

DIOGO CÃO PIRES

BOMBA PULSÁTIL DE DUTO FLEXÍVEL

São Paulo

2007

DIOGO CÃO PIRES

BOMBA PULSÁTIL DE DUTO FLEXÍVEL

**Trabalho de Formatura apresentado a
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo.**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica.**

Orientador: Prof. Oswaldo Horikawa.

São Paulo

2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Pires, Diogo Cáo

Bomba pulsátil de duto flexível / D.C. Pires. – São Paulo, 2007.

p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Máquinas hidráulicas 2. Bombas hidráulicas 3. Energia hidráulica 4. Mecânica aplicada I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

RESUMO

O propósito deste trabalho é o projeto de uma bomba hidráulica que gere fluxo através da pulsação de um duto flexível por onde passa um fluido, tal pulsação quando acionada deve comprimir o duto e dificultar a passagem do fluido. A pulsação no duto é feita por atuadores posicionados em série ao longo do duto e estes devem ser acionados seqüencialmente de forma que a atuação seqüencial gere o fluxo, essa pulsação sobre o duto será realizada através de eletroímãs e estes serão comandados por computador através de uma rotina computacional. Os ensaios serão realizados para medir vazão e pressão em diferentes sincronismos de pulsão, com os resultados dos ensaios e uma análise sobre os diferentes casos, serão estudadas e obtidas conclusões quanto ao rendimento, limitações de vazão, pressão e também será realizado o levantamento de curvas características.

Palavras chave: Bomba hidráulica, Eletroimã, Dutos flexíveis.

ABSTRACT

The purpose of this work is to develop a pump that creates a flow through the pulsation of a flexible pipe where a fluid is inside, when the pulsation acts, it must compress the pipe and avoid the circulation of the fluid. The pulsation must be executed by mechanisms arranged along the pipe length and these mechanisms must be operate in a such sequence so as to generate a flow. The pulsation over the pipe is achieved by electromagnetic solenoids and a computer controls them. A prototype of the new pump is constructed and experiments are conducted. Experiments consisted on measuring the flow rate and pressure for different pulsation. By analyzing the results, conclusions concerning income, flow limitation, pressure and graphics are obtained.

Key words: Hydraulic Pump, Electromagnet, Flexible Pipe

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coração artificial implementado através de bomba centrífuga (ABIOCOR).	10
Figura 2 - Sistema de refrigeração de CPU por meio de água.	11
Figura 3 - seqüência de acionamento da BPDF	13
Figura 4 - Bomba peristáltica	14
Figura 5 - Bomba de membrana flexível	14
Figura 6 - Esquema da bomba	17
Figura 7 - Esquema da BPDF e bancada de ensaio	17
Figura 8 - Solenóide tensão 12V e suas dimensões	19
Figura 9 - Solenóide usado.	19
Figura 10 - Tubo de silicone de parede fina.	20
Figura 11 - Montagem do protótipo.	20
Figura 12 - Circuito de ganho.	21
Figura 13 - Circuito de proteção dos contatos.	22
Figura 14 - Curvas de força por comprimento do curso de um solenóide.	23
Figura 15 - esquema <i>Duty Cycle</i> .	24
Figura 16 - Esquema de defasagem entre os atuadores.	25
Figura 17 - Diagrama de blocos	26
Figura 18 - Pressão e rendimento por vazão, potência 18,9W.	30
Figura 19 - Vazão por período do ciclo.	31
Figura 20 - Pressão por período do ciclo.	32
Figura 21 - Rendimento por período do ciclo.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPDF – Bomba Pulsátil de Duto Flexível

T - Período do ciclo que define a frequência de pulsação

DC - Duty Cicle

SUMÁRIO

1.Introdução.....	9
2.Objetivos do trabalho.....	12
3.Princípio da BPDF.....	13
4.Projeto da BPDF.....	16
5.Circuitos Eletrônicos.....	21
6.Sincronização dos atuadores.....	23
7.Avaliação do Desempenho.....	28
8.Resultados.....	29
9.Discussões.....	33
10.Conclusão.....	35
REFERENCIAS.....	36
ANEXO A – Rotina de Sincronização.....	38

1. Introdução

Bombas hidráulicas são máquinas hidráulicas do tipo geratrizes ou operatrizes, isto é, são máquinas hidráulicas que recebem trabalho mecânico, geralmente fornecido por uma máquina motriz, e o transforma em energia hidráulica, comunicando ao líquido um acréscimo de energia sob as formas de energia potencial de pressão e cinética.

O modo pelo qual é feita a transformação do trabalho em energia hidráulica e o recurso para cedê-la ao líquido, aumentando sua pressão e/ou sua velocidade, permite classificá-las em: bombas de deslocamento positivo, turbo bombas e bombas especiais.

É importante constatar que a grande maioria dessas bombas são rotativas, ou seja, o líquido recebe a ação de forças provenientes de uma ou mais peças dotadas de movimento de rotação, por exemplo todas as turbo bombas, bombas rotativas de palhetas, pistão, elemento flexível, parafuso, engrenagem, lobos e etc.

No entanto, algumas bombas de deslocamento positivo são classificadas como “alternativas”, ou seja, o líquido recebe a ação das forças diretamente de um pistão, êmbolo ou membrana flexível (diafragma).

As muitas formas construtivas de bombas hidráulicas permite uma larga e variada escala de aplicações. Encontramos bombas para descargas extremamente pequenas e bombas para descargas superiores a 50 metros cúbicos por segundo, bomba para vácuo e bombas para pressões superiores a 500 Kgf/cm², bombas com potência muito pequenas e bombas acionadas por motores de mais de 100.000cv, bombas funcionando com líquidos a baixa temperatura e outras bombeando líquidos e metais a mais de 600°C. Existem bombas para atender toda a gama de produtos químicos altamente corrosivo e mesmo líquidos com elevado índice de partículas sólidas [1].

Entretanto, atualmente vem crescendo a necessidade em aplicações especiais tais como em corações artificiais, tanto para circulação sanguínea extracorpórea, para corações artificiais ou somente auxílio ao bombeamento cardíaco. A Figura 1 mostra

um exemplo de coração artificial baseado em bomba centrífuga [2], mas além deste tipo, já foram desenvolvidos corações artificiais baseados em bombas de roletes, bombas pulsáteis de membrana, e bombas axiais. Nesses casos buscam-se bombas de elevada eficiência, baixo consumo de energia, reduzido tamanho e elevada confiabilidade; outra característica que se deseja é a não danificação do sangue que circula pela bomba, que pode ocorrer por contaminação ao entrar em contato com partes da bomba ou por hemólise, que é o rompimento das hemácias, fato que ocorre principalmente em bombas de roletes [3]. Além disso, bombas de rolete e bombas pulsáteis permitem que grandes quantidades de ar sejam bombeadas ao paciente causando complicações de embolia gasosa, e ainda, aumentando o risco da ocorrência de excessivas pressões, com a possibilidade de causar um acidente vascular ao paciente ou rompimento na linha de circulação extracorpórea [4].

Já em outra área, a de informática, tem-se verificado o desenvolvimento de CPUs cada vez mais velozes, sendo que CPUs mais recentes requerem refrigeração por meio de água. A Figura 2 mostra um exemplo de um sistema de refrigeração por água disponível comercialmente [5]. Isto gerou a necessidade por bombas hidráulicas de reduzido tamanho, baixo custo e baixo consumo de energia para aplicação em computadores portáteis.



Figura 1 - Coração artificial implementado através de bomba centrífuga (ABIOCOR).

2. Objetivos do trabalho

Face ao exposto e visando o desenvolvimento de bombas de reduzido tamanho, baixo consumo de energia e elevada confiabilidade, o trabalho tem como objetivo propor e desenvolver um protótipo de uma bomba cujo princípio de funcionamento é baseado na pulsação de dutos flexíveis, pulsações estas que são sincronizadas de modo a se obter um efeito de bombeamento do fluido. A bomba a ser obtida, doravante designada por bomba por pulsação de duto flexível – BPDF, terá amplas aplicações, seja em aplicações especiais como coração artificial e refrigeração de CPU, seja em substituição a outros tipos de bombas convencionais.

Para isso, um dos objetivos é construir uma bomba com baixo consumo de energia, pois o intuito de obter-se uma bomba com tal forma construtiva é eliminar perdas mecânicas em rotores, partes girantes da própria bomba, válvulas e perdas no motor de acionamento da mesma.

O trabalho tem também como objetivo ensaiar a bomba levantando curvas características para diferentes condições de operação de modo a identificar possibilidades de melhorias e limitações.

3. Princípio da BPDF

A idéia básica da BPDF é posicionar atuadores ao longo de um duto flexível e acioná-los de forma a comprimir o duto seqüencialmente, ou seja, cada vez que o duto é comprimido ele expulsa o líquido que esta naquele volume, a idéia é acionar os atuadores de forma que essa expulsão do fluido crie um fluxo numa direção desejada. A Figura 3 ilustra o princípio de funcionamento do BPDF.

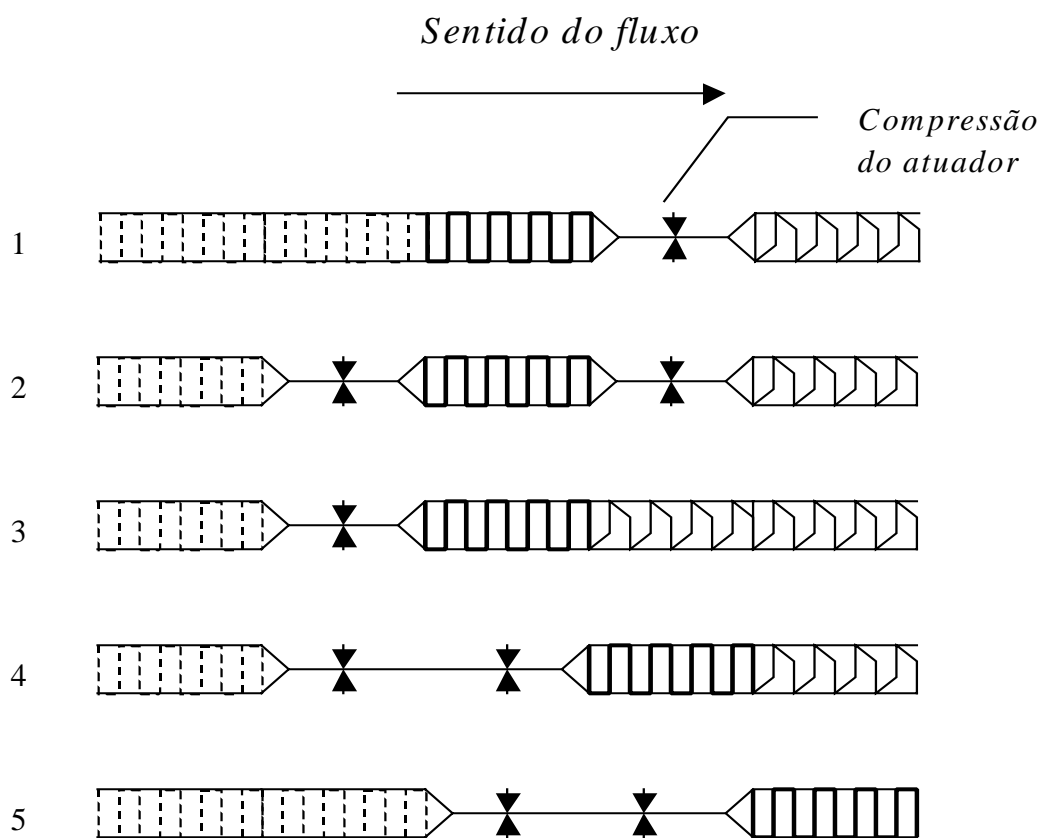


Figura 3 - seqüência de acionamento da BPDF

Nota-se que a BPDF utiliza os princípios de funcionamento de dois tipos de bombas de deslocamento positivo para gerar seu fluxo, ela utiliza os princípios de bombas peristálticas e bombas de membrana flexível. As Figura 4 e Figura 5 mostram uma esquematização do funcionamento de ambas [6].

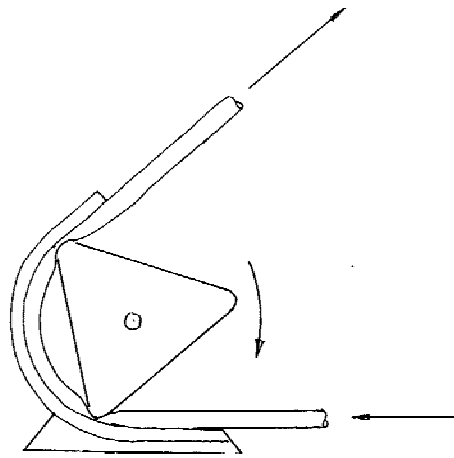


Figura 4 - Bomba peristáltica

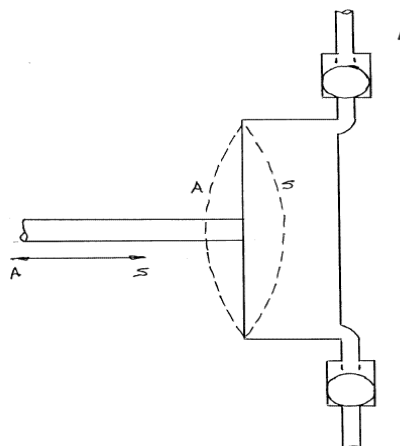


Figura 5 - Bomba de membrana flexível

A BPDF combina a pulsação da bomba de membrana com a compressão do duto flexível da bomba peristáltica, e dessa maneira elimina o motor que acionaria a bomba peristáltica e as válvulas da bomba de membrana flexível.

Existem diversas possibilidades de realizar a pulsação no duto, no entanto o melhor caminho para se reduzir as perdas no acionamento é transformar a energia elétrica em energia mecânica que atua diretamente sobre o duto.

Uma forma simples de se obter acionamento com a característica desejada é utilizar atuadores piezelétricos [7], todavia estes atuadores atuam numa faixa de micrometros e inicialmente pretende-se obter um protótipo de grandezas maiores.

Outra solução simples é utilizar atuadores eletromagnéticos, mais especificamente eletroímãs e solenóides que além de possibilitarem grandes deslocamentos, são de fácil acionamento, permitem trabalhar numa ampla faixa de tamanhos e tem baixo custo [8].

Nas bombas de rolete, centrífuga, axiais ou pulsáteis de membrana, a energia elétrica é transformada primeiramente em rotação de um motor elétrico, e em seguida, a energia é transferida para o fluído através da rotação de pás ou hélices, no movimento de roletes ou na pulsação de membranas. No caso de algumas bombas pulsáteis para coração artificial, a rotação do motor é utilizada no acionamento de um compressor de ar, e o ar comprimido é utilizado para movimentar a membrana da bomba. No caso do BPDF que está sendo proposto, a energia elétrica é transferida para o fluído da forma mais direta possível. Isto resulta na possibilidade de diminuir o número de componentes estruturais da bomba, aumentar a simplicidade na construção e na operação, reduzir o tamanho, reduzir o custo, e o que é especialmente interessante para aplicações como coração artificial, a possibilidade de obter elevada confiabilidade.

No entanto, como se trata do desenvolvimento não procuramos minimizar as dimensões, todavia esse tipo de acionamento apresenta possibilidade de otimização e assim menores dimensões podem ser desenvolvidas numa etapa futura.

Em seguida, será esquematizada a forma de montagem e atuação.

4. Projeto da BPDF

A Figura 6 mostra o esquema da bomba a ser construída. Os atuadores magnéticos mostrados são solenóides, cada solenóide contém uma haste ou pistão em seu interior formado por uma parte de material ferromagnético e outra de material amagnético, é a parte ferromagnético que sofre efeito do campo magnético gerado pelo solenóide e gera movimento e força que serão exercidos sobre o duto, a parte amagnética tem o intuito de não sofrer influencia do campo e não prejudicar o movimento e forças geradas. Na figura está demonstrado também o duto, o qual é comprimido pelas sapatas dos atuadores que tem como função aumentar a área que será comprimida; note que diferente da Figura 1 o duto é comprimido de um único lado através de um esbarro. Pode-se observar na figura que o solenóide central está atuando e portanto está energizado, ou seja, uma tensão V é aplicada nos terminais da bobina do solenóide gerando corrente nesta e assim criando um campo magnético que arrasta a haste na direção superior da figura e comprime o duto através da sapata como desejamos.

Já a Figura 7 mostra o esquema da montagem da bomba junto com a parte de acionamento dos solenóides, que é composto por relés, um circuito para acionamento dos relés e o computador que ordena a pulsação. Também indica o esquema da bancada de ensaios da mesma, tal bancada é constituída basicamente por dois reservatórios e dutos rígidos que não sofrerão compressão pois tem função apenas de conduzir o líquido bombeado.

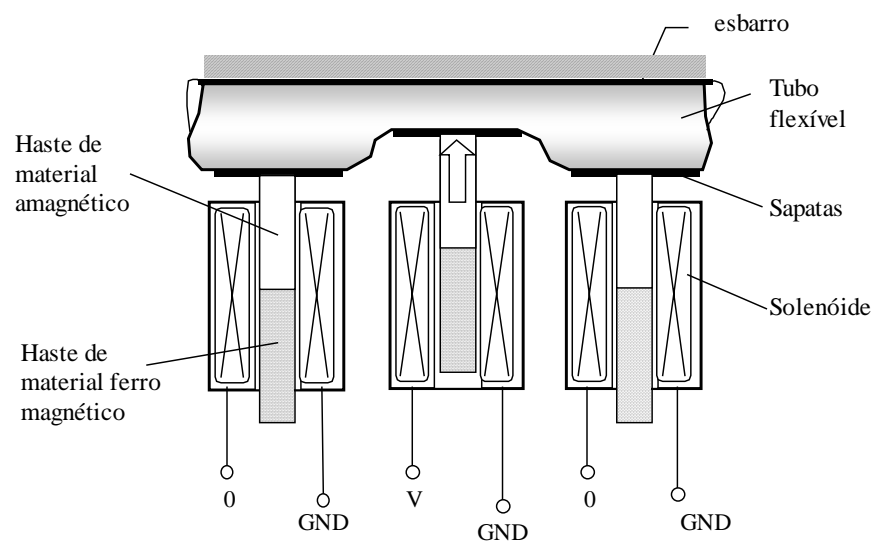


Figura 6 - Esquema da bomba

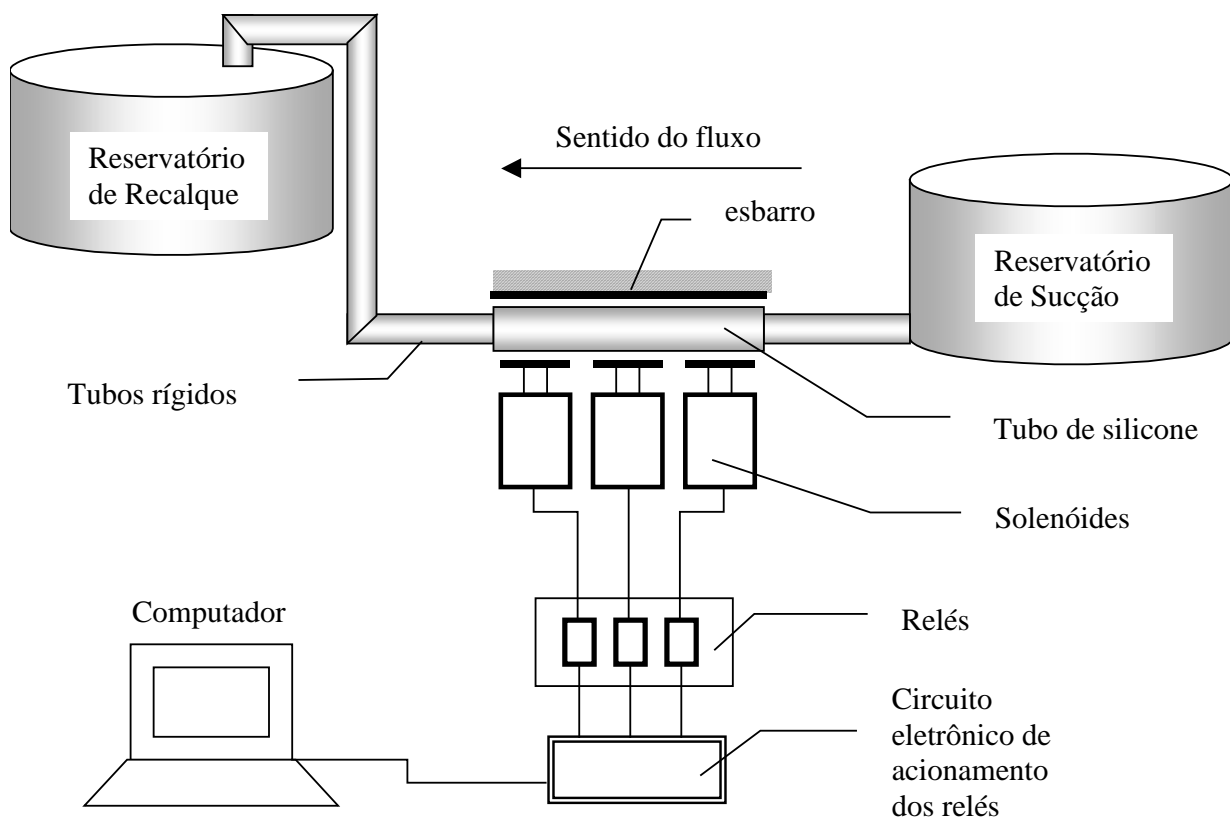


Figura 7 - Esquema da BPDF e bancada de ensaio

A bancada de ensaios é composta por dois reservatórios, um de sucção e outro de recalque, e dutos que os conectam a BPDF. Ressalta-se que o reservatório de sucção deve ser o mais largo possível com o intuito de que a variação de volume que ocorrer durante o ensaio altere o mínimo possível a altura da superfície livre e conseqüentemente altere menos a pressão na entrada da BPDF; a qual será considerada aproximadamente constante nos cálculos. O reservatório de recalque, no entanto, deve ser mais estreito a fim de tornar mais notável a variação do volume e conseqüentemente a vazão. Contudo, isso causaria uma grande variação no desnível entre as superfícies livres dos reservatórios a medida que o líquido é bombeado, por esse motivo o líquido é recalcado pela parte superior do reservatório, como mostra a figura, pois assim a altura é mantida constante.

Deve-se ressaltar que a BPDF trabalha como uma bomba afogada, ou seja ela fica num nível abaixo da altura da superfície livre do reservatório de sucção. Ressalta-se também que os demais dutos que ligam os reservatórios à bomba e outros dutos que sejam necessários não precisam ser flexíveis como o tubo de silicone da BPDF.

Como está demonstrado na Figura 7, o controle das seqüências e suas velocidades são feitas pelo computador através de uma rotina computacional que envia dados a porta paralela do computador. Como a corrente emitida pela porta de comunicação do computador (porta paralela) é muito pequena, ela não tem capacidade de acionar diretamente os relés, necessitando utilizar um circuito intermediário que amplifica a corrente de modo que ela seja suficiente para realizar a comutação dos relés; além disso, esse circuito protege a porta paralela de correntes indesejadas que são geradas quando os relés descomutam. Os relés por sua vez acionam os solenóides que atuam sobre o duto.

Os solenóides usados são alimentados com tensão de 12V a 30V e suas dimensões são apresentadas na Figura 8, e a Figura 9 mostra uma foto do solenóide.

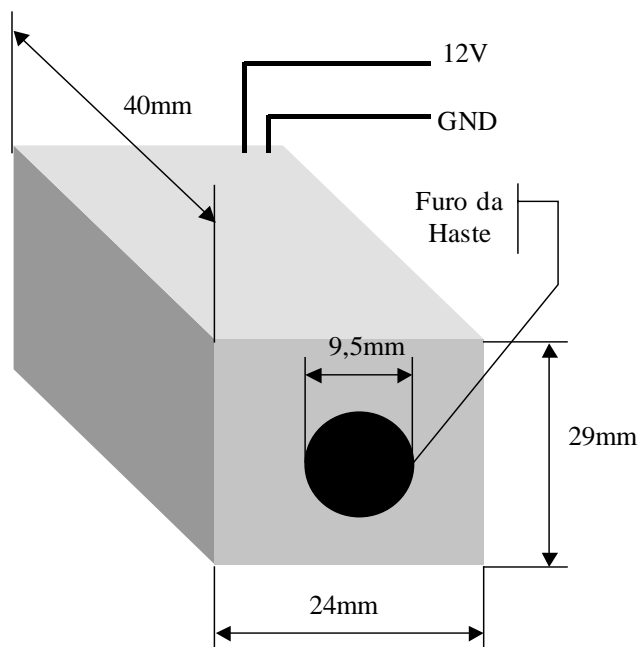


Figura 8 - Solenóide tensão 12V e suas dimensões



Figura 9 - Solenóide usado.

Para os dutos flexíveis a melhor solução encontrada são tubos feitos de silicone. Esse tipo de material tem boa flexibilidade e resistência, e podem ser fabricados em diversos tamanhos e espessura de parede permitindo que o tamanho e a rigidez do duto possam ser utilizados em ampla faixa de valores. Inicialmente para desenvolvimento utilizaremos tubos com a menor espessura de parede possível a fim de causar pouca resistência à força dos solenóides, a Figura 10 mostra o duto que

utilizaremos, devido à espessura da parede. A Figura 11 mostra a montagem do protótipo.

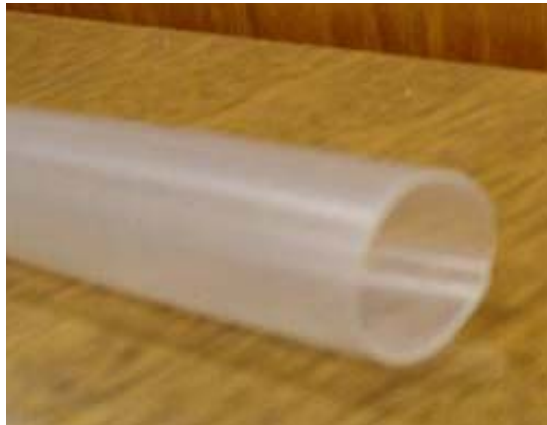


Figura 10 - Tubo de silicone de parede fina.



Figura 11 - Montagem do protótipo.

5. Circuitos Eletrônicos

Os circuitos eletrônicos usados nesse projeto, descrito na Figura 7 como circuito eletrônico de acionamento dos relés, são divididos em dois tipos: circuito de ganho de corrente e circuito de proteção dos contatos, sendo que cada solenóide tem seu próprio par de circuitos.

Os circuitos de ganho de corrente têm finalidade básica de suprir corrente suficiente para o acionamento dos relés, pois a porta paralela do computador não fornece corrente suficiente para comutar os relés. Permite também que os relés sejam acionados com tensão superior aos 5V fornecidos pela porta, possibilitando o uso de relés com menos limitações de corrente e tensão. Apesar de não estar implícito no nome, esse circuito funciona como proteção à porta paralela contra correntes e tensões indesejadas, as quais são criadas pelas bobinas dos relés quando desenergizadas.

O circuito descrito está apresentado na Figura 12, e como pode ser visto é um circuito simples, utilizando elementos simples tais como transistores NPN para realizar o ganho, diodos para proteção e resistores, mas que são suficientes para nosso propósito.

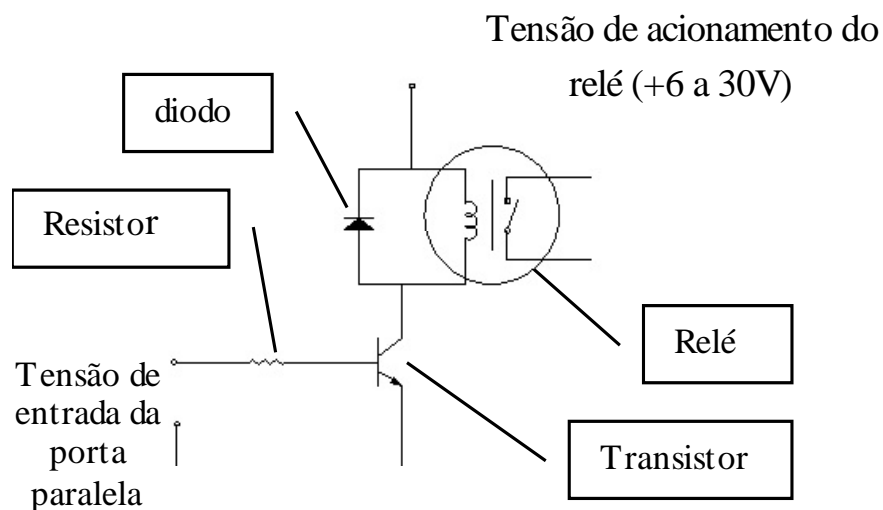


Figura 12 - Circuito de ganho.

O circuito de proteção dos contatos tem como finalidade proteger os contatos dos relés contra o faiscamento provocado por cargas indutivas, que é o caso dos solenóides. Portanto, emprega-se um diodo em paralelo com a carga a fim de evitar o aparecimento de altas tensões nos contatos na sua abertura, essas tensões causam faiscamento excessivo e com isso a queima dos contatos.

Como pode ser visto na Figura 13, este circuito é simplesmente a utilização de um diodo, com tensão reversa de 2 a 3 vezes a tensão de alimentação do solenóide, junto ao solenóide e ao relé. Na figura pode-se observar a tensão de alimentação do solenóide, essa tensão irá variar em determinada faixa de valores para que seja testado o desempenho da BPDF como será explicado posteriormente.

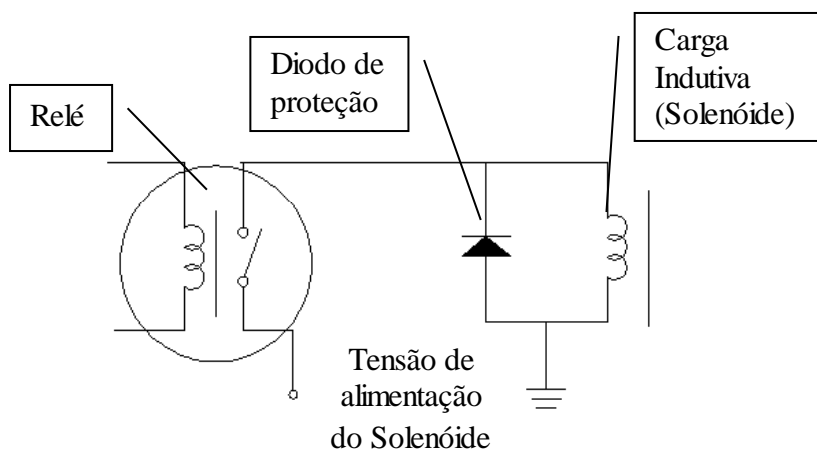


Figura 13 - Circuito de proteção dos contatos.

É importante observar que os relés apresentados nas Figura 12 e Figura 13 representam o mesmo contato, ou seja, ele une os dois circuitos. Mas adiante serão apresentadas características desses relés que podem influenciar na sincronização dos solenóides, tais como tempo de abertura e fechamento dos contatos.

Estes circuitos foram implementados, testados e demonstraram o desempenho conforme esperado.

6. Sincronização dos atuadores

Como já citado anteriormente, a sincronização dos atuadores será feita por computador através da porta de comunicação paralela. Para isso características da sincronização e seus parâmetros precisam ser definidos, pois através da manipulação destes podemos mudar as características do sincronismo e da forma de atuação.

As considerações básicas a serem feitas são referentes ao caráter periódico de cada solenóide devido à característica do bombeamento e que esse período é dividido entre o tempo no qual o solenóide esta energizado e o tempo no qual permanece desenergizado. Essas características são observadas e melhor compreendidas nos dados fornecidos pelos fabricantes de solenóides, como está mostrado na Figura 14, as curvas de força que o pistão de um solenóide genérico exerce em função do curso do mesmo para diferentes “Duty Cycle” [8].

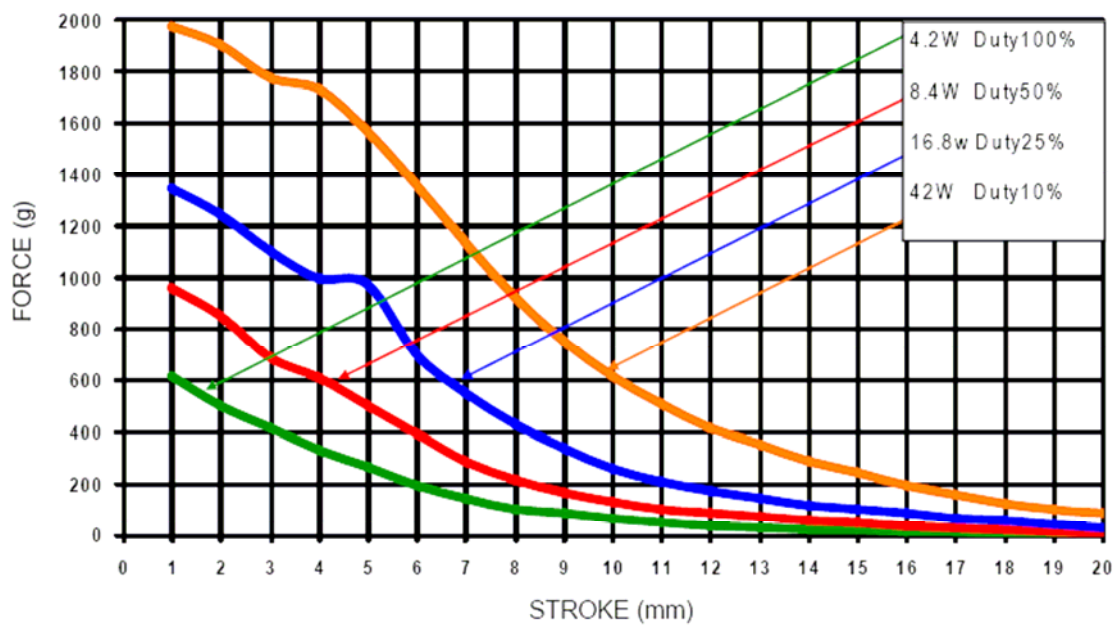


Figura 14 - Curvas de força por comprimento do curso de um solenóide.

O *Duty Cycle* correspondente a cada curva é simplesmente o valor do tempo em que o solenóide permanece energizado pelo valor do período do ciclo, que é igual

ao tempo energizado mais o tempo desenergizado, ou seja, o *duty cycle* representa o parâmetro que deve ser associado a cada solenóide:

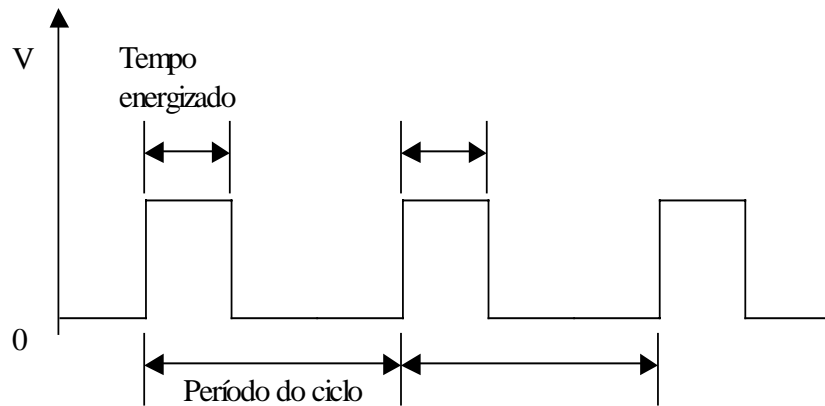


Figura 15 - esquema *Duty Cycle*.

$$DutyCycle(\%) = \frac{\text{tempo_ligado}}{\text{periodo_do_ciclo}} \cdot 100\%$$

Note na Figura 14 que quanto menor *duty cycle* maior é a força que o solenóide exerce para um mesmo curso do pistão e quanto menor o curso do pistão maior é a força exercida. Isso implica que a força do solenóide pode ser aumentada diminuindo o curso do pistão e conseqüentemente o tamanho do duto, e também que os solenóides não exercerão necessariamente a mesma força por terem *duty cycle* diferentes apesar de todos possuírem períodos iguais.

A característica do bombeamento também implica que os solenóides têm diferentes tempos de defasagem entre seus acionamentos, como está demonstrado na Figura 15. Esses tempos t_1 e t_2 devem ser escolhidos de modo que possa gerar fluxo como está esquematizado na Figura 3 e são em relação ao solenóide que atua primeiro, vale observar que apesar do caráter periódico do acionamento um atuador deve atuar primeiro como é mostrado também na Figura 3 e Figura 16.

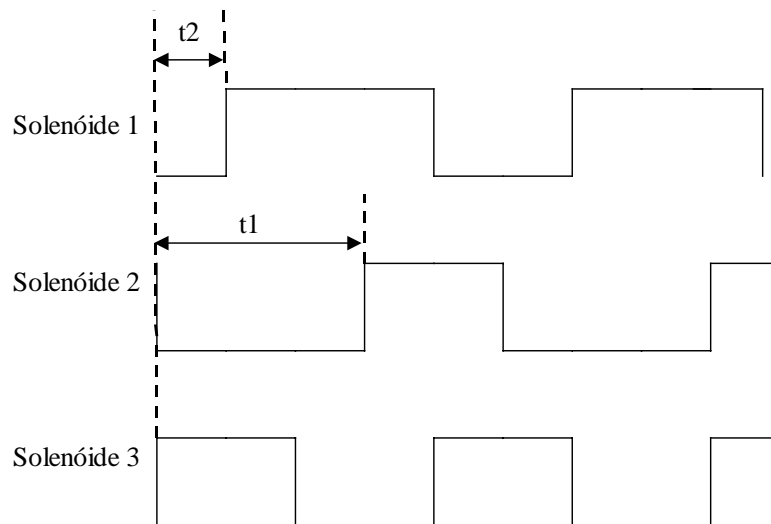


Figura 16 - Esquema de defasagem entre os atuadores.

Convém notar que estamos analisando somente os tempos dos atuadores e não estamos levando em conta os atrasos referentes ao circuito eletrônico e à comutação dos relés; e também devido aos relés, estamos considerando os atuadores apenas com dois estágio, atuando e não atuando, fato que facilita a implementação do acionamento de forma binária.

Portanto, a rotina implementada para sincronizar tem seis parâmetros de entrada que define a pulsação. Esses parâmetros são o período do ciclo (T) que define a frequência de pulsação e conseqüentemente a velocidade da bomba e é igual para todos os atuadores, o *duty cycle* de cada atuador ($DC1$, $DC2$ e $DC3$) e os tempos de defasagem ($t1$ e $t2$) em relação ao solenóide que atua primeiro. Com estes valores fornecidos o programa calcula os tempos de atuação e não atuação de cada solenóide para um ciclo completo e repete esse ciclo continuamente. A Figura 17 contém um diagrama de blocos da rotina.

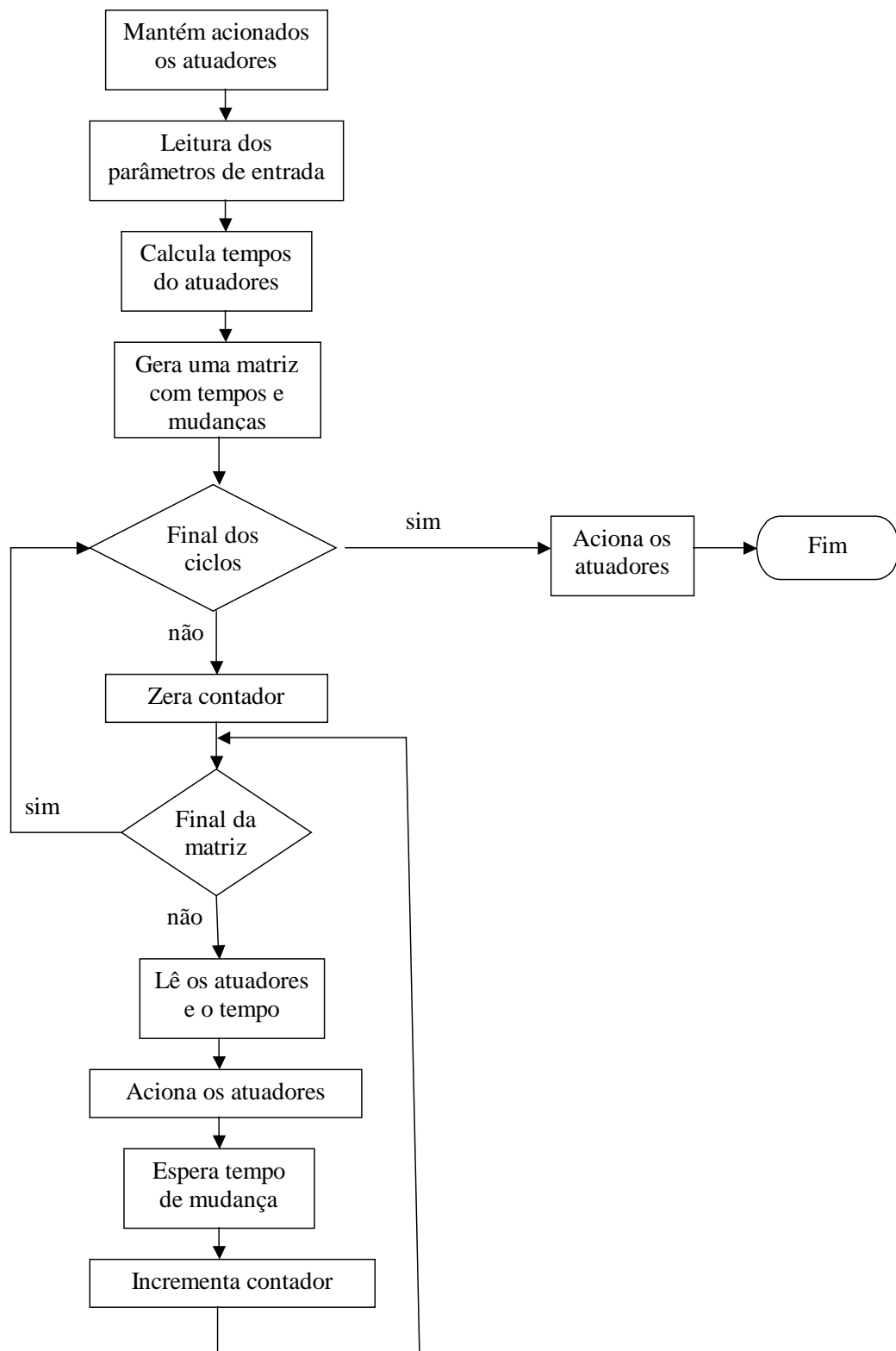


Figura 17 - Diagrama de blocos

Abaixo segue uma explicação das etapas da rotina:

- Mantém acionados os atuadores: Quando iniciado a rotina, esta etapa aciona os solenóides para evitar qualquer fluxo possível, funciona como uma válvula.
- Leitura dos parâmetros de entra: Faz a leitura dos parâmetros T , $DC1$, $DC3$, $DC3$, $t1$, $t2$ e número de ciclos.
- Calcula tempo dos atuadores: Através dos parâmetros o programa calcula em que tempo cada atuador deve ser energizado e qual deve ser desenergizado e quais devem se manter seu estado.
- Gera matriz com tempos e mudanças: gera uma matriz com duas linhas e n colunas, onde os elementos da primeira linha contêm o tempo onde deve ocorrer cada mudança e segunda linha corresponde ao estado de energização dos atuadores, cada elemento da segunda linhas indicam quais atuador deve estar energizado ou não naquele momento, para isso é guardado um número em hexadecimal.
- Final dos ciclos: Verifica se terminou o número de ciclos desejado, após esse comando os atuadores são acionados para evitar qualquer fluxo indesejado.
- Final da matriz: Verifica se a ultima coluna da matriz já foi lida, o que corresponde ao final do ciclo. Isso implica que o contador deve ser zerado para retornar ao inicio da matriz e do ciclo.
- Lê os atuadores e os tempos: Faz a leitura da matriz e determina qual atuador vai ser acionado, qual desacionado, qual mantém seu estado e quanto tempo deve esperar com essa configuração.
- Aciona os atuadores: Aciona e desaciona os atuadores lidos na matriz.
- Espera tempo: Espera o tempo lido na primeira linha da matriz.
- Incrementa contador: Incrementa o contador que percorre as colunas da matriz.

O código fonte em linguagem C, para a implementação da rotina de sincronização está apresentado no anexo A e junto são apresentados também comentários da programação e restrições do compilador e da linguagem usada.

7. Avaliação do Desempenho

Uma questão importante nesse trabalho é a forma como será avaliado o desempenho da bomba. Inicialmente avaliaremos quesitos como vazão, pressão, potência consumida e sincronismo.

Assim como para bombas convencionais iremos levantar curvas de pressão por vazão, curvas de potência e rendimento. No entanto, diferente de bombas convencionais nas quais se controla a rotação, em nosso caso controlaremos o sincronismo dos atuadores que podem variar tanto a frequência de pulsação quanto a forma que os atuadores trabalham. Para isso, levantaremos as curvas de pressão, potência e rendimento pela vazão em diferentes casos de sincronismo.

Dentre as curvas citadas as curvas de potência e rendimento pela vazão são de grande importância pois permitem comparar com as curvas correspondentes de bombas convencionais e avaliar o desempenho em relação as bombas já existentes cujas curvas estejam documentadas em literatura.

8. Resultados

Para a obtenção dos resultados para a análise e avaliação da bomba foi montado o aparato descrito no capítulo 4 e mostrado na Figura 7, e a sincronização foi feita de acordo com o descrito no capítulo 6

Foram realizados testes preliminares com diferentes tipos de sincronismos, tempos de defasagem (t_1 e t_2) e períodos dos ciclos. No entanto, apenas um tipo de sincronismo e tempos de defasagem apresentaram resultados e repetibilidade satisfatórios. Os sincronismos divididos em 5 etapas, idênticos aos apresentados na Figura 3 e cujos tempos de defasagem t_1 e t_2 são $1/5$ e $3/5$ do período do ciclo respectivamente, são as condições que apresentam as melhores condições para a avaliação da bomba e por esse motivo os resultados apresentados adiante serão baseados nesse tipo de sincronismo.

Havendo apenas um sincronismo e o tempo de defasagem satisfatório para avaliar o protótipo, o único parâmetro a ser variado são os períodos dos ciclos que se repetem. O protótipo foi ensaiado com ciclos de 50ms até 500ms, no entanto, dentro dessa faixa de tempos notou-se que para ciclos inferiores a 125ms e superiores a 325ms a pressão de recalque da bomba é muita baixa, não sendo suficiente para gerar fluxo. Portanto, os dados utilizados para a análise do protótipo e que serão apresentados aqui são para ciclos entre 150ms e 325ms. A Tabela 1 apresenta a média dos resultados obtidos para a faixa de períodos citada.

Os valores de vazão foram obtidos a partir do volume bombeado pelo tempo cronometrado de bombeamento e a pressão foi medida por um manômetro de coluna d'água. A corrente e tensão foram medidas através de multímetro digital, e a partir desses valores foi possível calcular sua potência.

Tabela 1 - Vazão, Pressão, Corrente, Rendimento e Potência para períodos de ciclos

Período (ms)	Vazão(ml/s)	Pressão (Pa)	Corrente (A)	Rendimento	Potência (W)
125	0,752	201,15	0,441	0,08	18,75
150	1,635	469,35	0,441	0,41	18,75
175	1,716	491,70	0,442	0,45	18,79
200	2,188	558,75	0,444	0,65	18,87
225	1,574	424,65	0,444	0,35	18,87
250	1,535	379,95	0,445	0,31	18,90
275	1,059	268,20	0,446	0,15	18,94
300	0,652	156,45	0,446	0,05	18,94
325	0,495	201,15	0,446	0,05	18,94

Esses valores obtidos permitem levantar as curvas de pressão e rendimento por vazão da bomba como mostrado na Figura 18. Como pode ser observado na Tabela 1 a potencia tem pouca variação, podendo ser considerada constante, por esse motivo a Figura 18 não apresenta a curva de potência.

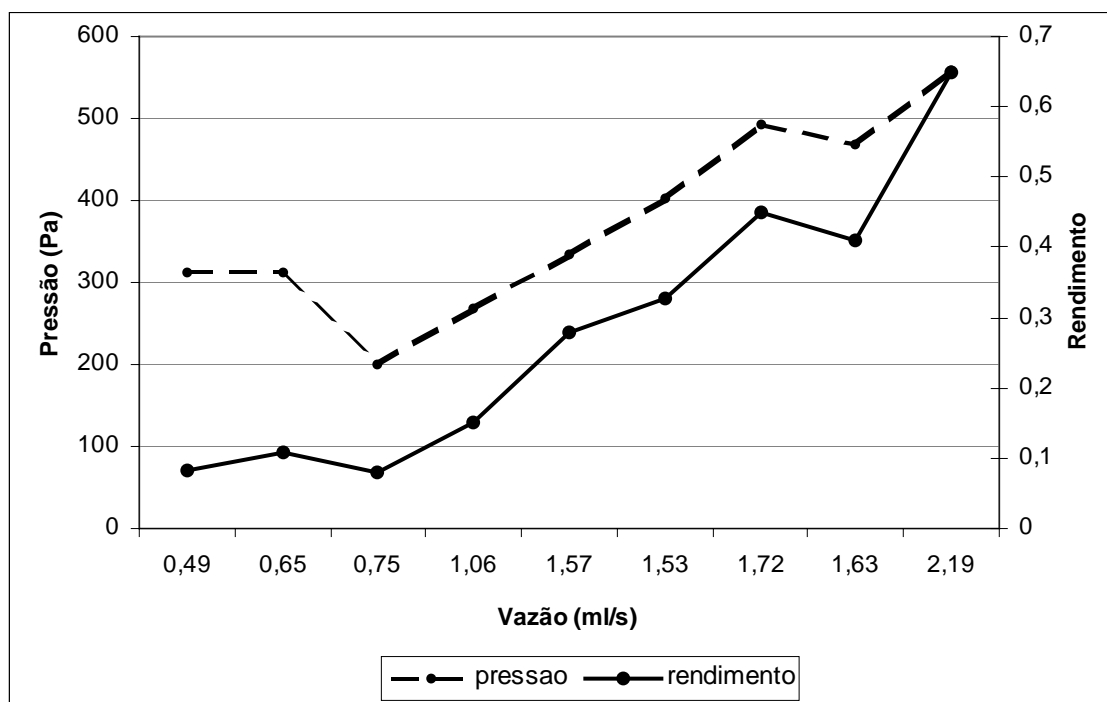


Figura 18 - Pressão e rendimento por vazão, potência 18,9W.

No entanto, as mais interessantes para observação são as curvas de vazão, pressão e rendimento pelo período dos ciclos, tais curvas estão apresentadas nas Figura 19, Figura 20 e Figura 21. Essas curvas mostram o comportamento da bomba dentro da faixa de períodos onde ocorre recalque, e verifica-se que existe uma região onde o bombeamento é mais eficiente. Como pode ser observado nas figuras essa região de maior eficiência está em torno de ciclos com período de 200ms. Dentro dessa região obtém-se vazão e pressão máximas e rendimento de até 65%, sendo portanto o período ideal de trabalho da bomba.

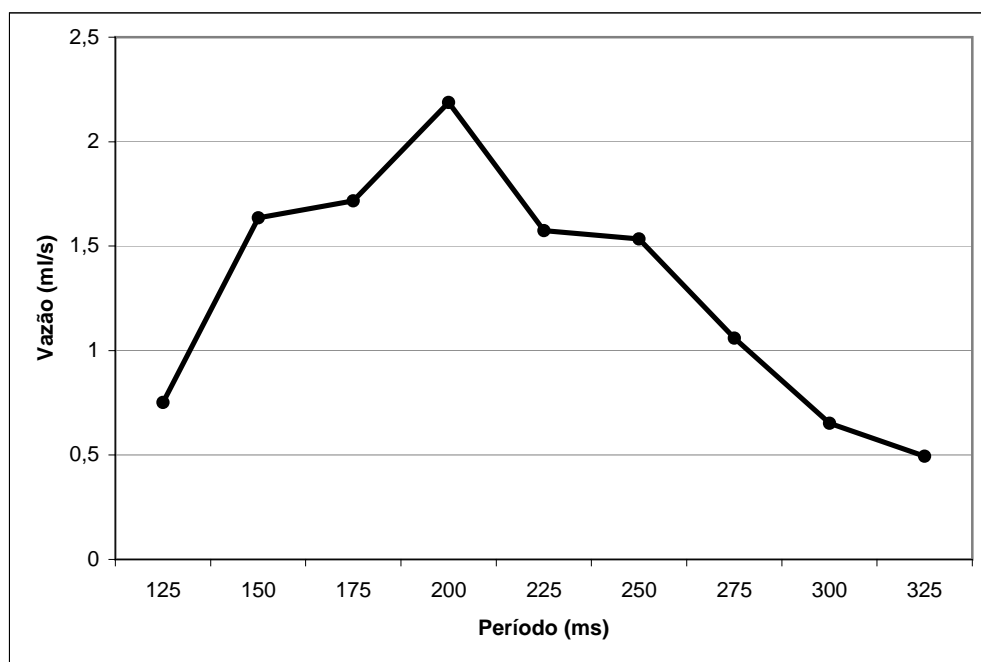


Figura 19 - Vazão por período do ciclo.

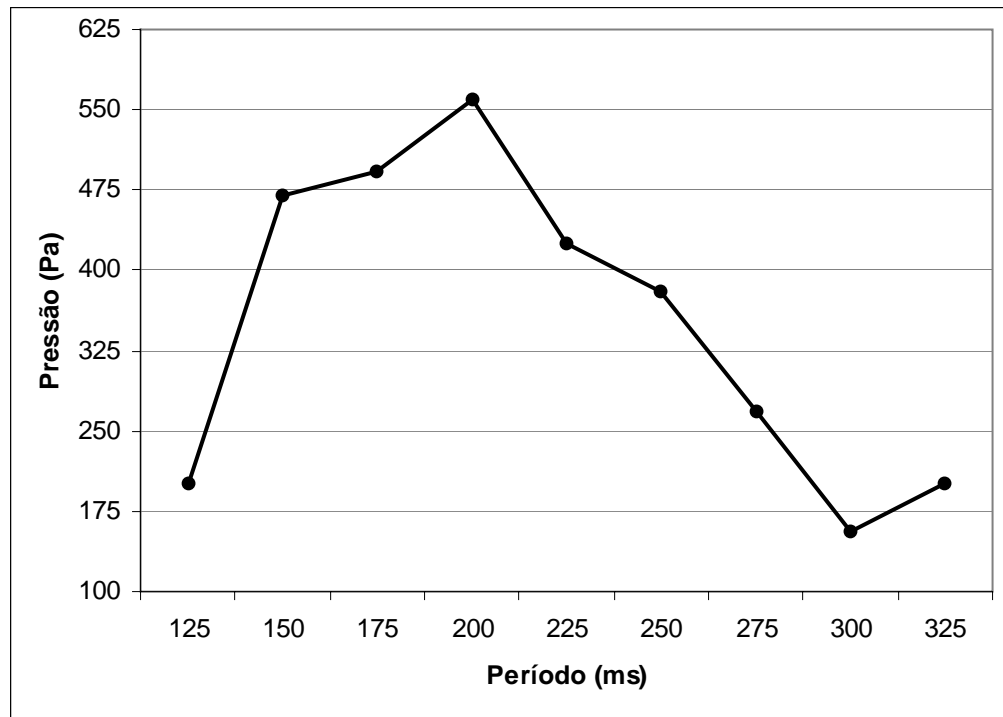


Figura 20 - Pressão por período do ciclo.

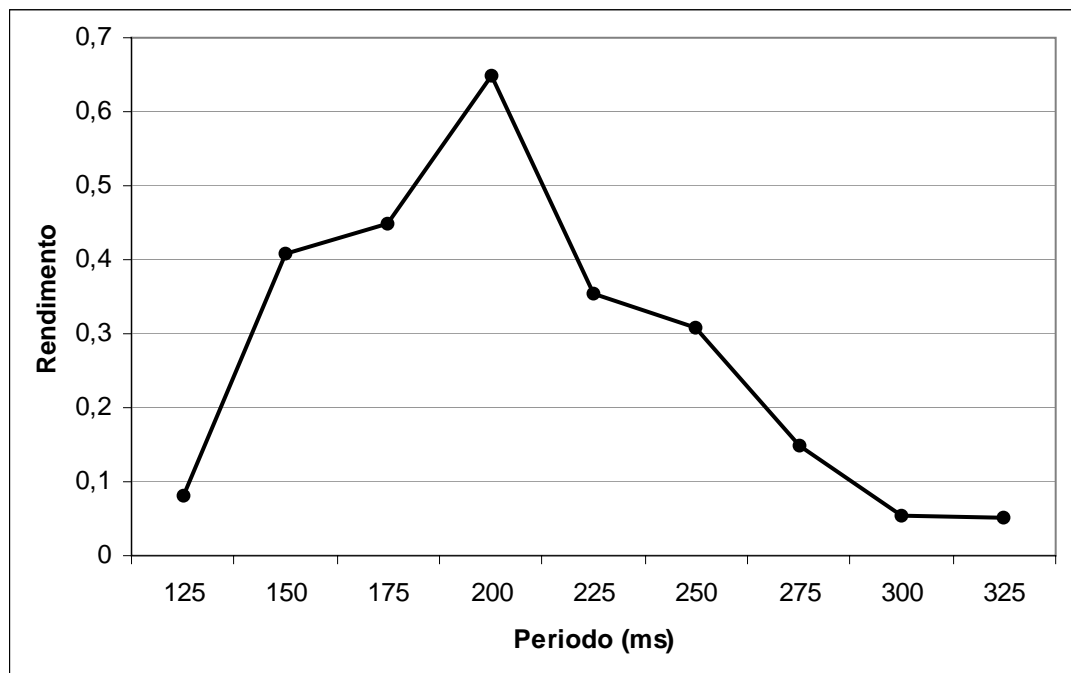


Figura 21 - Rendimento por período do ciclo.

9. Discussões

A partir desses resultados podemos notar que este tipo bomba tem capacidade de operar numa determinada faixa de período de ciclo e que para valores inferiores ou superiores não é possível gerar fluxo nem pressão suficiente. Para os períodos de ciclos superiores a faixa de operação pode-se concluir que quanto maior o período maior o tempo entre uma compressão do duto e a compressão seguinte, e portanto maior o tempo que o líquido tem para escoar no sentido contrário. Tal fato pode ser observado nas curvas de pressão e vazão por período do ciclo (Figura 19, Figura 20), onde a parte decrescente da curva diminui mais suavemente devido ao escoamento contrário que ocorre gradualmente até que não seja mais possível o bombeamento.

No caso dos períodos inferiores foi observado visualmente no próprio protótipo que as altas frequências de compressões não permitiam os pistões atingirem o final de seu curso e realizarem a compressão total devido à pressão hidrostática na entrada da bomba e consequentemente deslocavam um volume muito pequeno de líquido. No entanto, a partir de determinado valor os solenóides tem tempo suficiente para realizar a compressão total desejada, isso é observado no crescimento rápido da parte crescente da curva de pressão e vazão por ciclo. Convém lembrar também que o circuito de acionamento assim como a porta paralela tem tempos de atraso que não influenciam o período do ciclo.

Torna-se importante observar que o explicado acima está relacionado ao duto e aos atuadores utilizados, ou seja, o duto e os atuadores determinam a faixa e o ponto ótimo de operação. Estes podem ser modificados e melhorados para se obter melhores rendimentos, mas as características descritas das curvas permanecem, visto que são características do tipo de bomba proposta nesse trabalho.

Apesar do resultados satisfatórios, modificações são propostas para trabalhos futuros que tenham o intuito de otimizar ou de utilizar a BPDF. As principais melhorias a serem realizadas estão relacionadas à otimização dos atuadores, pois para este trabalho foram utilizados atuadores do tipo solenóides por serem de baixo custo, fácil obtenção, fácil acionamento e montagem; entretanto ainda existem perdas mecânicas devido ao atrito entre o corpo do solenóide e o pistão. Para

eliminar o máximo possível tais perdas seria necessário um estudo sobre atuadores ou mesmo desenvolver algum atuador ou forma de atuar que atendesse tal requisito.

Outra questão interessante diz respeito ao reaproveitamento de energia nos atuadores, no protótipo não foi utilizado nenhum tipo de sistema que reutilizasse a energia que os atuadores recebiam da descompressão do duto, este sistema poderia utilizar tal energia para auxiliar os próximos ciclos de compressão e proporcionar maior rendimento; ao invés disso, esta energia era transformada em energia térmica e causava aquecimento excessivo dos solenóides. Entretanto, deve-se considerar que sistemas de reaproveitamento são importantes, independente do tipo de acionamento e são propostas para trabalho posteriores.

Outro problema relevante além do aquecimento excessivo é a vibração do protótipo que conseqüentemente torna-o barulhento e incomodo. O tipo de montagem e o solenóide utilizado causam impactos entre as partes do BPDF causando vibração indesejada, a qual se torna mais crítica para período de ciclos mais curtos, podendo em algum caso atingir frequências de ressonância.

10. Conclusão

A partir dos resultados obtidos e das características apresentadas e descritas anteriormente, podemos obter conclusões quanto ao protótipo construído e a BPDF. Inicialmente, o simples bombeamento e geração de fluxo e pressão confirmam a principal idéia de funcionamento (esquematizada na Figura 3), mostrando a possibilidade de utilizar a idéia proposta em bombeamentos como o de corações artificiais e de sistema de resfriamento já propostos no início deste trabalho. Além disso, as curvas obtidas mostram características da BPDF que devem ser consideradas na implementação desse tipo de bomba para as aplicações citadas. Outras aplicações também podem empregar os princípios da BPDF, sendo necessário estudos relacionados à viabilidade de tal utilização.

Importantes conclusões são desenvolvidas com relação ao desempenho do protótipo. Como já apresentado nos capítulo de discussões, esse tipo de bomba trabalha dentro de determinada faixa de período de ciclo, a qual é determinada pelo duto flexível e pelos atuadores utilizados, sendo que dentro dessa faixa existe um período de operação ótimo; podemos concluir que isso são características do tipo de bombeamento e conseqüentemente da bomba, como já citado anteriormente, essas características devem ser levados em consideração na implementação da BPDF.

No início deste trabalho foi proposto a utilização desse tipo de bomba em corações artificiais e sistemas de refrigeração, modificações no duto e nos atuadores podem ser feitas para obter-se maior eficiência, visto que o protótipo atinge apenas 0,65 de rendimento em seu ponto ótimo e para essas aplicações é necessário o maior rendimento possível. No entanto, os resultados apresentados aqui se referem basicamente ao funcionamento da bomba e suas características, análises de eficiência em refrigeração, danificação por hemólise ou embolia gasosa, os quais estão relacionados a esses tipos de aplicações, não foram abordados, entretanto são essenciais para empregar a BPDF em tais aplicações, sendo também uma proposta para trabalhos futuros.

REFERENCIAS

- [1] MACINTYRE, A. J. Bombas e Instalações de Bombeamento. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- [2] ROSHAN PAKISTAN. Health Issues: Artificial Heart (ABIOCOR). Disponível em: <<http://www.roshanpakistan.com/web-magazine/Health/aheart.php>>. Acesso em: 21/06/2007.
- [3] BENNETT M., HORTON S., THUYS C., AUGUSTIN S., ROSENBERG M. e BRIZARD C.. Hemólise induzida pela bomba: uma comparação de dispositivos de assistência ventricular de curto prazo. Reproduzido com permissão dos Editores. Traduzido do original por Maria Helena L. Souza e Decio O. Elias. Revista Latinoamericana de Tecnologia Extracorpórea XI,2,2004. Disponível em: <<http://perflin.com/revista/volume11/v11n2/v11n2-01.html>>. Acesso em: 21/06/2007.
- [4] WADA E., DOGNANI G., BOCK E., DINKHUYSEN J., BISCEGLI J.F., ANDRADE A.. Estudos “in vitro”, “in vivo” e experiência clínica com a spiral pump durante. Instituto "Dante Pazzanese" de Cardiologia e Fundação Adib Jatene Pesquisa. Disponível em: <http://www.cori.rei.unicamp.br/CT/resul_trbs.php?cod=262>. Acesso em: 21/06/2007.
- [5] SEVEN HOT NEW WATER COOLING SYSTEMS TESTED. Cooler Head Is Very Effective. Disponível em: <http://www.tomshardware.com/2004/09/20/7_hot_new_water_cooling_systems_tested/>. Acesso em: 21/06/2007.
- [6] UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA, FACULDADE DE CIENCIA E TECNOLOGIA. Lisboa. Processo da Industria Química. Disponível em: <www.dq.fct.unl.pt/alunos/equimica/Downloads/Projecto/fpq2001_transporte.PDF>. Acesso em: 17Abr. 2007.
- [7] MADOU, Marc. Fundamental of Microfabrication. 2 ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000.
- [8] TRANSMOTEC SWEDEN AB. Taby, Sweden. F1040L Open Frame Solenoid. Disponível em: <http://www.transmotec.com/PDF/Solenoids_Open_Frame/F1040.pdf>. Acesso em: 15/04/2007.
- [9] MALVINO, Albert Paul. Eletrônica. 4. ed., São Paulo: Ed. Makron, 1997.

- [10] HANCOCK, Les. Manual de linguagem C. 2. ed., Rio de Janeiro : Ed. Campus, 1986.
- [11] PURCELL, Edward Mills. Eletricidade e magnetismo. São Paulo : Ed. Edgard Blucher, 1973.
- [12] MUNSON, Bruce Roy. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. 4. ed., São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 2004.
- [13] METALTEX, Produtos Eletrônicos. Newton C. Braga, Revista Saber Eletrônico. Disponível em: <
<http://www.metaltex.com.br/tudosobreleles/tudo1.asp> >.
Acesso em: 15/07/2007.

ANEXO A – Rotina de Sincronização

A seguir é apresentado o código fonte desenvolvido para sincronizar os atuadores. Como indicado na Figura 17 o código lê os parâmetros Tn, t1, t2, Dc1, DC2, DC3, e a partir dele gera a sincronização.

É importante ressaltar que para o acesso a porta paralela não existe uma biblioteca de comandos padrão na linguagem C, essa biblioteca varia de compilador para compilador. Nesse caso, foi utilizado um compilador TurboC, no qual as bibliotecas “conio.h” e “dos.h” permitem o acesso a porta através dos comando “outp” e “inp”.

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h> //Biblioteca necessaria para acessar a porta paralela
#define baseport 0x378 /* define o endereço da porta lp1*/

void aciona(int ma[10][10]); //Função de acionamento

int main(){

    int Tn,t1,t2,DC1,DC2,DC3; //parametros necessario, ver capitulo 6
    int m[10][10]; //matriz com os valores de tempo e com os solenoides a serem
                    acionados

    int solen[10][10]; //matriz usada para montar a matriz m

    int d[2][1]; //matriz auxiliar
    int tempo_ligado1;
    int tempo_ligado2;
    int tempo_ligado3;
    int i; //contador
    int j; //contador

    outp(baseport,0x07); //aciona todos os solenoides

    printf("0x%X\n",inp(baseport)); //imprime o valor da porta

    printf("Digite Tn, t1, t2, DC1, DC2, DC3 \n");

    scanf("%d %d %d %d %d %d",&Tn,&t1,&t2,&DC1,&DC2,&DC3); //le os
    parametros
```

```
//São adicionados na primeira linha da matriz solen o tempo onde deve ocorrer
//o acionamento ou desacionamento de algum solenoide, e na segunda linha é
adicionado o valor
//que deve ser enviado a porta para acionar os respectivos solenoides
```

```
tempo_ligado1=Tn*DC1/100;
tempo_ligado2=Tn*DC2/100;
tempo_ligado3=Tn*DC3/100;
```

```
solen[1][1]=0;
solen[2][1]=00;
solen[1][2]=t1;
solen[2][2]=01;
solen[1][3]=t1+tempo_ligado1;
solen[2][3]=-01;
```

```
solen[1][4]=0;
solen[2][4]=00;
solen[1][5]=t2;
solen[2][5]=02;
solen[1][6]=t2+tempo_ligado2;
solen[2][6]=-02;
```

```
solen[1][7]=0;
solen[2][7]=04;
solen[1][8]=tempo_ligado3*2/3;
solen[2][8]=-04;
solen[1][9]=Tn-tempo_ligado3*1/3;
solen[2][9]=+04;
```

```
//Zera a matriz onde deverão ser armazenados os valores
```

```
for(i=0;i<=10;i++){
    for(j=0;j<=10;j++){
        m[i][j]=0;
    }
}
```

```
//É feita a leitura da matriz solen e as colunas são organizadas na matriz m
//em ordem crescente do tempo da primeira linha
```

```

printf("\n");

for(i=1;i<=9;i++){
    for(j=i+1;j<=9;j++){
        if(solen[1][j]<solen[1][i]){
            d[1][1]=solen[1][i];
            d[2][1]=solen[2][i];
            solen[1][i]=solen[1][j];
            solen[2][i]=solen[2][j];
            solen[1][j]=d[1][1];
            solen[2][j]=d[2][1];
        }
    }
}

//Elimina tempos repetidos

for(i=1;i<=9;i++){
    if(solen[1][i]==solen[1][i+1]){
        solen[2][i]=solen[2][i]+solen[2][i+1];
        for(j=i+1;j<=9;j++){
            solen[1][j]=solen[1][j+1];
            solen[2][j]=solen[2][j+1];
        }
    }
}

//Monta na matriz m o estado de cada momento

m[1][1]=solen[1][1];
m[2][1]=solen[2][1];
for(i=2;i<=9;i++){
    m[1][i]=solen[1][i];
    m[2][i]=m[2][i-1]+solen[2][i];
}

//Tendo a matriz m organizada é chamado a função de acionamento
aciona(m);

return 0;
}

```



```

//Esta função apenas le a matriz fornecida e manda para a porta o valor
existente
// na segunda linha da da matriz e espera o tempo existente na primeira linha

void aciona(int ma[10][10]){
int i;
int j;
int pausa,num_ciclos;
int cont;
int recebe;

printf("numero de ciclos?\n");

scanf("%d",& num_ciclos);//le o numero de ciclos que se quer executar

pausa=0;

//Loop que executa o numero de ciclos desejados
while(pausa<=num_ciclos){

    //Loop que executa um ciclo
    for(cont=1;ma[1][cont+1]-ma[1][cont]>=0;cont++){
        recebe=ma[2][cont];
        outp(baseport,recebe);//coloca na porta o valor que aciona os
solenóide

        printf("0x%X\n",inp(baseport));//imprime o valor da porta apos o
acionamento
        printf("tempo=%d\n",ma[1][cont+1]-ma[1][cont]);// imprime o tempo
de espera para verificação

        sleep((ma[1][cont+1]-ma[1][cont])/10);//espera o tempo necessario
    }
    pausa++;
}
outp(baseport,0x07);// aciona todos os solenóides

printf("terminar?\n ");
getch();

return;
}

```