_array];
    end;
end;
{*****Programa principal*****}
begin
    clrscr;
    window(1,1,80,43);
    assign(arquivo, 'C:\TF2013\Dados\dados.txt');
    rewrite(arquivo);
    define_posicao;
    define_setpoint;
    inicializa_arrays;
    gotoxy(5,2);write('Programa de Controle de Bomba');
    seta_placa;
    writeln(arquivo, 'Log de Dados');
    gotoxy(5,10);write('Pressione qualquer tecla para iniciar. ');
    saida:=0.8;
    solta_saida;
    nvoltas:=0;
    repeat

```



```

{wait}
until keypressed;
tecla:=readkey;
tensao_volta:=0.8; {seta inicialmente a tensao de volta}
quad_0:=1;
acha_quad_0;
gotoxy(5,10);write('Pressione qualquer tecla para parar.  ');
{Inicia loop de controle}
repeat
  le_posicao;
  calcula_theta;
  entrada_0 := entrada;
  if (quad_0=4) and (quad=1) then nvoltas:=nvoltas+1;
  if nvoltas>7 then {esperar o sinal de pressao estabilizar}
  begin
    if (quad=1) or (quad=2) then {volta}
    begin
      le_pressao;
      acha_indice;

aPressaoVolta[indice]:=(aNvezesVolta[indice]*aPressaoVolta[indice]+pressao)/(aNvezesVolta[i
ndice]+1);
      acha_NvezesVolta;
    end
    else if (quad=3) or (quad=4) then {ida}
    begin
      le_pressao;
      acha_indice;
      aPressao[indice]:=(aNvezes[indice]*aPressao[indice]+pressao)/(aNvezes[indice]+1);
      acha_Nvezes;
      if indice<=250 then
        begin
          saida:=K*aEsforco[indice];
          solta_saida;
        end;
      end;
    end;
    if (quad_0=4) and (quad=1) then
    begin
      gotoxy(5,20);writeln(arquivo, 'Volta ', nvoltas);
      acha_tensao_volta;
      writeln(arquivo, 'Tensao Volta ', tensao_volta);
      saida:=tensao_volta;
      solta_saida;
      end_of_cycle;
    end;
  end;
  if nvoltas<=7 then

```

```

begin
  if (quad=1) or (quad=2) then  {volta}
  begin
    le_pressao;
    acha_indice;

aPressaoVolta[indice]:=(aNvezesVolta[indice]*aPressaoVolta[indice]+pressao)/(aNvezesVolta[i
ndice]+1);
    acha_NvezesVolta;
  end
  else if (quad=3) or (quad=4) then  {ida}
  begin
    le_pressao;
    acha_indice;
    aPressao[indice]:=(aNvezes[indice]*aPressao[indice]+pressao)/(aNvezes[indice]+1);
    acha_Nvezes;
  end;
  if (quad_0=4) and (quad=1) then
  begin
    writeln(arquivo, 'Volta ', nvoltas);
    writeln(arquivo, 'ida', char(9), 'volta');
    begin
      for cont_array:= 1 to 301 do
      begin
        writeln(arquivo, aPressao[cont_array], char(9), aPressaoVolta[cont_array]);
      end;
      reset_arrays;
      reset_arraysVolta;
    end;
  end;
end;
quad_0:=quad;
until keypressed;
close(arquivo);
saida:=0;
solta_saida_2;
end. {fim do programa}

```