

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Modelagem de microbomba peristáltica de elastômero usando a técnica de analogias eletro-mecânicas

Autor: Alexey Marques Espindola
Orientador: Luiz Otávio Saraiva Ferreira

44/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL**

Modelagem de microbomba peristáltica de elastômero usando a técnica de analogias eletro-mecânicas

Autor: Alexey Marques Espindola
Orientador: Luiz Otávio Saraiva Ferreira

Curso: Engenharia Mecânica.
Área de Concentração: Mecânica dos sólidos e Projeto mecânico.

Dissertação de mestrado acadêmica apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2006
SP – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Es65m Espindola, Alexey Marques
Modelagem de microbomba peristáltica de elastômero usando a técnica de analogias eletromecânicas / Alexey Marques Espindola. --Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Luiz Otávio Saraiva Ferreira
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Modelagem de dados. 2. Modelos matemáticos. 3. Analogias eletromecânicas. 4. Micromecânica. I. Ferreira, Luiz Otávio Saraiva. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Modeling peristaltic micropump with electro-mechanical analogies

Palavras-chave em Inglês: Lab-on-a-chip (LOC), Micropumps, Modeling, Electro-mechanical analogies, Microfluidics, Microfluids, Micro-electro-mechanical systems (MEMS)

Área de concentração: Mecânica Computacional

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Renato Pavanello e Fernando de Almeida França

Data da defesa: 24/02/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Modelagem de microbomba peristáltica de elastômero usando a técnica de analogias eletro-mecânicas

Autor: Alexey Marques Espindola
Orientador: Luiz Otávio Saraiva Ferreira

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira
DMC/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Renato Pavanello
DMC/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Fernando de Almeida França
DE/FEM/UNICAMP

Campinas, 24 de fevereiro de 2006

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha querida esposa Liliana.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A Deus, pela vida.

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira pela orientação paciente e dedicada.

A minha Esposa, Liliana, por compartilhar todos os momentos de alegrias e dificuldades.

Aos meus colegas do Laboratório de Micromecatrônica: Julio Fernandes, Luiz C. Marangoni, Antonio Gracias, Márcio Rubbo e Márcio Maciel.

A todos os professores e colegas do departamento de mecânica computacional, da Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A Capes, pelo apoio financeiro.

Resumo

Os sistemas microfluidicos estão evoluindo rapidamente, encontrando vastas aplicações na mais diversas áreas do conhecimento. Os Lab-on-Chips, LOCs, são dispositivos capazes de realizar análises químicas e bioquímicas em um único chip. Este dispositivo pode causar grande impacto no mercado de análises laboratoriais, por este motivo vem ganhando grande atenção. Para realizar estas análises os LOCs necessitam de microbombas capazes de transportar quantidades ínfimas de fluidos em seus canais de maneira acurada e uniforme. Desta forma, o interesse em modelar e fabricar microbombas tornou-se uma área fértil para a pesquisa.

Neste trabalho foi desenvolvida a modelagem de uma microbomba peristáltica de elastômero, tipo de bomba mais conveniente para Lab-on-Chips, utilizando a técnica de analogias eletro-mecânicas que consiste em representar um dispositivo por um circuito elétrico equivalente. As análises das simulações podem ser realizadas usando programas de análise de circuitos elétricos.

Dois modelos foram apresentados neste trabalho. O primeiro é a reprodução do modelo de bomba criado por Jacques Goulpeau, em que o modelo de uma válvula é extrapolando para toda a microbomba. O segundo contém o circuito elétrico equivalente da bomba completa mostrando as interações entre suas partes. Os resultados mostram que o comportamento da microbomba não pode ser completamente descrito pelo modelo extrapolado a partir de uma válvula, devido às interações entre três válvulas. As simulações do circuito equivalente da bomba completa mostraram que os efeitos das interações entre as válvulas explicam claramente a diferença entre a vazão prevista pelo modelo de Goulpeau e os dados experimentais por ele obtidos, sendo possível ajustar o modelo aos dados experimentais.

Abstract

Microfluidics systems are growing rapidly, finding a large number of applications in many fields. Lab-on-chips, LOC, are devices that can perform chemical and biochemical analyses in a chip. This device can cause high impact on laboratorial analyses market, and then it is gaining large attention. In order to execute these analyses on LOC, micropumps are necessary to transport a tiny quantity of fluid between the channels with accuracy and uniformity. Thus, the interests of modeling and fabrication micropumps are increasing and become a fertile research field.

The goal of this work were a modeling of elastomer peristaltic micropump, the most suitable pump for LOCs, using the electro-mechanical analogy technique that consist in represent the device in a electrical equivalent networks. Then the simulation analyses can be done on electrical simulation tools.

Two models were presented in this work. The first is reproduction of the pump model made by Jacques Goulpeau et al., where the valve model is extrapolated to the whole micropump. The second contains the electrical equivalent circuit that represents the whole device showing the interactions between its components. The results showed that micropump behavior couldn't completely describe by the extrapolated model from a valve, because the interactions between the three valves. The simulations of electrical equivalent circuit of the whole pump showed that the interaction between the valves explain the difference between of flow rate foreseen by Goulpeau model and his experimental data, being possible to adjust the model to the experimental data.

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iv
Nomenclatura	v
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Microbombas	2
1.2 Microbomba peristáltica de elastômero	9
1.3 Objetivo da Pesquisa	13
1.4 Justificativa	13
Capitulo 2	15
Modelagem de microbombas	15
2.1 Analogias Eletro-mecânicas	17
Capítulo 3	26
Modelagem de microbomba peristáltica de elastômero	26
3.1 Funcionamento e parâmetros primários da microbomba	26
3.1 Modelos	29
3.2 Modelo I: Modelo de Válvula	35
3.3 Modelo II: Modelo completo da microbomba	43
Capitulo 4	46
Resultados	46
4.1 Variação dos parâmetros da chave analógica do modelo I	48
4.2 Modelo I	54
4.3 Modelo II	56

Capitulo 5	71
Análise dos resultados e conclusão	71
Propostas para trabalho futuros	73
Referências Bibliográficas.....	74

Lista de Figuras

Figura 1 Microbomba peristáltica fabricada Jan Smits.....	3
Figura 2 Diagrama de representa a classificação das microbombas.....	3
Figura 3 Ciclo de bombeamento das microbombas de deslocamento.....	5
Figura 4 -Representação de diferentes mecanismos de atuação.....	6
Figura 5 - Dispositivo memória microfluídica com 1000 compartimentos independentes e 3574 micro-válvulas	8
Figura 6 -Arquitetura de cruzamentos de canais para a formação da microbomba peristáltica. (a) Gráfico óptico da microbomba. (b) Desenho esquemático da microbomba.....	10
Figura 7 - Geometria “push-down” e “push-up” (válvulas).....	11
Figura 8 - Elementos concentrados trocando energia.....	18
Figura 9 : Elemento concentrado sob um esforço e com um fluxo f fluindo pelos seus terminais.....	19
Figura 11 – Temos a representação do resistor, capacitor e indutor generalizado.....	22
Figura 12 - Representação da fonte de esforço e fluxo generalizados.....	22
Figura 13 – Sistema massa –mola e amortecedor sob a atuação de uma Força.....	23
Figura 14 – Circuito elétrico equivalente para o sistema massa mola e amortecedores e analogias eletro-mecânicas.....	23
Figura 15 – O comportamento do sistema massa-mola.....	25
Figura 16 – Desenho esquemático da microbomba peristáltica de elastômero (a). (b) representa o ciclo de bombeamento dessa microbomba.....	27
Figura 17 – Dimensões dos canais de trabalho dos canais de atuação correspondentes ao da tabela 6.	29
Figura 18 – A microbomba pode ser dividida em tubo e membranas sob a influência de pressões de atuação e atmosféricas.....	30

Figura 19- Representação do tubo de uma microbomba em elementos concentrados de circuitos elétricos.....	32
Figura 20 – Circuito elétrico equivalente para uma válvula.....	34
Figura 21 – Circuito completo da microbomba.....	35
Figura 22 – Modelo de válvula criado por Jacques Goulpeau et al [43], e extrapolado para toda microbomba.....	37
Figura 23 – Circuito elétrico equivalente implementado no MultiSim 2001.....	39
Figura 24- A forma de onda da resistência oferecida pela chave analógica é bem próxima a resistência variável da equação 20.	40
Figura 25 – Circuito elétrico equivalente para toda a microbomba.....	43
Figura 26- As ondas quadradas destes gráficos representam as pressões de atuação P_{a1} , P_{a2} , e P_{a3} sobre as membranas.	47
Figura 27- Janela de controle de parâmetros da chave analógica.	48
Figura 28- Os valores para CON e COFF para este gráfico são respectivamente 0 e 2,5V. O valor da pressão de controle, P_a , varia de 0 a 2.5V. A linha sólida representa a diferença de pressão, Π , na membrana.....	49
Figura 29- Os valores para CON e COFF para este gráfico são respectivamente 4.5 e 2.25V. E o valor pressão de Controle, P_a , varia de 0 a 2.5V. A linha sólida representa a diferença de pressão na membrana.....	50
Figura 30- h representa o comportamento de abrir e fechar da válvula. Condição de COFF=2,5V e CON=0V.....	52
Figura 31- h para a condição de COFF=4.5V e CON=2.25V.	53
Figura 32- Temos o fluxo de saída do modelo I	54
Figura 33- Pressão no tubo na região da membrana, representada por G_1	55
Figura 34- Gráficos das pressões diferenciais nas membranas.....	57
Figura 35- Nesta figura podemos verificar a influencia da pressão diferencial de uma membrana sobre as a outras duas.....	58
Figura 36- Gráficos das pressões nos tubos da microbomba.....	59
Figura 37- Os fluxos da microbomba sofrem modificações com a variação da pressão diferencial e da pressão no tubo.....	61
Figura 38 A variação da posição h é influenciada de pela pressão diferencia.	62

Figura 39- Temos a pressão de atuação, onda quadrada, e o comportamento da pressão diferencial na última membrana do sistema.63

Figura 40- As variações diferenciais de pressão de membrana são refletidas nas demais (a). (b) Comparação entre as pressões diferenciais sobre a membrana representada por C_364

Figura 41- (a) Gráficos das pressões média nos tubos da microbomba. As variações das pressões diferenciais causam um uma mudança nas pressões dos tubos, P_{mc_1} , P_{mc_2} e P_{mc_3} . (b) Comparação entre os efeitos de contra pressão na região válvula C_365

Figura 42 - Todos os fluxos da microbomba sofrem modificações com a variação da pressão diferencial e da pressão no tubo.66

Figura 43- O fluxo saída, corrente em R_4 , em um ciclo de bombeamento.67

Figura 44 -Temos a pressão de atuação, onda quadrada, e o comportamento da pressão diferencial na membrana.68

Figura 45- (a) A variação da posição h influenciada pela pressão diferencial do sistema, sendo as interações mostradas pelos picos do gráfico. (b) Comportamento de h com valores de $CON=2,25V$ e $2V$69

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características das microbombas peristálticas de elastômero.	12
Tabela 2 - Características das microbombas peristálticas de elastômero.	12
Tabela 3 - Características das microbombas peristálticas de elastômero.	12
Tabela 4 - mostra a correspondência entre o domínio elétrico e os demais domínios físicos através das variáveis generalizadas esforço, $e(t)$, fluxo, $f(t)$, momento, $p(t)$ e deslocamento, $q(t)$	20
Tabela 5 – Analogias entre os domínios elétrico e mecânico.	24
Tabela 6 – Parâmetros primários da microbomba.	28
Tabela 7 – Parâmetros da microbomba.....	36
Tabela 8 – Condições fixas de funcionamento da microbomba.....	38
Tabela 9 – Valores escalonado para os elementos R, C, fontes e cargas.	41
Tabela 10 - Condições impostas a todas as simulações	46

Nomenclatura

Capítulo 1

- P_a – pressão de atuação
 $P_{câmara}$ – pressão na câmara da microbomba
 ΔP – pressão diferencial sobre a membrana
 f – frequência

Capítulo 2

- Φ_{\max} – fluxo produzido por um gradiente de pressão
 P – potência
 P_{AB} – potência de de um corpo A para um corpo B
 P_{BA} – potência de de um corpo A para um corpo B
 g_1 – numero real qualquer
 g_2 – numero real qualquer
 $e(f)$ – variável esforço
 $f(t)$ – variável fluxo
 V – voltagem
 $q(t)$ – deslocamento generalizado
 $p(t)$ – momentum generalizado
 F – força
 m – massa
 x – deslocamento

- L_n – indutância, onde n é um índice qualquer
- i_n – corrente, onde n é um índice qualquer
- Q – carga
- R_n – resistência, onde n é um índice qualquer
- $F(q)$ – função bem comportada passando pela origem
- $\Psi(q)$ – função bem comportada passando pela origem
- C_n – capacitância, onde n é um índice qualquer
- k – constante elástica da mola
- b – coeficiente de amortecimento
- e_R – esforço sob a resistência
- e_L – esforço sob o indutor
- e_C – esforço sob o capacitor

Capítulo 3

- L_w – Comprimentos do canal de trabalho
- L_a – Comprimento do canal de atuação
- w_w – Largura do canal de trabalho
- w_a – Largura do canal de atuação
- h_w – Altura do canal de trabalho
- h_a – Altura do canal de atuação
- H – Espessura da membrana
- E – Módulo de Young do elastômero
- ν – Coeficiente de Poisson do elastômero
- d_v – Distância entre as válvulas
- S – Área de secção transversal do canal de trabalho
- v – a velocidade do fluido
- P_n – pressão, onde n é um índice qualquer
- η – a viscosidade do fluido

- ρ – densidade do fluido.
- r_n – resistência variável, onde n é um índice qualquer l
- r_o – resistência constante
- Φ – fluxo produzido por um gradiente de pressão
- V_v – volume em baixo de uma válvula
- P_{op} – mínima pressão necessária para fechar a válvula
- Π – pressão diferencial
- λ – fator de escalamento
- α – fator de conversão

Capítulo 1

Introdução

A tecnologia de micro-sistemas engloba atualmente, dentre outras, a área de análises químicas e bioquímicas, em que dispositivos microfluídicos são usados para transportar e manipular quantidades ínfimas de fluidos e ou entidades biológicas através de micro-canais. A integração desses processos em micro-sistemas de análises automatizados [1-3] são conhecidos como *Lab-On-a-Chip* (LOC). Estes surgiram na indústria farmacêutica quando se observou que, para se desenvolver mais rapidamente novas drogas a baixo custo, eram necessárias a síntese simultânea de milhares de compostos químicos distintos, num conceito que ficou conhecido como *combinchem* (dispositivos para análise química combinatorial), para o qual a miniaturização era um fator essencial.

A proposta inicial dos *combinchem* era baseada na utilização de pequenos frascos onde reagentes químicos eram combinados e os produtos analisados, surgindo assim o primeiro LOC [4]. Até o momento, os LOCs têm apresentado um impacto direto sobre dois mercados: o de diagnóstico médico e o de instrumentação de laboratório. Os maiores exemplos são os dispositivos de teste *point-of-care*, que têm amplo uso em Unidades de Terapia Intensiva (UTIs), ambulâncias, maternidades, monitoração ambiental e alimentícia, dentre outras aplicações [4]. Os LOCs podem ser agrupados em duas categorias de aparelhos: 1) Os baseados em sistemas microfluídicos e 2) Os arranjos de sensores seletivos.

Os dispositivos baseados em sistemas microfluídicos podem desempenhar as funções de separação, pré-concentração e síntese química, podendo conter capacidade de aquisição de dados

(eletrônica) e de detecção (análise) no mesmo substrato. A meta é que os LOCs integrem as funções necessárias para desenvolver processos químicos em um único ``chip`` [4].

Os LOCs normalmente são feitos de vidro, em alguns casos, ou de polímeros, na maioria dos casos, e as tecnologias mais usadas são a LIGA (e suas derivadas) e litografia macia [4].

Como consequência da popularização dos LOCs microfluídicos, que exigem o transporte de maneira acurada e uniforme de uma pequena quantidade de fluido, há crescente interesse em microbombas [5], que são componentes-chave para os LOCs e serão apresentadas em mais detalhes a seguir.

1.1 Microbombas

A introdução de agentes terapêuticos no corpo humano tem sido o mais velho objetivo da pesquisa em microbombas. Dentre as primeiras microbombas, a fabricada por Jan Smits em torno de 1980 destinava-se a controlar a liberação de insulina em diabéticos mantendo níveis aceitáveis de açúcar no sangue sem a necessidade de injeções (Figura 1)[6]. No entanto, as microbombas possuem aplicações em muitas outras áreas como, por exemplo, a utilização de microbombas em refrigeração de circuitos microeletrônicos [7], na exploração espacial (instrumentação de baixo peso),[8] e mais recentemente em sistemas miniaturizados para análises químicas e bioquímicas, LOCs, como o que está em desenvolvimento no Sandia National Labs, [9] tem chamado grande atenção. A miniaturização de ensaios químicos reduz a quantidades de amostras e reagentes, permitindo que esta análise seja mais rápida e sem intervenção manual, e favorece a portabilidade do sistema.

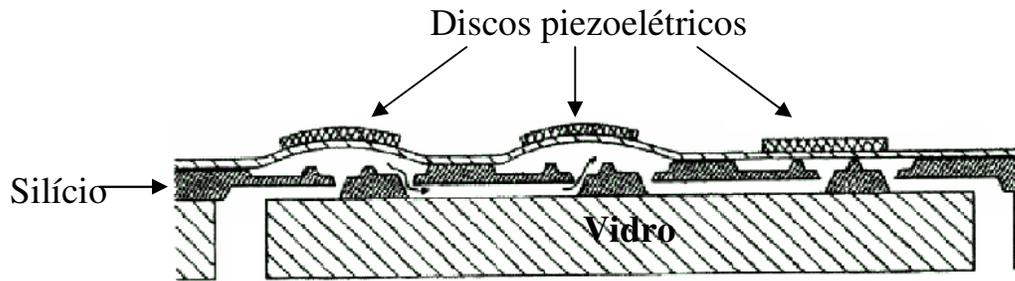


Figura 1 Microbomba peristáltica fabricada Jan Smits. Esta bomba possui três diafragmas com atuação piezoelétrica. Os materiais utilizados para a microfabricação foram o vidro e silício e três discos de material piezoelétrico [10].

As microbombas podem ser divididas em dois grupos: (1) microbombas de deslocamento e (2) microbombas dinâmicas (Figura 2).

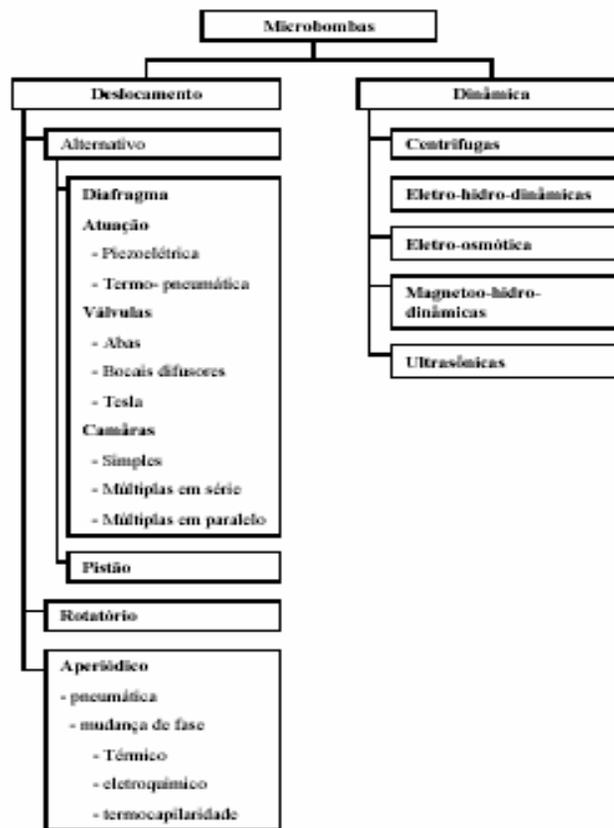


Figura 2 Diagrama de representa a classificação das microbombas, divididas em dois grupos: microbombas de deslocamento e dinâmicas [6].

As microbombas dinâmicas estão baseadas na transformação direta de energia mecânica e não-mecânica em um movimento contínuo do fluido. As microbombas dinâmicas possuem os seguintes princípios de atuação: centrífugas [11], eletro-hidro-dinâmicas (EHD) [12], eletro-osmótica (EO) [13], magneto-hidro-dinâmicas (MHD) [14] e ultrasônicas [15]. Uma propriedade comum a estas microbombas é a simplicidade de suas microestruturas, com a ausência de partes móveis. O desempenho destas microbombas é bastante influenciado pelas propriedades do fluido, limitando para um determinado princípio de atuação uma certa classe de fluidos. Na maioria das microbombas desta classe o transporte de gás não é possível. Para esta classe de bombas o fluxo bombeado varia de 5.4 nl/min [16] a 14ml/min [17], já pressão vai de 0 kPa [18] a 20000kPa [19] e o tamanho das microbombas varia de 10 mm³ [15] a 9500mm³ [20]. Os materiais utilizados para a construção são metal, plástico e vidro.[6,21]

As microbombas de deslocamento usam movimentos oscilatórios ou rotatórios de partes mecânicas para deslocar o fluido. Este grupo pode ser sub-dividido em: microbomba de deslocamento alternado, de deslocamento aperiódico e de deslocamento rotatório. As microbombas de deslocamento alternado representam a vasta maioria das bombas fabricadas em MEMS [6].

A maioria das microbombas de deslocamento alternativo usam uma superfície deformável fixa nas extremidades, dita diafragma ou membrana, utilizada para aumentar ou diminuir o volume de uma câmara através de sua deformação. Além do diafragma possui outros componentes como: câmara de bombeamento, mecanismos de atuação e válvulas. Seu ciclo de funcionamento tem dois estados: o estado de admissão (*supply phase*), onde o fluido entra na bomba devido a uma diferença de pressão negativa, e o estado de bombeamento, onde o fluido é deslocado devido a uma diferença de pressão positiva (Figura 3) [10].

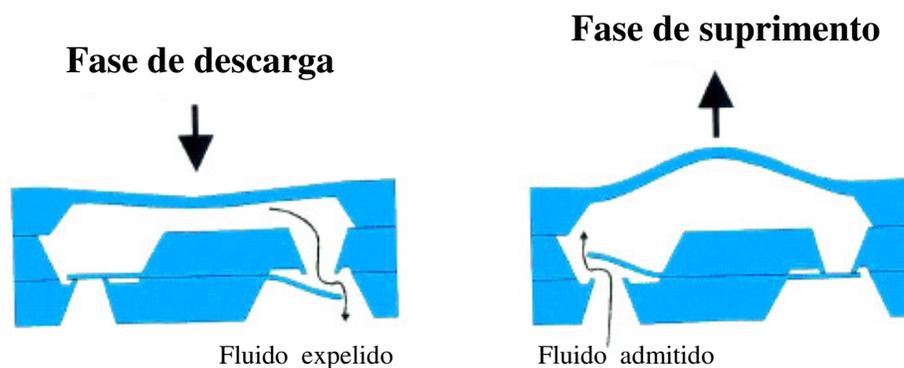


Figura 3 Ciclo de bombeamento as microbombas de deslocamento. Fase de descarga, $\Delta P = P_a - P_{câmara} > 0$, implica na saída de fluido na câmara, onde P_a é a pressão de atuação. Fase de suprimento, $\Delta P = P_a - P_{câmara} < 0$, implica na entrada de fluido na câmara [10].

Os componentes desta classe de microbombas possuem uma variedade de configurações. A maioria delas possuem uma câmara, mas outras possuem múltiplas câmaras em série ou paralelo. As válvulas podem variar de abas (viga [22], plataforma com diafragma anular [23], vigas duplas em oposição [24] e placa dentada[25]) a geometrias fixas (bocais difusores [26] e tesla [27]) ou até mesmo não possuir válvulas .

Os princípios de atuação podem variar de piezelétrico [28], eletrostático[29], termo-pneumático[30] e pneumático [31]. A representação do funcionamento destas atuações é mostrada na figura 4.

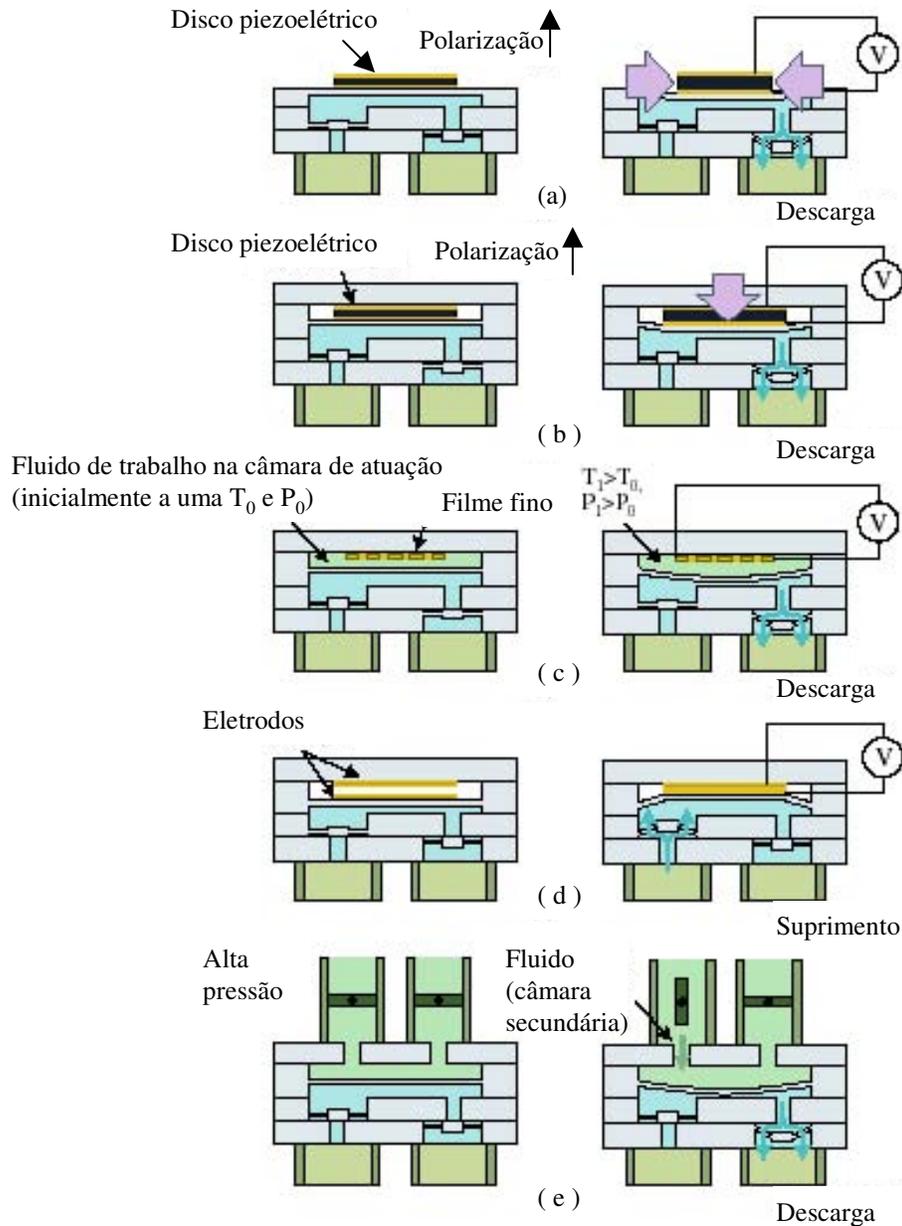


Figura 4-Representação de diferentes mecanismos de atuação. Em (a) temos a atuação piezoelétrica devido a aplicação de um campo elétrico resultando em uma deformação radial do disco colado sobre o topo da microbomba. A mesma atuação é vista em (b) porém o disco está colado em duas superfícies, sendo uma delas rígida (topo), assim a deflexão será axial. (c) representa o princípio termo-pneumático, em que o fluido da câmara de atuação é expandido devido ao aquecimento do filme fino, aquecedor, produzindo a deformação da membrana. Em (d) temos um atuador eletrostático, que é composto por eletrodos. Um eletrodo é colado sobre a membrana, outro na superfície rígida inferior do topo do dispositivo. Quando um campo elétrico atua sobre as placas o diafragma é defletido. (e) Por último temos a atuação pneumática externa em que pressurização e liberação do fluido da câmara de atuação deforma o diafragma [6].

Os materiais para a construção do diafragma podem ser vidro, silício, metal e elastômero. A construção da microbomba pode ser monolítica ou híbrida, variando de vidro-silício-vidro a multicamadas de elastômeros [6]. Quanto ao desempenho da microbomba, verificamos que o fluxo pode variar de 0,14 $\mu\text{l}/\text{min}$ [32] a 40 ml/min [33], já a diferença de pressão vai de 0,17kPa [34] a 200kPa [35]. O tamanho varia de 72 mm^3 [36] até 11800 mm^3 [37] e a espessura do diafragma vai de 0,003 mm [38] até 2,3 mm [34]. No grupo de microbombas de deslocamento alternativo, a microbomba peristáltica de elastômero atuada pneumaticamente vem ganhando grande popularidade devido à facilidade de fabricação e fácil integração com milhares de válvulas, canais e centenas de comparadores em um único substrato, representando uma revolução na microfluídica.

Como exemplo pode-se citar uma memória microfluídica análoga à memória RAM dos computadores (Figura 5) fabricada no Department of Applied Physics, California California Institute of Technology pelo grupo do Prof. Stephen R. Quake [39]. Por ser o tipo de microbomba mais versátil da atualidade. O próximo tópico será dedicado ao seu estado-da-arte.

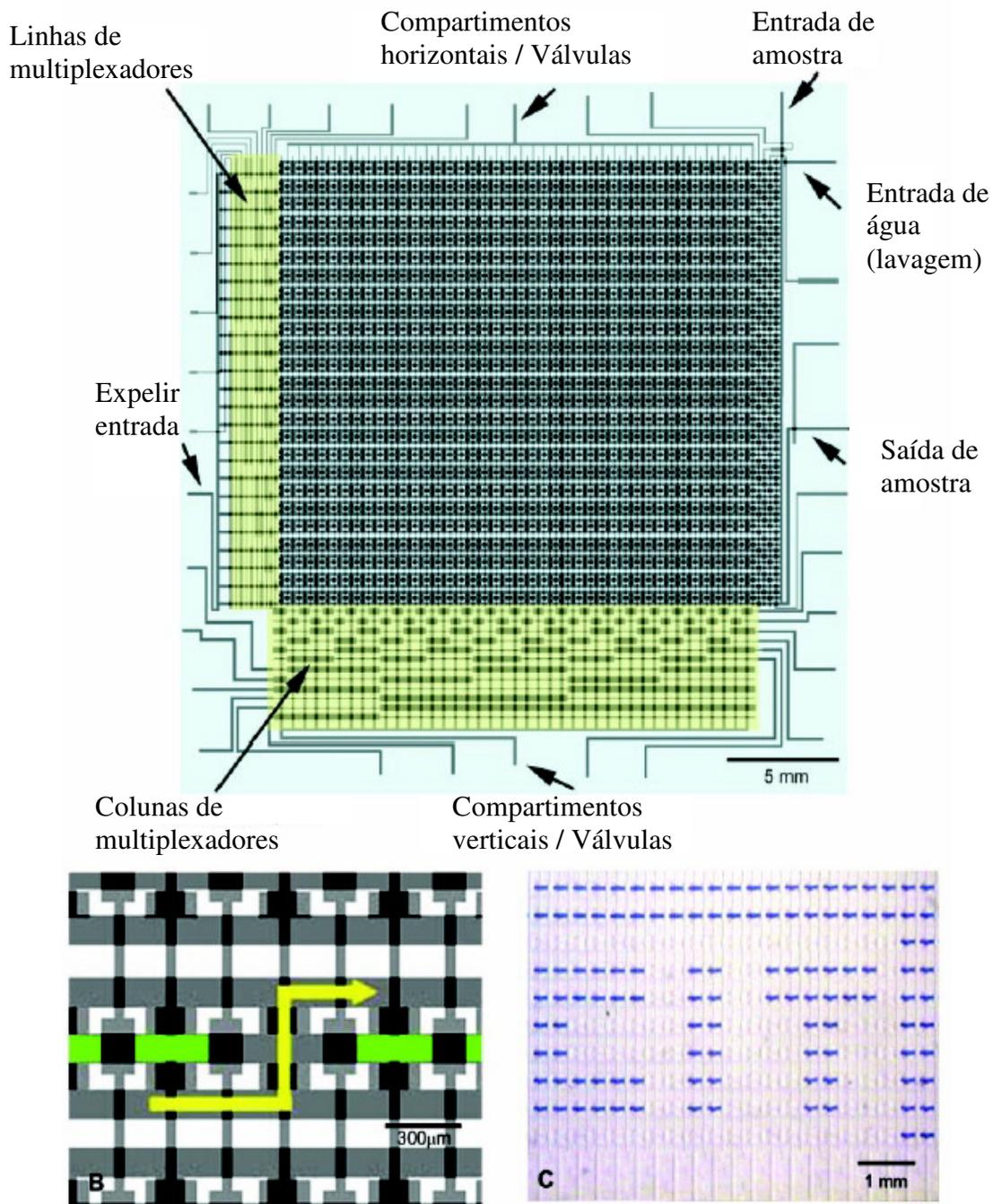


Figura 5- Dispositivo memória microfluídica com 1000 compartimentos independentes e 3574 micro-válvulas, organizadas como uma matriz endereçável com 25 x 40 câmaras. Cada câmara pode ser individualmente endereçada pelos multiplexadores de endereços de linha e coluna. O conteúdo de cada posição da memória pode ser seletivamente programado para ser ou a amostra (tinta azul - sample input) ou água (wash buffer input) [39].

1.2 Microbomba peristáltica de elastômero

Um sistema LOC totalmente integrado requer uso de microbombas para transportar o fluido, e as microbombas peristálticas são bastante convenientes para este propósito [40]. O movimento peristáltico ocorre quando uma pressão age sobre a parede de um tubo deformando-o, e conseqüentemente induzindo um fluxo. O fluido é transportado em volumes entre as regiões comprimidas resultando em um transporte contínuo. No entanto, a peristalse pode ser atuada por um número finito de atuadores, sendo o fluxo induzido por uma adequada seqüência de atuação. Este processo é referenciado como transporte peristáltico discreto, usado na maioria das microbombas peristálticas[41].

As microbombas desta classe não precisam ter válvulas de checagem, diodos microfluídicos ou quaisquer outros componentes utilizados para produzir fluxo em uma direção preferencial. Outra característica bastante interessante da microbomba peristáltica é a sua inerente planaridade. Isso permite sua fácil integração com válvulas e canais, conforme citado anteriormente, em um único processo de microfabricação, como demonstrado por Quake [32], que criou a primeira tecnologia capaz de produzir “chips” microfluídicos com integração em alta escala. Essa nova tecnologia oferece, pela primeira vez, a possibilidade de se microfabricar bombas e válvulas pequenas, baratas, e que não apresentam vazamentos. Os pontos-chave são o uso de elastômero como material estrutural e a tecnologia de microfabricação por litografia macia multi-camadas (‘‘multilayer soft lithography-MSL’’).

O elastômero tem como principal vantagem o baixo valor do módulo de Young, isso permite grandes deflexões com pequenas forças. O custo para a fabricação de dispositivos em elastômero, por exemplo em PDMS (polidimetilsiloxane), é extremamente baixo (0,05 US\$/cm³) se comparado ao silício (2,5 US\$/cm³), que é o material mais utilizado em MEMS [32].

Essa microbomba possui um canal de trabalho, canal por onde escoo o fluido bombeado, e três canais de atuação, em uma arquitetura de cruzamento de canais. E a pressurização é

defasada, geralmente em 120, 90, ou 60 graus, dos canais de atuação resultam em deflexões dos fundos dos canais, que funcionam como diafragmas, deslocando um certo volume (Figura 6) [32].

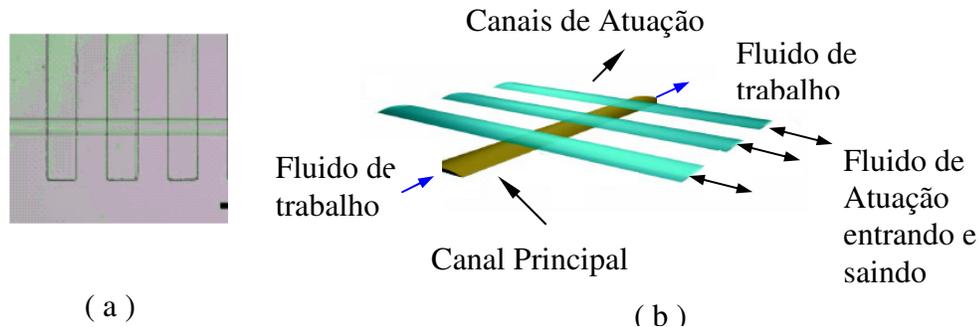


Figura 6-Arquitetura de cruzamentos de canais para a formação da microbomba peristáltica. (a) Gráfico óptico da microbomba. Nos quatro canais apresentados somente três é utilizado. (b) Desenho esquemático da microbomba. A pressurização defasada dos canais de atuação causa um fluxo [32].

Cada cruzamento de canal representa uma válvula, que pode ter dois tipos de geometria, “push-up” ou “push-down”. Na geometria “push-up” o canal de trabalho está sobre os canais de atuação, e a pressurização deste gera uma deflexão na membrana, na direção y , bloqueando a passagem do fluxo. Na geometria “push-down” o canal de trabalho está abaixo dos canais de atuação, tendo a membrana uma deformação, na direção $-y$, quando estes forem atuados. Um aspecto de extrema importância é o formato dos canais, que para essa microbomba são arredondados, permitindo uma vedação completa. Tais válvulas demonstraram um comportamento linear de abrir e fechar em relação à pressão [42].

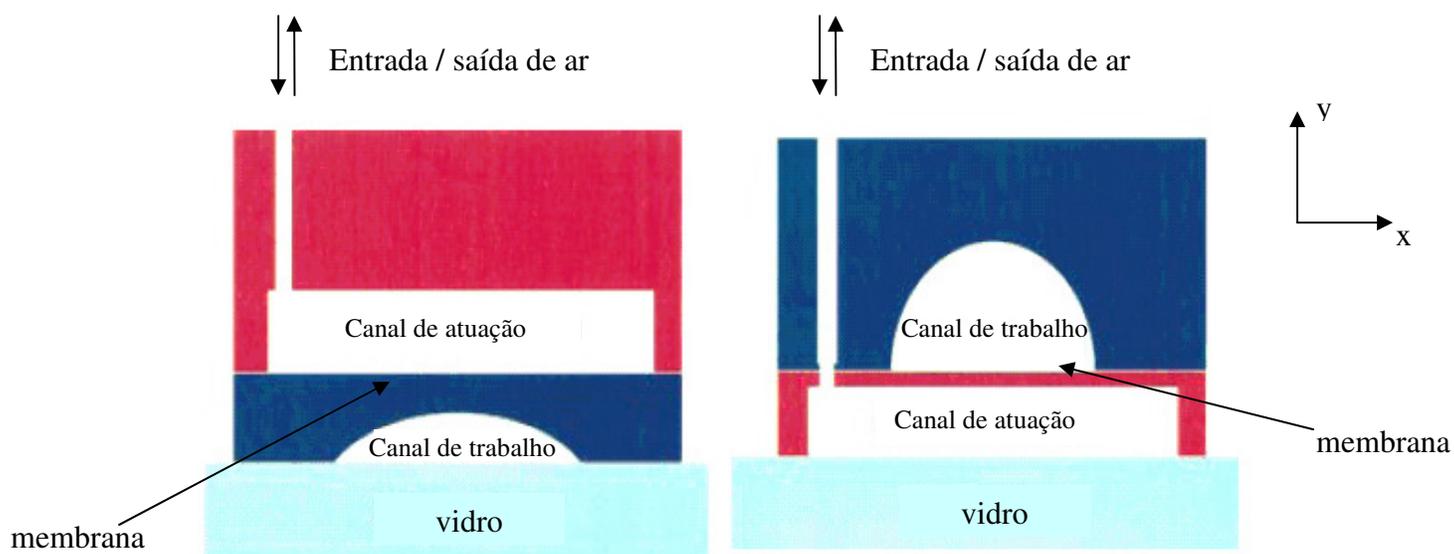


Figura 7- Geometria “push-down”, em que uma membrana de espessura não uniforme, topo do canal de trabalho, é defletida, na direção $-y$, devido a pressurização do canal de atuação, bloqueando a passagem do fluxo que está perpendicular a esta página. Geometria “push-up” das válvulas onde a deflexão da membrana de espessura uniforme na direção y do dispositivo bloqueando a passagem do fluxo. Considerando que fluxo está perpendicular página.

A primeira microbomba peristáltica de elastômero foi feita por Marc A Unger et al [32], do Department of Applied Physics, California Institute of Technology, USA. Uma outra microbomba desse mesmo tipo foi recentemente publicado por o Jacques Goulpeau et al [43], da Microfluidique, MEMS et Nanostructure, Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles (MMN-ESPCI). As principais características dessas microbombas estão expostas nas tabelas abaixo.

Tabela 1 - Características das microbombas peristálticas de elastômero.

	Atuação	Válvulas	Construção	Câmaras
<i>Unger</i>	Pneumática	Não há	MSL	3 (em Série)
Goulpeau	Pneumática	Não há	MSL	3 (em Série)

Tabela 2 - Características das microbombas peristálticas de elastômero.

	<i>Material do Diafragma</i>	<i>Espessura do diafragma (μm)</i>	<i>Fluido de Trabalho</i>
<i>Unger</i>	Elastômero	—	água
Goulpeau	<i>Elastômero</i>	30	<i>Mistura de Glicerol e água</i>

Tabela 3 - Características das microbombas peristálticas de elastômero.

	<i>f (Hz)</i>	<i>Δp (bar)</i>	<i>Φ_{max} $\mu l/min$</i>
Unger	75	<i>Não informado</i>	0,14
Goulpeau	82	0.25	7,5

Instruções sobre como projetar o desempenho dessas microbombas para aplicações em LOCs através da escolha de parâmetros básicos, como ciclo de frequência e pressões de atuação, e das características do desenho mecânico é atualmente escasso [43]. Tal necessidade demanda o

uso de modelos matemáticos capazes de simular o comportamento do dispositivo a determinadas condições. Com tais modelos, é possível realizar-se a simulação e projetos de microbombas.

O primeiro trabalho sobre de modelagem de microbomba foi publicado F. C. M. Van der Pol et al [44] da University of Twente, Department of Electrical Engineering 1989. Ele modelou uma microbomba com acionamento termo-pneumático utilizando a técnica dos Bond Graphs. As simulações foram realizadas em software, TUTSIM, desenvolvido pela mesma universidade.

Na modelagem analítica de microbombas os maiores destaques são R. Zengerle e M. Richter [45]. A partir destas publicações começaram surgir diversos outros trabalhos de modelagem de microbombas, e o conceito mais utilizado é o das analogias eletro-mecânicas, em que todos os componentes da microbomba são representados por um elemento de circuito elétrico [48]. Nesta linha modelagem destaca-se o trabalho de Tarik Bourouina et al [46] e M Carmona [47]. Por último podemos citar o primeiro modelo de microbomba peristáltica publicado por Goulpeau [43].

1.3 Objetivo da Pesquisa

Esta dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático para uma microbomba peristáltica de elastômero, composta por um canal de trabalho e três canais de atuação, atuados defasadamente, em uma arquitetura de canais cruzados, utilizando a técnica de analogias eletro-mecânicas.

1.4 Justificativa

Uma tecnologia própria de fabricação de dispositivos microfluídicos foi desenvolvida por Júlio Fernandes da equipe do orientador deste trabalho, Prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira, do Laboratório de Micromecatrônica do Departamento de Mecânica Computacional da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, em um trabalho de pós-doutorado apoiado pela FAPESP e

concluído recentemente [54]. Esta tecnologia abriu caminho para o projeto de microssistemas fluídicos nos quais as microbombas são componentes essenciais.

Portanto, é necessário dispor-se do modelo matemático das microbombas peristálticas de elastômero para que elas possam ser projetadas de acordo com as necessidades de vazão e pressão específicas de cada aplicação.

Capítulo 2

Modelagem de microbombas

Os Lab-on-chips estão tendo grandes impactos na indústria de instrumentação laboratorial. Tais sistemas estão cada vez mais sofisticados, e as pesquisas sobre seus componentes estão mais intensas, como no caso de microbombas, componente chave para este sistema. Desta maneira, centros de pesquisa e indústrias, desenvolvedores deste tipo de sistema, tornaram-se altamente competitivos não podendo perder tempo e recursos na construção e teste de sucessivos protótipos. Assim, técnicas de fabricação de prototipagem rápida, como a desenvolvida pelo grupo Whitesides [49], ajudaram de maneira significativa a cortar custos, aumentando o tempo para as demais etapas do processo [50].

Simulações computacionais e analíticas de chips servem para reduzir dramaticamente o tempo entre conceito e dispositivo. Simulações permitem que os pesquisadores determinem rapidamente como uma mudança, por exemplo, do desenho mecânico, afetará o desempenho do dispositivo, reduzindo o número de protótipos. Possivelmente a mais importante contribuição da prototipagem numérica está na fase conceitual, nos fornecendo estimativas do potencial do dispositivo, auxiliando ao pesquisador tomar o caminho mais proveitoso no início do trabalho [50].

Existe uma gama de fatores que complicam os modelo de fenômenos em micro-escala, distinguindo-os dos fenômenos em macro-escala. A primeira complicação, e a mais importante numericamente, é a ordem de escala do comprimento, que pode variar muito desde espessura de

camadas, nanômetros, a comprimento de canais e dimensões de substratos, centímetro. Segundo, diminuindo-se a escala aumenta-se a importância de fenômenos de superfícies e interfaciais. Como exemplo, temos tensão superficial e a rugosidade [50].

Método de modelagem analítico para a microbombas foi publicado por Zengerle e Richter [45], do Fraunhofer-Institut für Festkörpertechnologie, que basearam-se num grupo de equações resolvidas em software dedicado, sendo o modelo validado por medidas experimentais. Uma outra alternativa de modelagem seria o método dos elementos finitos, FEM, cujo conceito básico é a subdivisão de um modelo matemático em componentes de geometria simples denominados elementos finitos. A resposta de cada elemento é expressa em termos de um número finito de graus de liberdade caracterizado como um valor de uma função desconhecida, ou funções, em grupo de pontos nodais. A desvantagem de se usar o FEM é a dificuldade numérica associada à manipulação de elementos de forma extremamente irregulares. Por exemplo, elementos altamente curvos, ou ampla variação no tamanho dos elementos numa mesma malha. Nos LOCs as escalas de comprimento podem variar muito indo de nanômetros a centímetros [50]. O FEM só está sendo usado para modelar válvulas.

A terceira possibilidade seria os Bond Graphs, método matemático de modelagem baseado na relação entre potência e energia em elementos a parâmetros concentrados. Este método foi usado por Van der Pol et al [44] para modelar uma microbomba termopneumática.

Uma outra possibilidade seria utilizar-se a técnica de analogias eletro-mecânicas. Este método consiste em descrever os sistema por uma rede de impedâncias e posteriormente analisá-la em um simulador para dispositivos elétricos, ou representar as equações em digrama de blocos utilizando, por exemplo, o Simulink ou SciCos. Abordando-se o problema da modelagem de microbombas com a técnica de analogias eletro-mecânicas, temos a vantagem de baixo custo computacional e a explícita conceituação física através da analogia de um outro domínio físico para o domínio elétrico [46].

Através do circuito elétrico equivalente conseguimos uma melhor visualização do sistema, e uma vez que circuito esteja montado, pode-se usá-lo em análises subsequentes para investigar os efeitos da conexão de um subsistema ou de se fazer modificações na sua estrutura [51]. Essa técnica vem sendo usada com grande sucesso em microbombas [46, 48, 47, 43, 52].

2.1 Analogias Eletro-mecânicas

Se fizermos uma análise de um sistema, podemos realizar diversas simplificações que nos permitem expressá-lo por um circuito elétrico equivalente, representado por um número pequeno de elementos de circuito elétrico [53]. (O desenvolvimento da teoria de analogias eletro-mecânica baseou-se, em grande parte, nesta referência.)

Esta abordagem é possível pela existência de uma analogia entre sistemas mecânicos e elétricos. Desta maneira, o sistema não mais será expresso em termos de equações diferenciais parciais e suas condições de contorno, mas por elementos concentrados de um circuito elétrico. Estes elementos representam as propriedades físicas do sistema como massa, amortecimento, capacidade, rigidez [51].

Diferentemente dos sistemas reais que são contornados por superfície, os elementos de circuito elétrico são abstrações que possuem dois ou mais terminais, no qual uma diferença de potencial pode ser aplicada e uma corrente pode fluir de um terminal para outro.

Elementos concentrados podem trocar energia com outros elementos concentrados. Suponhamos dois elementos concentrados A e B. Tais elementos, como dito anteriormente, podem trocar energia. Essa troca de energia no tempo define uma grandeza física chamada de potência, P , representando a quantidade de energia transferida de um elemento para outro em um segundo.

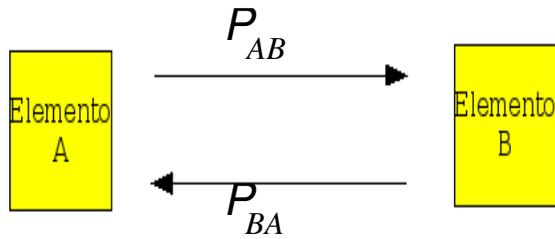


Figura 8- Elementos concentrados trocando energia. P_{AB} representa o fluxo de potência dos elementos A para B. P_{BA} é dito fluxo reverso de potência de B para A.

Posto P_{AB} que e P_{BA} devem ser maiores ou iguais a zero, podemos definir cada um deles como sendo o quadrado de um número de real, g_1^2 e g_2^2

$$P_{AB} = g_1^2 \quad \text{e} \quad P_{BA} = g_2^2 \quad (1)$$

A potência da rede, P_{net} , é definido como:

$$P_{net} = P_{AB} - P_{BA} = g_1^2 - g_2^2 \quad (2)$$

$$P_{net} = (g_1 - g_2)(g_1 + g_2) = e(t) \cdot f(t) \quad (3)$$

Desta maneira, a potência pode ser expressa pelo produto de dois números reais, que nos conduz ao conceito de variáveis de potência conjugadas. Estas representam um par de quantidades generalizadas, cujo produto deve ser igual à potência entre os dois elementos. No caso mais geral, $f(t)$ e $e(t)$ são definidas, respectivamente, como a variável de fluxo ou através, e variável de diferença ou esforço ou entre, em uma convenção dita $e \rightarrow V$ (variável esforço corresponde à tensão).

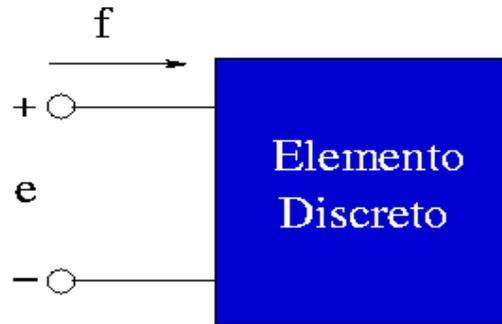


Figura 9: Elemento concentrado sob um esforço e com um fluxo f fluindo pelos seus terminais.

Associadas as variáveis esforço e fluxo, tem-se o deslocamento, $q(t)$, e momentum, $p(t)$, generalizado.

$$q(t) = \int_{t_0}^t f(t)dt + q(t_0) \quad e.q = \text{energia} \quad (4)$$

$$p(t) = \int_{t_0}^t e(t)dt + p(t_0) \quad f.p = \text{energia} \quad (5)$$

Os circuitos elétricos são modelados por malhas, e após essas generalizações, este conceito não está restrito ao domínio elétrico, e pode ser expandido para outros domínios físicos através das variáveis de potência conjugadas (Tabela 4).

Tabela 4 - mostra a correspondência entre o domínio elétrico e os demais domínios físicos através das variáveis generalizadas esforço, $e(t)$, fluxo, $f(t)$, momento, $p(t)$ e deslocamento, $q(t)$.

<i>Domínio</i>	<i>Esforço</i>	<i>Fluxo</i>	<i>Momentum</i>	<i>Deslocamento</i>
Mecânico translacional	Força	velocidade	momentum	posição
Mecânica rotacional	Torque	Velocidade angular	Momentum angular	Ângulo
Elétrico	Tensão	corrente		carga
Pneumático	Pressão	Fluxo volumétrico	Momentum de pressão	volume
Térmico	Temperatura	Fluxo de calor		Entropia
Magnético	Força Magnetomotriz	Derivada do fluxo		fluxo

As analogias são resultados de similaridades formais das equações integro-diferenciais que governam o comportamento de sistema de diferentes domínios físicos. Por exemplo, a segunda lei de Newton nos diz $F = \frac{dp}{dt}$, onde p é a quantidade de movimento e F a força, que para a mecânica clássica, pode ser escrita como, $F = m \frac{d^2x}{dt^2}$, onde m e x são respectivamente massa e deslocamento, que é análoga à equação constitutiva de um indutor elétrico $V = L \frac{di}{dt} = L \frac{d^2Q}{dt^2}$, onde V é a voltagem, i a corrente, L a indutância e Q a carga. Nesta analogia, F corresponde a V , m a L e x corresponde a Q [51].

As malhas irão consistir em elementos conectados uns aos outros. Elementos que compartilhem o mesmo fluxo, e conseqüentemente, o mesmo deslocamento deverão ser associados em série. Caso compartilhem um esforço comum deverão ser conectados em paralelo. As ligações entre os elementos devem ser consideradas como ideais (não havendo nenhuma perda da variável fluxo). As malhas deverão obedecer às leis conservação de Kirchhoff (Figura 10).

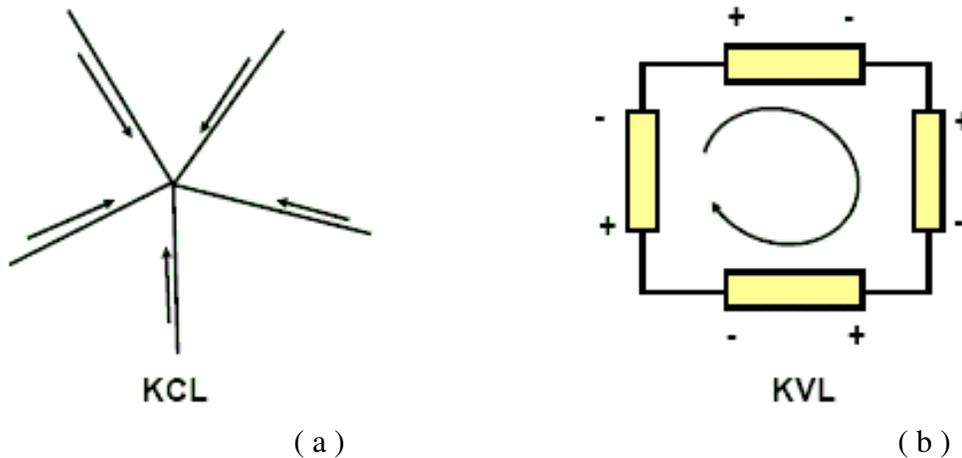


Figura 10 - (a) representa a lei de Kirchhoff para as correntes ou primeira lei de Kirchhoff, em que o somatório das correntes que chegam em um nó é igual zero. (b) representa a lei de Kirchhoff para as tensões ou segunda lei de Kirchhoff, em que o somatório das tensões em uma malha fechada é igual zero.

Os três elementos básicos de uma porta para esta técnica, são os resistores, os capacitores e os indutores generalizados. O resistor, caracterizado pela dissipação de energia, é definido em termos esforço e fluxo, onde esforço será uma função de f ou f uma função de e . Para um resistor linear temos $e = R.f$. O capacitor generalizado será definido pela relação entre esforço e deslocamento, $e = F(q)$. Sendo $F(q)$ uma função bem comportada passando pela origem. Em qualquer momento um capacitor possui esforço diferente de zero, conseqüentemente, o deslocamento será diferente de zero, concluindo-se, que o capacitor possui uma energia armazenada. O capacitor é associado à energia potencial. O indutor generalizado é definido por

$f = \Psi(p)$, sendo esta função bem comportada passando pela origem. Os indutores são armazenadores de energia cinética. Tais elementos estão representados como na figura 11..

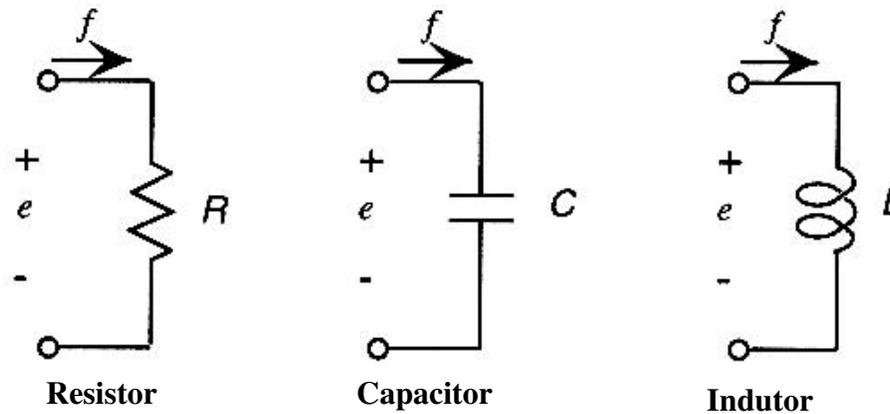


Figura 11 – Temos a representação do resistor, capacitor e indutor generalizado.

As fontes independentes serão as de fluxo, definidas como tendo um fluxo f igual a um $f_0(t)$ para qualquer esforço e , e as de esforço, igual a $e_0(t)$ para qualquer f .

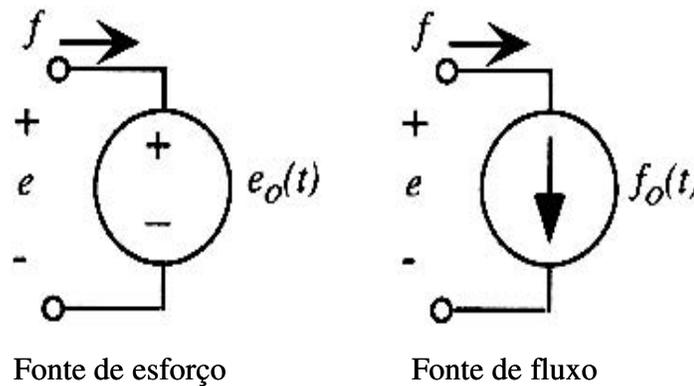


Figura 12 - Representação da fonte de esforço e fluxo generalizados.

Para ilustrar aplicação da técnica, daremos um exemplo de modelagem de um sistema massa, mola e amortecedor (Figura 13). A massa está conectada através da mola a um suporte fixo, e está sendo puxada por força F durante um determinado intervalo de tempo.

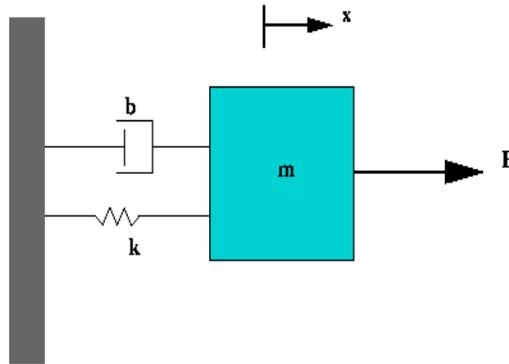


Figura 13 – Sistema massa –mola e amortecedor sob a atuação de uma Força.

A primeira etapa do processo consiste em estabelecer analogias entre partes do sistema, massa, mola e amortecedor, com os elementos concentrados de circuito. A força que puxa o bloco corresponde a uma fonte de esforço, que impõe uma força eletromotriz no circuito. A mola é definida como um elemento armazenador de energia potencial, sendo a análoga ao capacitor, que representa a elasticidade do respectivo sistema. O amortecedor está associado à perda de energia no sistema, sendo então relacionado ao resistor. A massa, que representa oposição às variações de velocidade, é relacionada á inertância, que se opõe às variações de corrente, ditos armazenadores de energia cinética. Percebe-se que velocidade corresponde à corrente e o deslocamento à carga (Tabela 4). Como os elementos, massa, mola, e amortecedor, dividem o mesmo deslocamento, podemos associar os elemento de circuito que os representam em série, obtendo o circuito elétrico equivalente que representa o comportamento do sistema físico proposto.

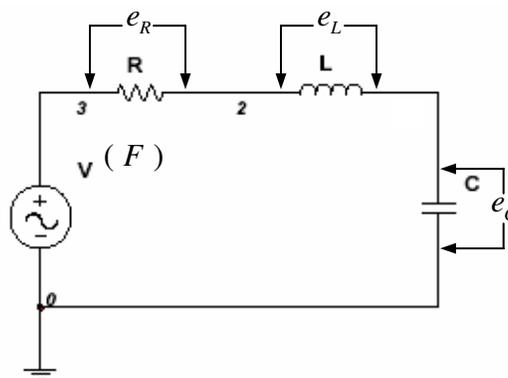


Figura 14 – Circuito elétrico equivalente para o sistema massa mola e amortecedores e analogias eletro-mecânicas.

A equação diferencial ordinária do sistema pode ser obtida utilizando-se as Leis de Kirchhoff, e as equações de transferência para cada elemento. Pelas leis Kirchhoff temos (convenção $e \rightarrow V$, onde e corresponde a voltagem):

$$F - e_R - e_L - e_C = 0 \quad (6)$$

As equações de transferências são mostradas na tabela abaixo:

Tabela 5 – Analogias entre os domínios elétrico e mecânico.

	Domínio Elétrico	Domínio Mecânico	
<i>Indutor</i>	$V = L \frac{di}{dt}$	$F = m \frac{d^2x}{dt^2}$	<i>Bloco de massa m</i>
<i>Resistor</i>	$V = R.i$	$F = b \frac{dx}{dt}$	<i>Amortecedor</i>
<i>Capacitor</i>	$V = \frac{Q}{C}$	$F = k.x$	<i>Mola</i>

Logo,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F \quad (7)$$

A equação do sistema pode ser resolvida utilizando-se, por exemplo, equações de estado, ou representá-las em um diagrama de blocos, por exemplo, no Scicos ou Simulink, ou ainda utilizar programas para análise de circuitos elétricos, como Pspice ou MultSim.

Utilizando o Multisim 2001 para resolver a equação com $m = 1\text{Kg}$, $k = 1\text{N/m}$, $b=0,5\text{Kg/s}$ e $F = 2\text{N}$, temos o comportamento da velocidade, podemos generalizar dizendo fluxo, mostrado na figura 15. Com isto podemos verificar a influência de cada componente variando o seu valor e determinar qual conjunto de parâmetros aproxima-se melhor do comportamento desejado no início do projeto.

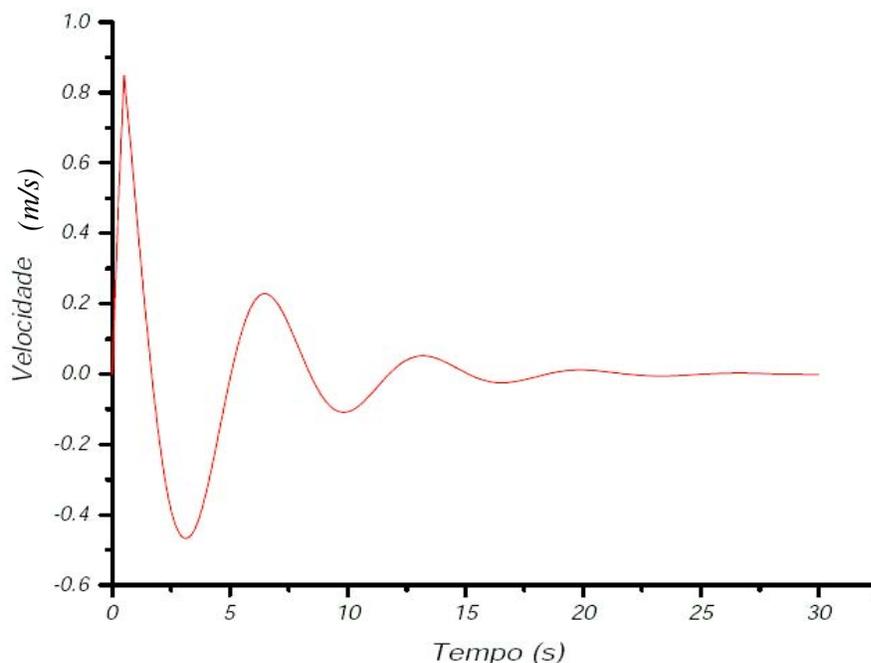


Figura 15 – O comportamento do sistema massa-mola mostra um amortecimento na velocidade, devido ao fator b , fazendo-a tender a zero em um instante próximo a 30s.

Este tipo de modelagem está sendo bastante utilizado em microbombas, pela facilidade da representação dos seus componentes por elementos de circuito elétrico. No momento em que a microbomba for representada por um circuito elétrico equivalente ganhamos acesso à moderna teoria de circuitos elétricos que nos fornece poderosas técnicas matemáticas e programas para a análise de circuitos, no qual podemos verificar rapidamente a influência da mudança de um parâmetro no desempenho da microbomba.

Capítulo 3

Modelagem de microbomba peristáltica de elastômero

Neste capítulo apresentaremos a modelagem de uma microbomba peristáltica de elastômero utilizando a técnica de analogias eletro-mecânicas. Dois modelos serão mostrados. O primeiro foi desenvolvido por Jacques Goulpeau [43], que fez a analogia para uma válvula e extrapolou o resultado para a bomba completa. O segundo, proposto neste trabalho, expande essa modelagem para a bomba completa, incluindo assim as interações entre as partes da bomba que não foram incluídas pelo modelo de Goulpeau.

3.1 Funcionamento e parâmetros primários da microbomba

Revisaremos brevemente o comportamento da microbomba peristáltica de elastômero já descrita na introdução. Esta microbomba é composta por três canais de atuação, ativados defasadamente, e um canal de trabalho, por onde escoia o fluido de trabalho, em uma arquitetura de canais cruzados. Cada cruzamento de canais representa uma válvula.

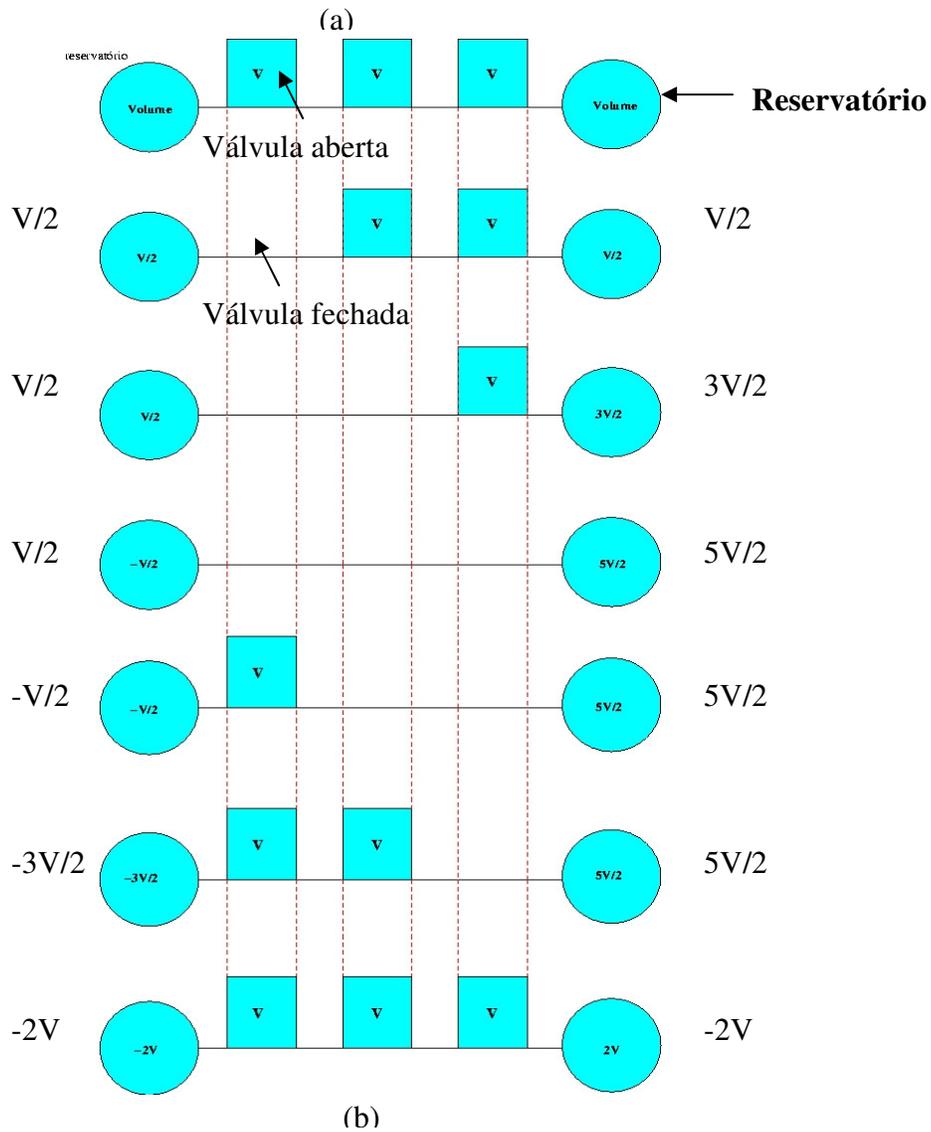
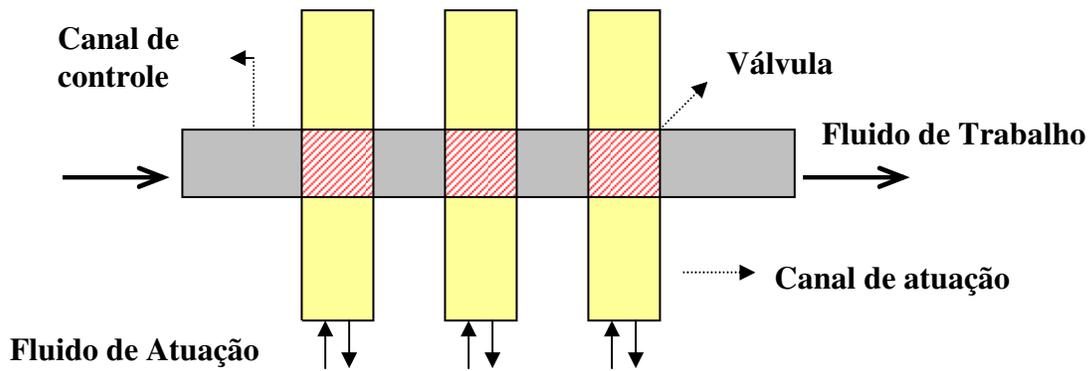


Figura 16 – Desenho esquemático da arquitetura de canais cruzados da microbomba peristáltica de elastômero (a). (b) representa o ciclo de bombeamento dessa microbomba. O quadrado azul mostra o volume em baixo de cada válvula quando ela está aberta. Quando a válvula fecha, todo o volume V é expelido para o lado direito e esquerdo. A válvula fechada bloqueia completamente o fluxo.

O funcionamento da microbomba é representado pelos estados de suprimento e descarga resultante da diferença de pressão aplicada sobre as válvulas. A geometria das válvulas é “push-down”. A atuação será aplicada de maneira de defasada em 60 graus, por um sinal de onda quadrada, resultando em um ciclo peristáltico discreto. O resultado do volume total expelido, pela análise da figura 16, para um ciclo de atuação, é aproximadamente duas vezes o volume em baixo de uma válvula.

A tabela 6 mostra os parâmetros primários para esta microbomba, através destes podemos determinar os parâmetros derivados, como volume e área.

Tabela 6 – Parâmetros primários da microbomba.

<i>Parâmetros</i>	<i>Siglas</i>
Comprimentos do canal de trabalho	L_w
Comprimento do canal de atuação	L_a
Largura do canal de trabalho	w_w
Largura do canal de atuação	w_a
Altura do canal de trabalho	h_w
Altura do canal de atuação	h_a
Espessura da membrana	H
Módulo de Young do elastômero	E
Coefficiente de Poisson do elastômero	ν
Distância entre as válvulas	d_v

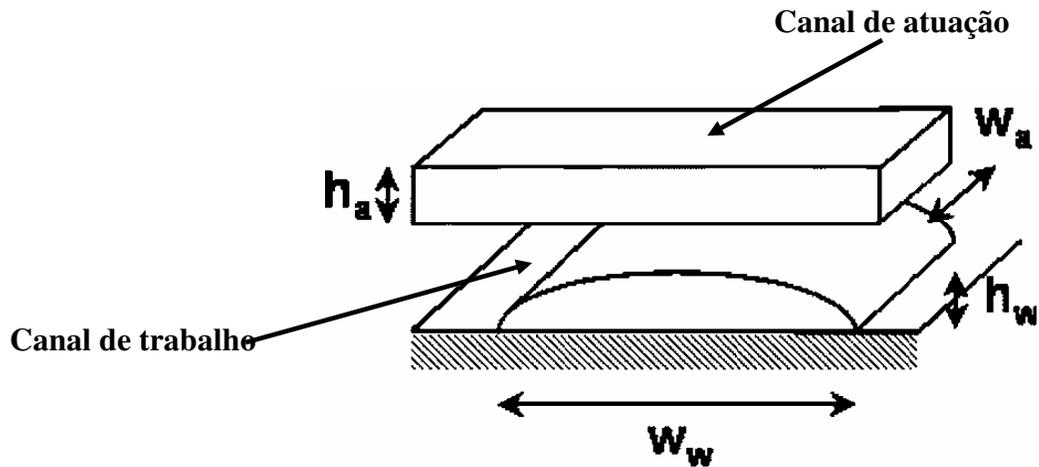


Figura 17 – Dimensões dos canais de trabalho dos canais de atuação correspondentes ao da tabela 6.

Com o funcionamento e os parâmetros primários completamente definidos, podemos começar a modelagem da microbomba, utilizando a técnica de analogias eletro-mecânicas.

3.1 Modelos

3.1.1 Canal de trabalho

Os domínios envolvidos nessa modelagem são o mecânico, o fluídico e o elétrico. Para que possamos representar a microbomba por um circuito elétrico equivalente devemos analisar todos os seus componentes, e verificar qual elemento concentrado de circuito elétrico que melhor representa suas propriedades físicas. A figura 18 representa os componentes que serão analisados.

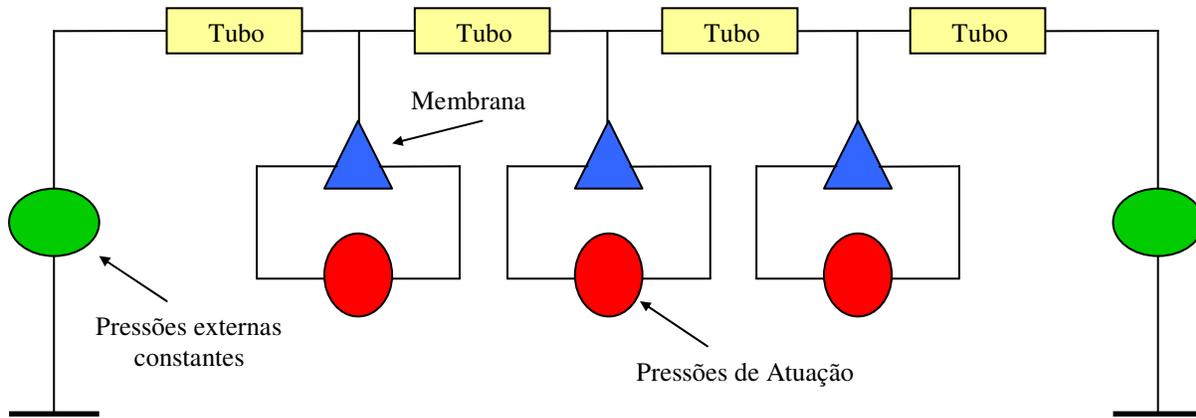


Figura 18 – A microbomba pode ser dividida em tubo e membranas sob a influência de pressões de atuação e atmosféricas. A fonte da cor verde representa a pressão atmosférica, que na maioria das vezes é considerada zero, e as fontes vermelhas representam o acionamento da microbomba.

Analisaremos primeiramente os canais de trabalho. O fluxo através de canais de sistemas microsistemas são em sua imensa maioria laminares, resultando em uma dependência linear entre fluxo e pressão [45]. O fluxo nesses canais depende então das propriedades do fluido de trabalho e das características do tubo, como por exemplo, comprimento (l), área de seção transversal (S). O escoamento nesta modelagem será tratado como laminar, e os efeitos de compressibilidade do fluido, um líquido, serão ignorados. Desta maneira, o amortecimento do movimento do fluido será dado somente pelas forças viscosas.

Os canais desta microbomba possuem um formato arredondado. Esta forma de canal será aproximada por uma parábola, com $S = \frac{2}{3} w_w h_w$. Assumiremos que a altura do canal de trabalho é muito menor que a sua largura. Com estas considerações a equação de Navier-Stokes possuirá uma forma simplificada que nos conduzirá ao fluxo de Hagen-Poiseuille [43].

$$\left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla P + \eta \nabla^2 \mathbf{v} \quad (8)$$

onde \mathbf{v} , é a velocidade, p é a pressão, η é a viscosidade ρ é a densidade do fluido.

A velocidade média do ao longo da largura é (estas equações foram demonstradas na referencia 43):

$$v(x) = \frac{-h^2(x)}{12\eta(\partial P / \partial y)} \quad (9)$$

Pela aproximação parabólica h tem a seguinte forma:

$$h(x) = h_w [1 - (2x / w)^2] \quad (10)$$

Com isso podemos calcular o fluxo produzido por um gradiente de pressão por [43]

$$\Phi = \frac{4h_w^3 w}{105\eta L_w} \Delta P = \frac{1}{R} \Delta P \quad (11)$$

O termo R da equação representa a dissipação de energia do escoamento. Podemos então fazer nossa primeira correspondência com o domínio elétrico, em que R será representado como resistor, que está associado à dissipação de energia em circuito elétrico [43].

$$R = \frac{105\eta L_w}{4h_w^3 w} \quad (12)$$

A movimentação do fluido dentro canais ocorre devido a uma diferença de pressão aplicada sobre a membrana. Desta maneira, pode-se levar em consideração a inércia do fluido no canal de trabalho. Que é definida pela equação (13) [46].

$$L = \rho \frac{l}{S} \quad (13)$$

E o termo L é equivalente a inertância de um circuito elétrico.

Podemos então representar os tubos de uma microbomba pela associação em série de resistor e um indutor, considerando que somente a membrana sofrerá deformação. No entanto, para este trabalho, desconsideramos o efeito da inertância sobre o circuito que representará a microbomba.



Figura 19- Representação do tubo de uma microbomba em elementos concentrados de circuitos elétricos. Onde L_1 é a indutância fluídica e R_1 a resistência fluídica.

3.1.2 Componente elástico: membrana

A membrana possuirá um comportamento elástico sob um carregamento, representado pela equação (14) [46]

$$P = \frac{kx}{S} \quad (14)$$

onde K é a constante elástica da mola.

Como estamos considerando o escoamento incompressível do fluido a variação do volume esta somente relacionada com a pressão. Estas implicações nos levaram a modelar a membrana como um pistão conectado a uma mola sob a influência de pressão.

A mola está relacionada ao armazenamento de energia potencial, assim como um capacitor em circuito elétrico. Assim, podemos expressar o comportamento elástico da membrana por um capacitor [43,46].

3.1.3 Tubo e membrana

A região de cruzamento entre os canais de atuação e o canal de trabalho é definida como membrana. Caso o canal de atuação seja pressurizado, a membrana sofrerá uma deflexão, mudando a área de secção transversal do canal de trabalho. Esta deformação reduz o escoamento do fluido por esse canal. Com isso precisamos descrever este comportamento de variação da área de secção transversal por um elemento de circuito elétrico.

Esta redução de escoamento de um fluido pelo canal ocorre quando a membrana está defletida. Isto pode ser relacionada à dificuldade que uma corrente elétrica tem ao fluir em um resistor. Como a deflexão da membrana varia do estágio de repouso, a área de secção transversal e a mesma para todo o canal de trabalho, a um estágio de deflexão completa, onde a deflexão do

ponto central da membrana é igual à altura do canal de trabalho, podemos relacionar este comportamento ao de um resistor com resistência variável, que impõe um conjunto de valores de resistência para cada estado de um circuito elétrico. Desta maneira o comportamento da membrana fica completamente representado por um capacitor associado a duas resistências variáveis que modificam seus valores com a mudança da pressão sobre a membrana.

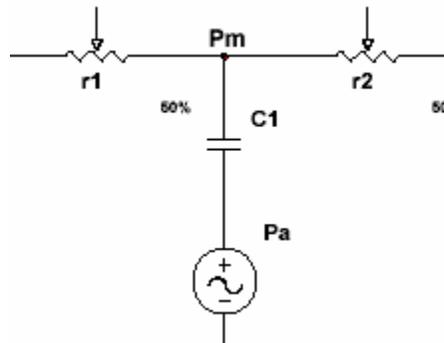


Figura 20 – Circuito elétrico equivalente para uma válvula em que r_1 e r_2 são as resistências variáveis que representam o estrangulamento do tubo, C_1 é a capacitância que representa o comportamento elástico da membrana, P_m é a pressão média no tubo e P_a é a pressão de atuação.

Conseguimos então encontrar um elemento de circuito elétrico que represente cada parte da microbomba, valendo-nos de algumas simplificações. Reunindo esses dispositivos elétricos podemos então representar o desenho mecânico da microbomba no circuito elétrico equivalente da figura 21.

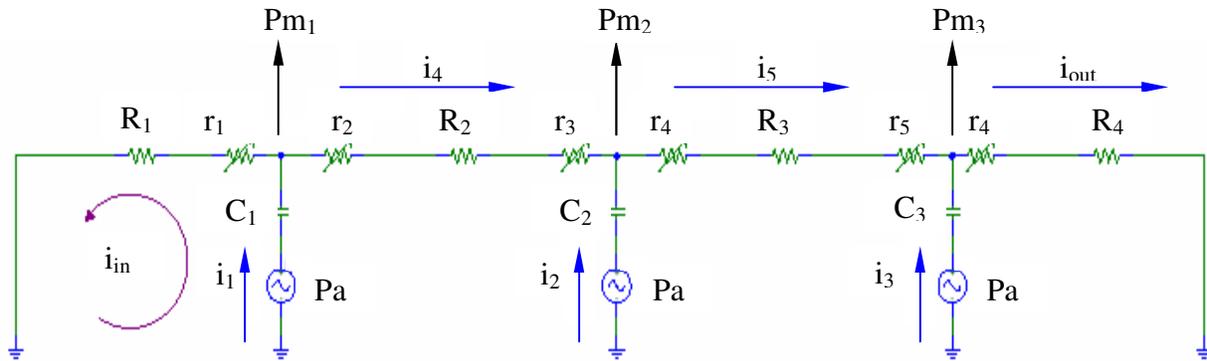


Figura 21 – Circuito completo da microbomba.

O circuito da figura 21 representa o modelo de microbomba proposto neste trabalho. O primeiro modelo foi proposto por Jacques Goulpeau et al [43], sendo o único modelo de microbomba peristáltica, com as mesmas características descritas anteriormente, que temos conhecimento. O segundo, figura 21, trata-se de uma expansão realizada do modelo do anterior para toda a microbomba.

Este modelo, figura 21, mostrar-se-á mais adequado que o modelo proposto por Jacques Goulpeau et al [43], por representar a interação de todas as partes da microbomba, prevendo melhor seu real comportamento .

3.2 Modelo I: Modelo de Válvula

Jacques Goulpeau et al [43] realizaram a modelagem de uma microbomba peristáltica de elastômero, com as mesmas características que a deste trabalho, através da técnica de analogias eletro-mecânicas. Tal modelo foi verificado empiricamente tendo razoável acordo com as medidas experimentais. As características desta microbomba estão resumidas na tabela abaixo.

Tabela 7 – Parâmetros da microbomba.

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores</i>
L_w	20 mm
L_a	8,15mm
w_w	431 μm
w_a	437 μm
h_w	44,5 μm
h_a	33,7 μm
H	30 μm
E	750 kPa
v	0.5
d_v	1 mm
V_v	5,6 μm^3

Obs: V_v é o volume em baixo de uma válvula.

Ele assumiu que o comportamento de todo o dispositivo poderia ser previsto pela simulação de uma válvula do sistema, e depois extrapolado para toda a bomba. Esta hipótese foi fundamentada pela análise do ciclo de bombeamento, que para cada ciclo expela duas vezes o volume em baixo de uma válvula. Assim poder-se-ia modelar uma válvula e multiplicar o volume expelido por dois. Nesse modelo foi negligenciado a inércia do fluido, tendo então o circuito elétrico mostrado na figura 22.

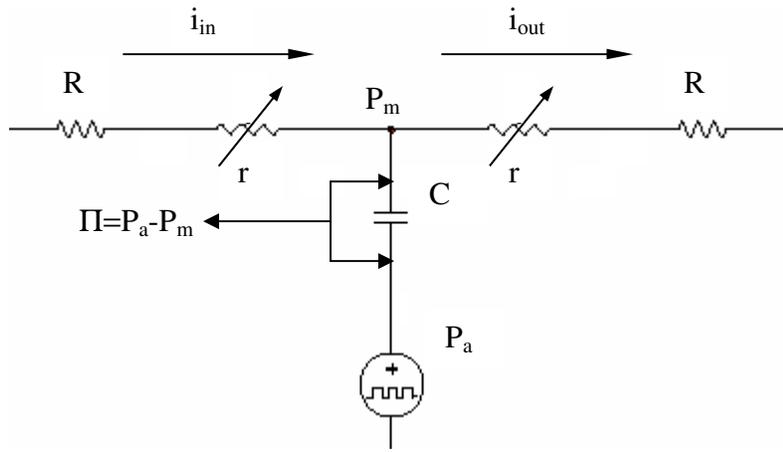


Figura 22 – Modelo de válvula criado por Jacques Goulpeau et al [43], e extrapolado para toda microbomba.

Aplicando-se a leis de Kirchhoff para as correntes obtemos,

$$i = i_{in} + i_{out} \quad (15)$$

Calculando as quedas de tensão para cada tubo,

Para o tubo 1 temos,

$$P_m - Ri_{in} - ri_{in} = 0$$

$$i_{in} = \frac{P_m}{R+r} \quad (16)$$

e para o tubo 2 ,

$$P_m - Ri_{out} - ri_{out} = 0$$

$$i_{out} = \frac{P_m}{R+r} \quad (17)$$

e a pressão diferencial, Π , na membrana é

$$i = C \frac{d\Pi}{dt} \quad (18), \quad \Pi = P_a - P_m$$

Substituindo em (16), (17) e (18) em (15), temos a equação que representa o comportamento da válvula.

$$(R+r)C \frac{d\Pi}{dt} - 2\Pi = 2P_a(t) \quad (19)$$

Este artigo [43] limitou-se a informar alguns resultados da modelagem, fornecendo poucas informações de como o modelo foi implementado em um simulador de circuito elétrico ou de blocos ou qualquer outro, já que estes referenciavam que o modelo foi resolvido numericamente. Desta maneira, reproduzimos o modelo publicado em um software de circuito elétrico, MultiSim 2001, sob uma condição de funcionamento (tabela 8), verificando que este corresponde, para a condição imposta, ao modelo proposto pelo artigo. O circuito elétrico equivalente para a válvula está mostrado na figura 22.

Tabela 8 – Condições fixas de funcionamento da microbomba

<i>Condições de Funcionamento</i>	<i>Valores</i>
Periodo (T)	120 ms
Frenquência em cada válvula	8.33 Hz
Pressão de atuação (P_a)	25 kPa
V_v	5.6 μm^3

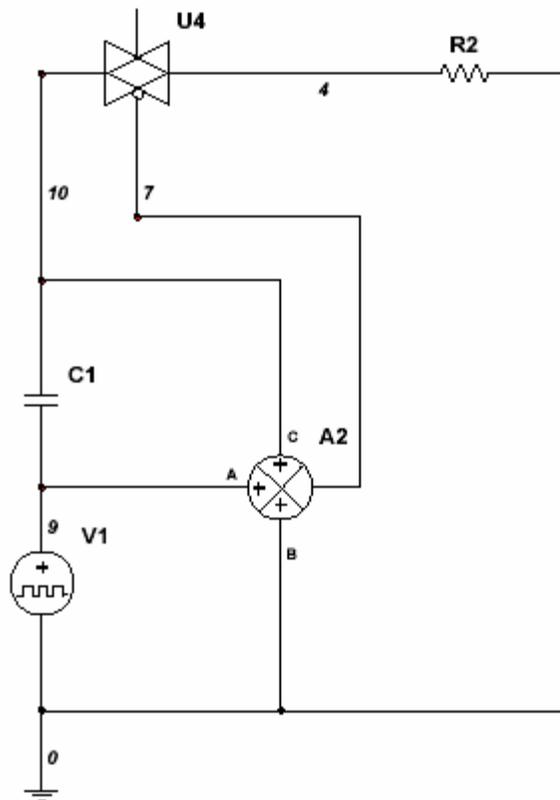


Figura 23 – Circuito elétrico equivalente implementado no MultiSim 2001.

A microbomba é atuada por uma onda quadrada que varia de 0 a P_{op} , representada por V1, é a mínima pressão necessária para fechar a válvula. A deflexão da membrana dependerá da diferença pressão no capacitor, que pode variar do estágio de repouso ao estágio de máxima deflexão. Esta diferença de pressão é representada pelo somador de tensões A2 da figura 23 que aciona a chave analógica U4, que representa a variação da área de secção transversal do tubo, ou variação da resistência hidráulica naquela região. A chave analógica é um resistor que varia logaritmicamente entre os valores especificados na tensão controle de entrada. Se o sinal de controle excede o valor de tensão para desligamento da chave ou acionamento da chave, a resistência pode tornar-se excessivamente grande ou pequena. Neste caso a chave é controlada pela diferença de pressão no capacitor. O comportamento desta chave é bastante similar a não linearidade proposta pela eq (20) [43], proposta no artigo, conforme mostrado na figura 24.

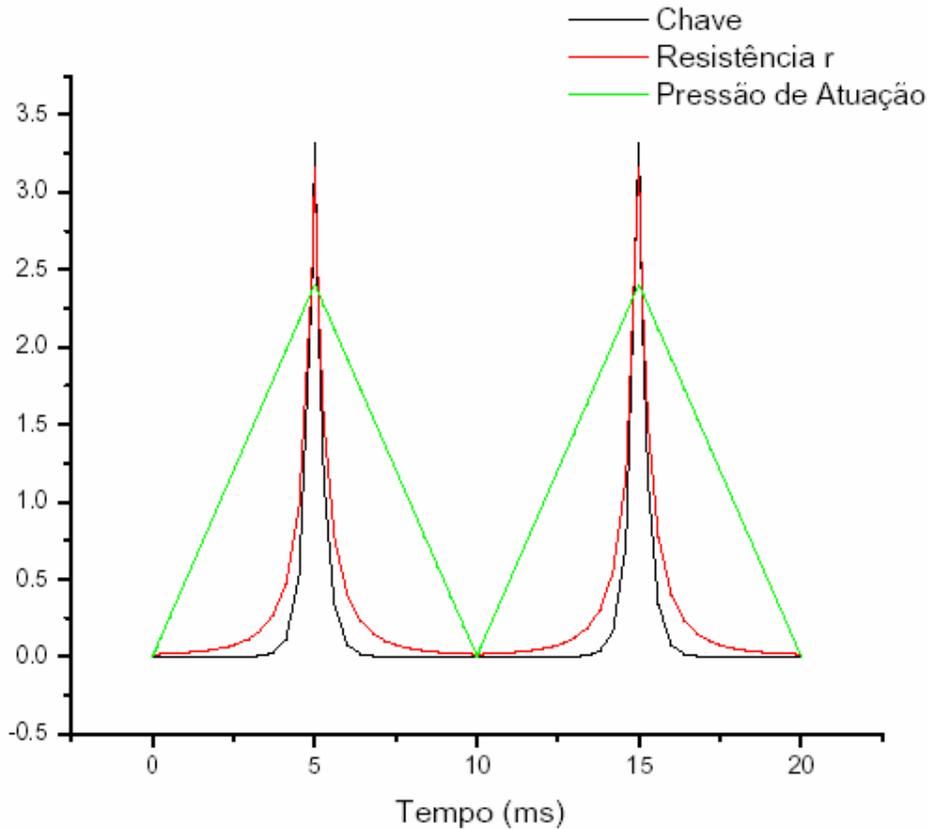


Figura 24- A forma de onda da resistência oferecida pela chave analógica é bem próxima a resistência variável da equação 20.

Outro fator de extrema importância observado por Jacques Goulpeau et al [43] é a razão entre r_0 e R que precisa ser de aproximadamente 0,01, pois com este valor torna a solução insensível à não linearidade escolhida para descrever a resistência variável r .

$$r = \frac{r_0}{2 \left[1 - (P_a - P_m) / P_c \right]^3} \quad (20)$$

Para efetuarmos a modelagem em software de circuitos elétricos precisamos escalar os valores de resistência hidráulica, pressão de atuação e capacitância para valores razoáveis de elementos de circuito elétricos comuns. Para isso definimos um fator de escala λ para cada

elementos de circuito elétrico. Os valores obtidos usando-se os parâmetros da microbomba e os valores escalonados estão resumidos na tabela abaixo.

Tabela 9 – Valores escalonado para os elementos R, C, fontes e cargas.

<i>Elementos</i>	<i>Valor</i>	<i>Valor escalonado</i>
R	6.69 TΩ	1.5KΩ
C	224 aF	1μF
Fontes	25 KPa	2.5V
Q*	5.6 pm ³	2,5μC

* A carga é a integral da corrente elétrica sobre um resistor representando o volume expelido por um ciclo de bombeamento.

A pressão utilizada para a modelagem foi retirada dos experimentos realizados por Jacques Goulpeau et al [43] para esta microbomba, que verificou a existência de um valor ótimo pressão, P_{op} , para atuar a microbomba, maximizando o fluxo. Caso um valor muito maior que este fosse utilizado, as válvulas ficariam muito mais tempo fechadas, diminuindo o fluxo, e se valores muito abaixo fossem utilizados, o volume em baixo de cada uma delas não seria expelidos totalmente resultando também, em um valor baixo para o fluxo. Desta maneira, P_{op} é mínimo valor de pressão necessária para fechar completamente uma válvula. Para este caso $P_{op}=25Kpa$ que corresponderá a 2,5V.

Utilizando a relação entre P_{op} e V_v para determinar C.

$$P_{op} C = V_v \rightarrow C = 2,24aF \quad (21)$$

Para realizar o cálculo de R utilizamos a eq.(12), Assim podemos determinar a constante de tempo do circuito,

$$RC = 1,5ms \quad (22)$$

Podemos então escolher um valor conveniente para C e determinar os valores de R e Q escalonados. Se $C=1\mu\text{F}$ e $V=2.5\text{V}$ então,

$$\begin{aligned} VC &= Q \\ Q &= 2,5\mu\text{C} \end{aligned} \quad (23)$$

Calculando R pela constante de tempo RC, temos,

$$\begin{aligned} RC &= 1,5\text{ms} \\ R &= 1,5\text{k}\Omega \end{aligned} \quad (24)$$

E fator α de conversão de V_v para Q é de $44,6\text{MC}/\text{m}^3$.

$$\begin{aligned} \alpha V_v &= Q \\ \alpha &= 44,6\text{MC}/\text{m}^3 \end{aligned} \quad (25)$$

As modelagens realizadas neste trabalho usaram esses valores escalonados de R, C, Q e P. O próximo modelo será a expansão do modelo de válvula proposta por Goulpeau ao modelo que represente toda a microbomba.

3.3 Modelo II: Modelo completo da microbomba

O modelo para toda a microbomba pode ser representada pela interconexão de três válvulas do modelo 1, resultando no circuito abaixo:.

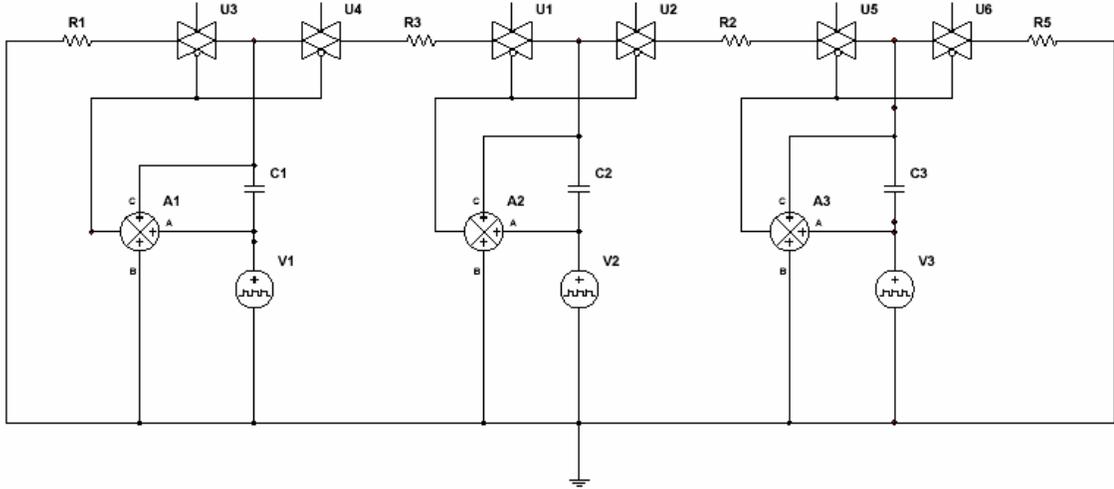


Figura 25 – Circuito elétrico equivalente para toda a microbomba.

Este modelo representa, além do comportamento da membrana e dos canais do modelo de Golpeau et al [43], as interações entre as válvulas não representadas no modelo 1.

Aplicando as Leis de Kirchhoff obtemos as equações que representam o comportamento da microbomba, considerando a chave analógica como um resistor variável, ver figura (21).

Para a válvulas 1:

$$i_1 = i_{in} + i_4 \quad (26)$$

$$i_{in} = \frac{P_{m_1}}{R_1 + r_1} \quad e \quad i_4 = \frac{P_{m_1} - P_{m_2}}{R_2 + r_2 + r_3} \quad (27)$$

$$i_1 = C_1 \frac{d\Pi_1}{dt} \quad (4), \quad \Pi_1 = P_{a_1} - P_{m_1} \quad (28)$$

$$C_1 \frac{d\Pi_1}{dt} = \frac{P_{m_1}}{R_1 + r_1} + \frac{P_{m_1} - P_{m_2}}{R_2 + r_2 + r_3}, P_{m_1} = P_{a_1} - \Pi_1 \quad (29)$$

resultando em,

$$\begin{aligned} (R_1 + r_1)(R_2 + r_2 + r_3)C_1 \frac{d\Pi_1}{dt} + (R_1 + R_2 + r_1 + r_2 + r_3)\Pi_1 = \\ = (R_1 + R_2 + r_1 + r_2 + r_3)P_{a_1} + (R_1 + r_1)P_{m_2} \end{aligned} \quad (30)$$

Efetuada os mesmos cálculos para a válvula 1 e 2 temos,

Válvula 2,

$$\Pi_2 = P_{a_2} - P_{m_2}$$

$$\begin{aligned} (R_2 + r_2 + r_3)(R_3 + r_4 + r_5)C_2 \frac{d\Pi_2}{dt} + (R_2 + R_3 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5)\Pi_2 = \\ = (R_2 + R_3 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5)(P_{a_2} - P_{m_1} - P_{m_3}) \end{aligned} \quad (31)$$

Para a válvula 3,

$$\Pi_3 = P_{a_3} - P_{m_3}$$

$$\begin{aligned} (R_4 + r_6)(R_3 + r_4 + r_5)C_3 \frac{d\Pi_3}{dt} + (R_3 + R_4 + r_4 + r_5 + r_6)\Pi_3 = \\ = (R_3 + R_4 + r_4 + r_5 + r_6)P_{a_3} + (R_4 + r_6)P_{m_2} \end{aligned} \quad (32)$$

Os resistores representam os canais da bomba e conjunto chaves analógicas, somadores e capacitores representam a membrana. E a fontes de tensão representam as pressões de atuação. Neste modelo precisou-se colocar duas chaves por membrana, porque temos fluxo em todas as malhas. As chaves são controladas pela diferença de pressão nos capacitores.

Os modelos aqui apresentados foram simulados usando-se um software para análise circuitos elétricos, MultSim 2001. As seguintes análises transientes foram realizadas:

- i) Verificamos o comportamento da diferença de pressão do capacitor em relação à pressão de atuação
- ii) O efeito de contrapressão no modelo 1.
- iii) O comportamento pressão nos capacitores em relação ao ciclo de bombeamento.
- iv) A variação das pressões nos tubos, ou variação das pressões médias.
- v) E o comportamento de todos os fluxos, ou fluxo no caso do modelo 1.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados dessas análises.

Capitulo 4

Resultados

As análises transientes dos modelos propostos no capítulo anterior serão executadas no MultSim 2001, sob as seguintes condições:

Tabela 10 - Condições impostas a todas as simulações .

<i>Condições</i>	<i>Valores</i>
Período	120 ms
Frequência de cada válvula	8.33 Hz
Pressão de Atuação	25 KPa
Resistência (R)	1,5K Ω
Capacitância (C)	1 μ F
Fontes de tensão (P _a)	0 a 2,5V

Todos os modelos sofrem a mesma pressão de atuação, que está representada pela figura 26. Podemos verificar que as atuações são ondas quadradas que variam de 0 a 2,5V, ou de 0 a 25KPa, defasadas em 60 graus.

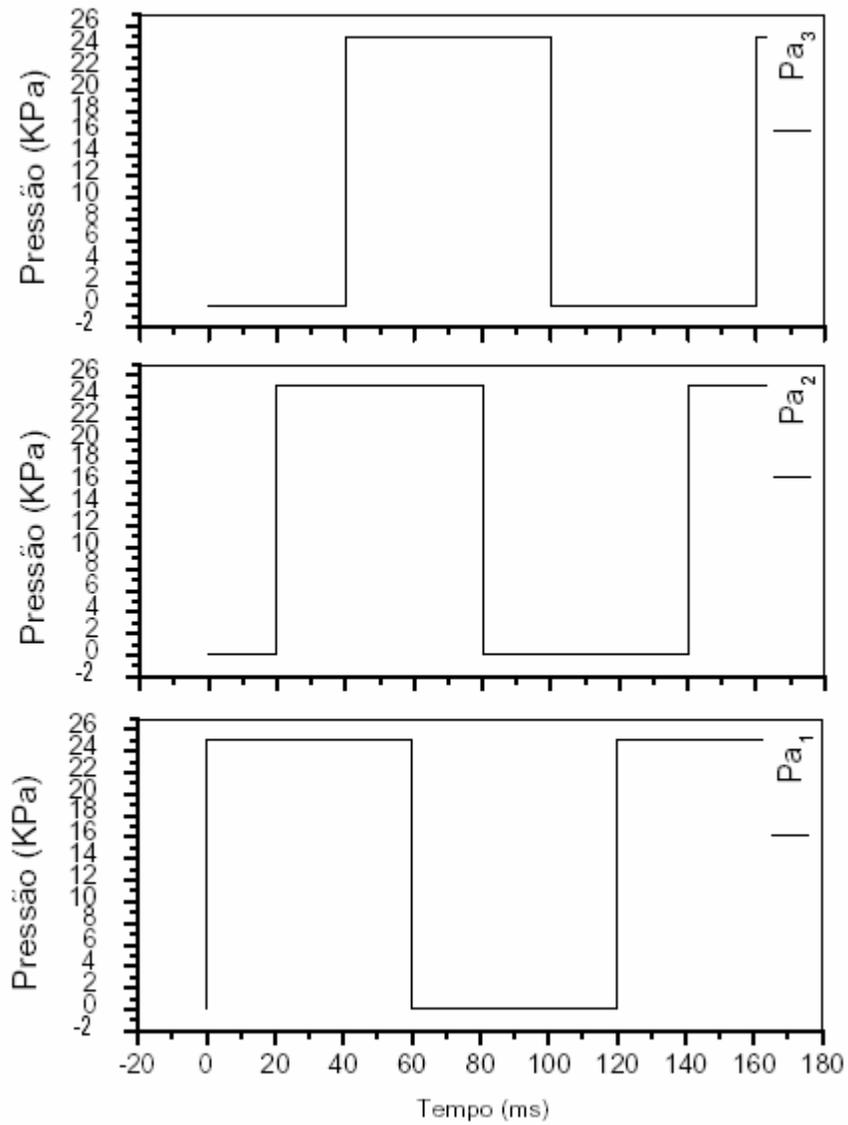


Figura 26- As ondas quadradas destes gráficos representam as pressões de atuação P_{a1} , P_{a2} , e P_{a3} sobre as membranas, capacitores C_1 , C_2 e C_3 , defasadas de 60 graus.

4.1 Variação dos parâmetros da chave analógica do modelo I

As chaves analógicas utilizadas nos modelos deste trabalho representam o estrangulamento do canal de trabalho devido à deflexão da membrana. Ela é definida como um resistor que varia sua resistência logaritmicamente com a tensão controle, podendo ter um valor muito grande, que significaria que a membrana estaria defletindo-se no sentido do fundo do canal de trabalho impedindo a passagem do fluxo, caso o valor da tensão de controle ultrapasse a tensão de desligamento da chave (COFF) ou um valor muito pequeno, que significaria o valor da resistência da válvula aberta a passagem de fluxo, caso o valor da tensão de controle esteja abaixo da tensão de acionamento. (CON) (Figura-27).

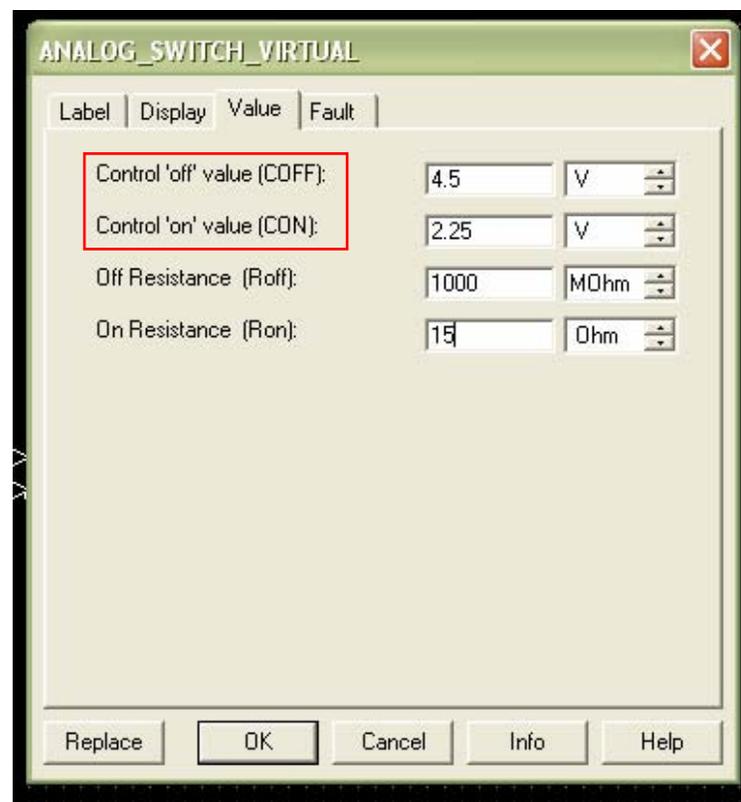


Figura 27-Janela de controle de parâmetros da chave analógica. Quando o sinal controle impõe uma tensão muito próxima dos valores COFF ou CON os valores das resistências se aproximam de um valor muito grande ou muito pequeno de resistência.

Assim variando os limites de tensão CON e COFF, obtemos os seguintes resultados:

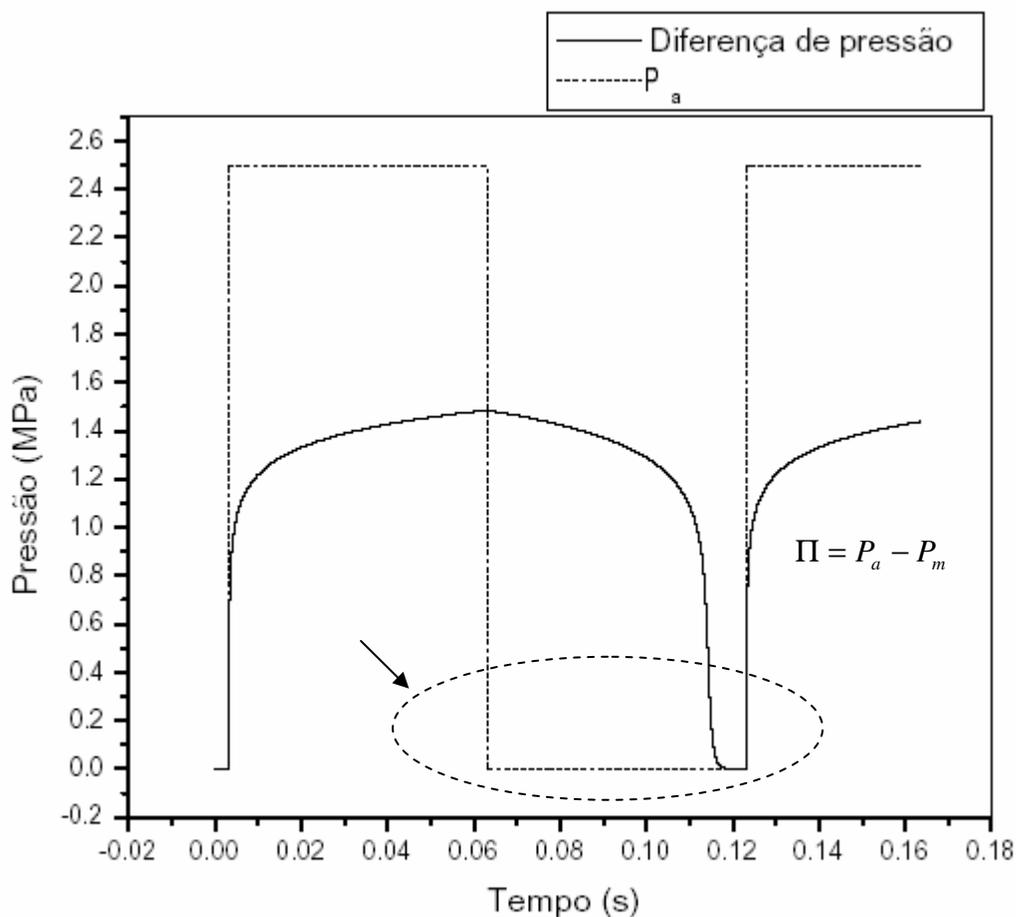


Figura 28- Os valores para CON e COFF para este gráfico são respectivamente 0 e 2,5V. O valor da pressão de controle, P_a , varia de 0 a 2,5V. A linha sólida representa a diferença de pressão, Π , na membrana (Pressão de atuação menos a pressão do tubo). A área destacada mostra que as quedas das duas curvas acontecem em pontos bem diferentes no eixo do tempo, mostrando um grande atraso na abertura da válvula. O máximo de Π é aproximadamente 1,5V, evidenciando que para esta aproximação a válvula nunca fechará totalmente.

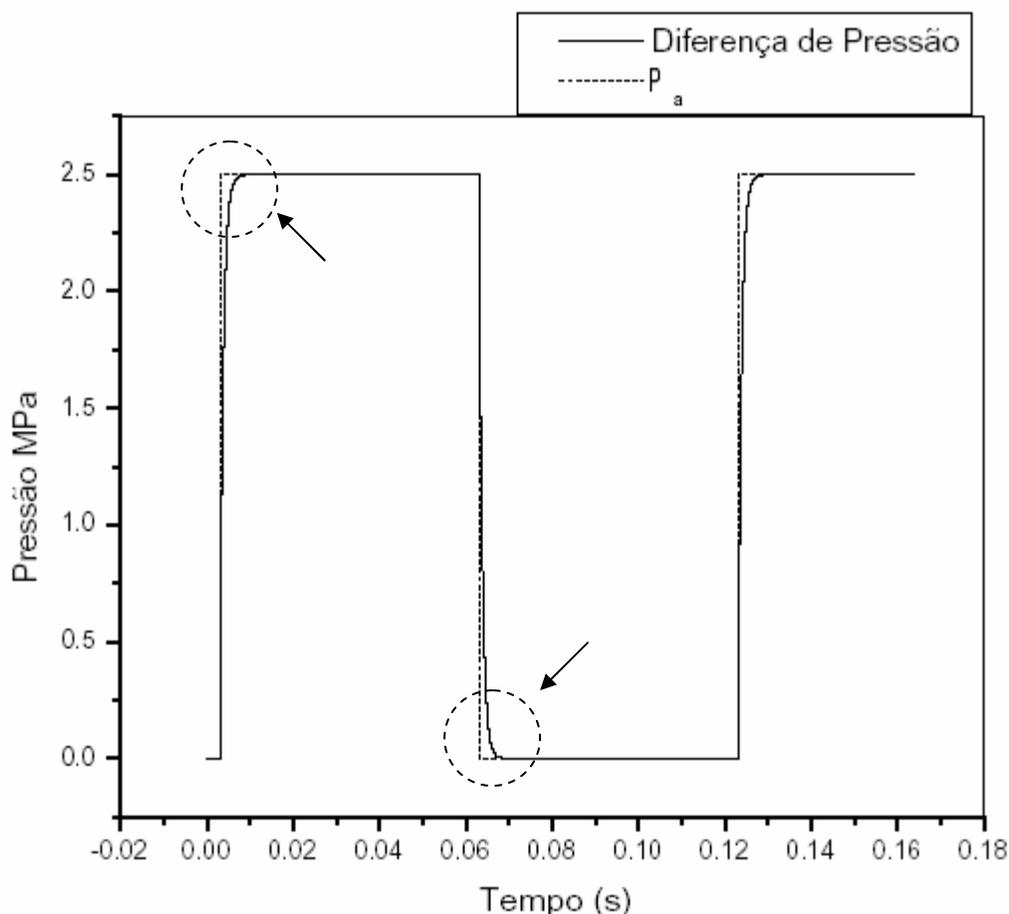


Figura 29- Os valores para CON e COFF para este gráfico são respectivamente 4.5 e 2.25V. E o valor pressão de Controle, P_a , varia de 0 a 2.5V. A linha sólida representa a diferença de pressão na membrana ($\Pi = P_a - P_m$). Os círculos pontilhados mostram um leve atraso na descida e subida da curva de Π , em relação a pressão de atuação. Este fato demonstra um pequeno atraso no abrir e fechar da válvula com a pressão de atuação.

Na figura 28 percebemos que a variação da pressão na membrana não acompanha a subida e descida da pressão de atuação, o pico máximo de Π está próximo de 0,06s com um valor de aproximadamente 1.5V, enquanto para a pressão de atuação neste instante tem seu valor máximo de 2.5V. Isto evidencia que para CON COFF com estes valores, a válvula nunca fechará completamente. Gráfico também mostra que a válvula demora quase 0,12s para ficar totalmente aberta. Já na figura 29, temos um ciclo quase em fase entre diferença de pressão na membrana e a pressão de atuação mostrando que válvula fecha quando a pressão de atuação atingir seu máximo e abre totalmente quando $P_a=0V$.

Através destes gráficos podemos calcular o comportamento de fechamento da válvula explicitamente utilizando a seguinte equação:

$$h = 1 - \frac{\Pi}{P_a}, \quad \Pi = P_a - P_m$$

Π representa a diferença de pressão na membrana, calculadas através da pressão de atuação, P_a , e da pressão no tubo, P_m . Se $h = 0$ a válvula está fechada, ou seja, a membrana está tocando o fundo canal de trabalho, e $h = 1$ corresponde a válvula totalmente aberta. O gráfico da figura 30 mostra que válvula para condição 2.5V e 0V não fica totalmente fechada e permanece um tempo muito curto aberto. Já no gráfico da figura 31 o comportamento de abrir e fechar são totalmente simétricos, ficando um determinado intervalo de tempo aberto e pra um subseqüente intervalo, com o mesmo valor, fechado.

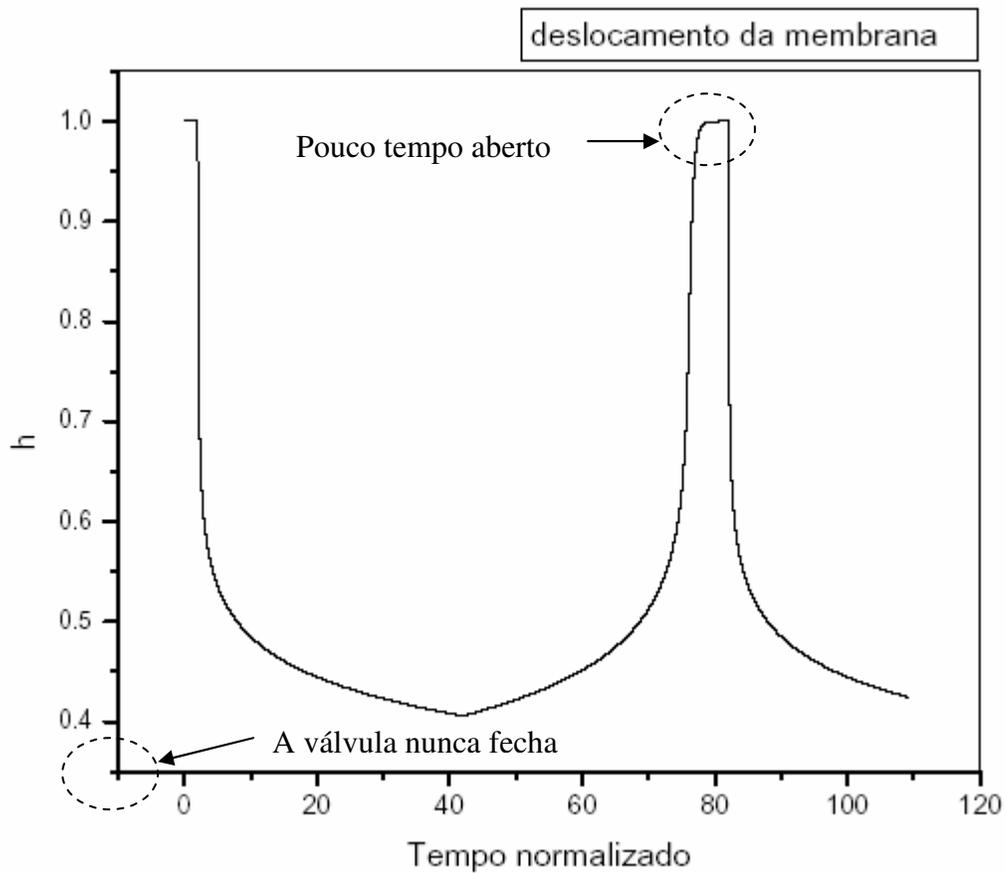


Figura 30- h representa o comportamento de abrir e fechar da válvula. Para a condição de $COFF=2,5V$ e $CON=0V$, podemos observar que a válvula não fecha completamente e permanece pouco tempo totalmente aberta. O tempo foi escalonado pela constante de tempo RC.

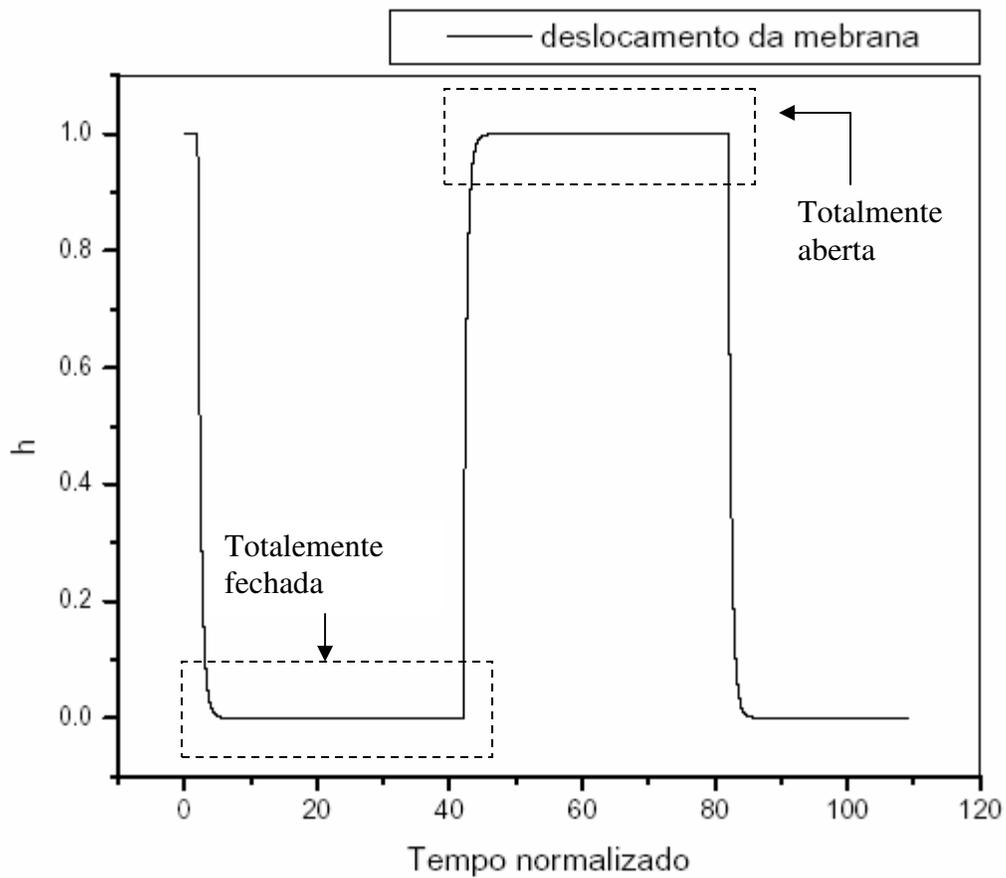


Figura 31- Para a condição de $COFF=4.5V$ e $CON=2.25V$, podemos observar que a válvula fecha e abre completamente. O tempo foi escalonado pela constante de tempo RC.

A válvula do modelo proposto por Goulpeau [43], tem seu comportamento bem aproximado pela válvula da figura 31. Mais resultados deste modelo serão apresentados na próxima seção.

4.2 Modelo I

O fluxo de saída sobre R_2 , que corresponde ao canal de saída da válvula, do circuito do modelo I é mostrado na figura 32. A cada pico, um V_v , volume em baixo de válvula, de $5,6\text{pm}^3$ é expelido. Este resultado é obtido pela integração da corrente que resulta em carga. A carga é transformada pelo fator de escala, já mostrados nas seções anteriores, em volume. O pico positivo representa V_v expelido e o pico negativo um V_v admitido, mostrando um volume liquido zero para um período de 120ms.

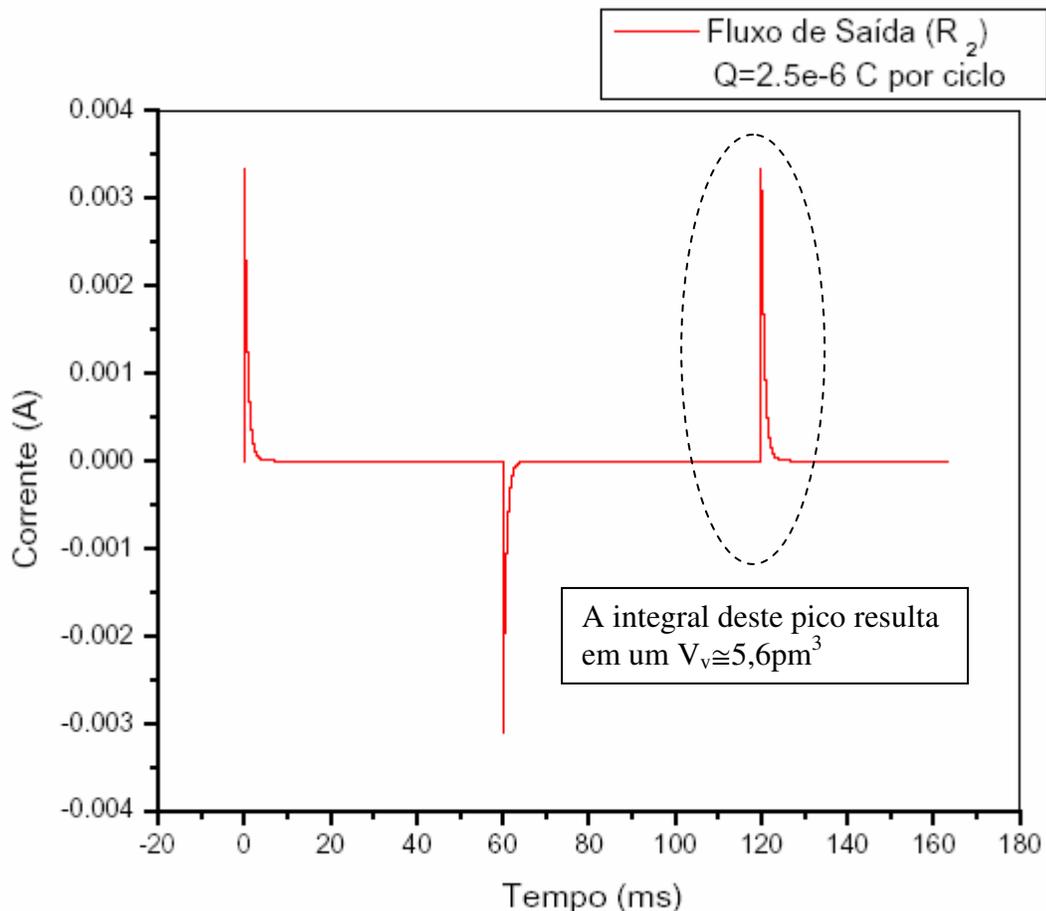


Figura 32- Temos o fluxo de saída do modelo I na resistência R_2 , que corresponde ao tubo de saída desta válvula. Os picos positivos e negativos representam, respectivamente, a descarga e a admissão de fluido.

O comportamento da Pm_{C_1} , pressão no interior do canal, é mostrado na figura 33. Quando válvula está fase de bombeamento há um aumento de pressão dentro do tubo representado pelo pico positivo do gráfico e quando a válvula está fase de admissão temos uma queda de pressão no tubo mostrado pelo pico negativo.

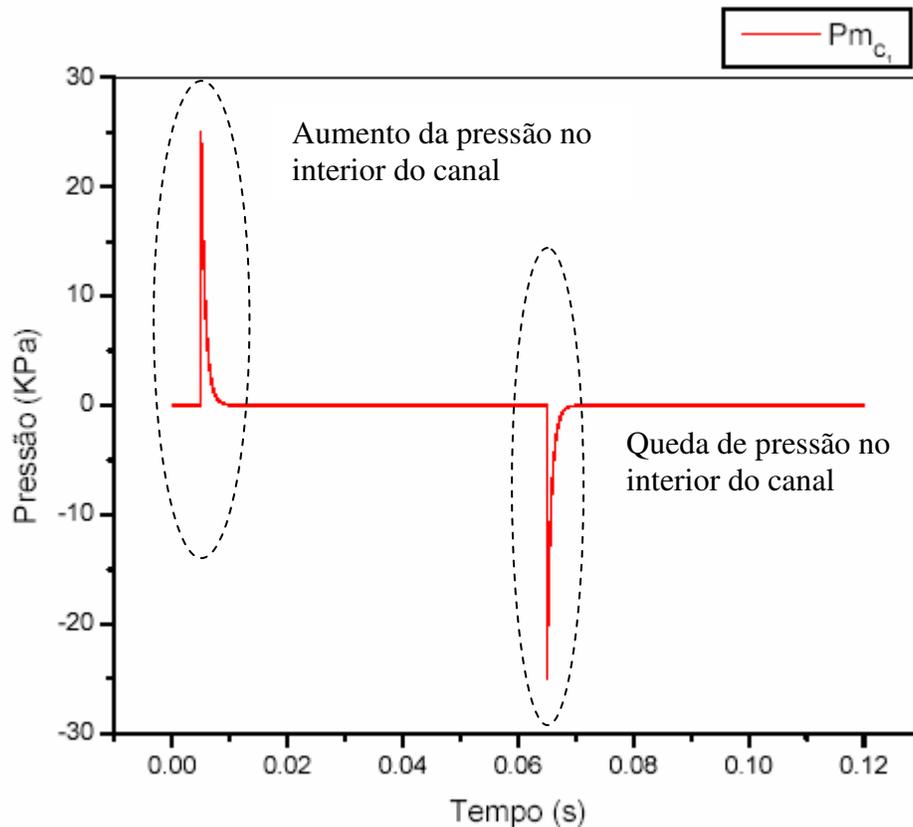


Figura 33- Temos o aumento, pico positivo, e queda, pico negativo, da pressão no tubo na região da membrana, representada por C_1 , evidenciando os ciclos de funcionamento da válvula.

Com este gráfico da figura 29 podemos observar o comportamento da diferença de pressão na membrana com a pressão de atuação. Os valores de P_{C_1} , diferença de pressão na membrana, acompanham o aumento e a queda da pressão de atuação, P_a . Com isto, a válvula abre e fecha totalmente. Este fato pode ser observado pelo fator h do gráfico da figura 31, mostrando que a válvula fica alternando, para intervalo de tempos iguais, entre $h=1$ e $h=0$.

4.3 Modelo II

A diferença de pressão nas membranas para a toda microbomba é mostrado na figura 34 e 35. Quando a pressão de atuação for maior que a pressão no tubo a membrana sofre uma deflexão no sentido do fundo do canal de trabalho indicado pelo aumento (pico positivo) da pressão média, P_m , ver figura 36. Esta deflexão causa um aumento de pressão nas outras regiões do tubo, nos outros P_m , que não estão comprimidas, evidenciadas pelos picos positivos menores nos outros gráficos da figura 36. Estas elevações de P_m , pressões médias no tubo, causam uma queda na diferença de pressão das outras membranas mostradas pelos picos descendentes da figura 35. Quando as válvulas estão retornando do estágio de deflexão completa, picos descendentes até zero da figura 35, a pressão no tubo fica maior que a pressão de atuação, causa uma queda de pressão ao longo do tubo, evidenciado pelos picos negativos do gráfico de P_m , figura 36. Esta queda resulta num aumento da diferença de pressão sobre as membranas mostradas pelos pequenos picos em ascendência..

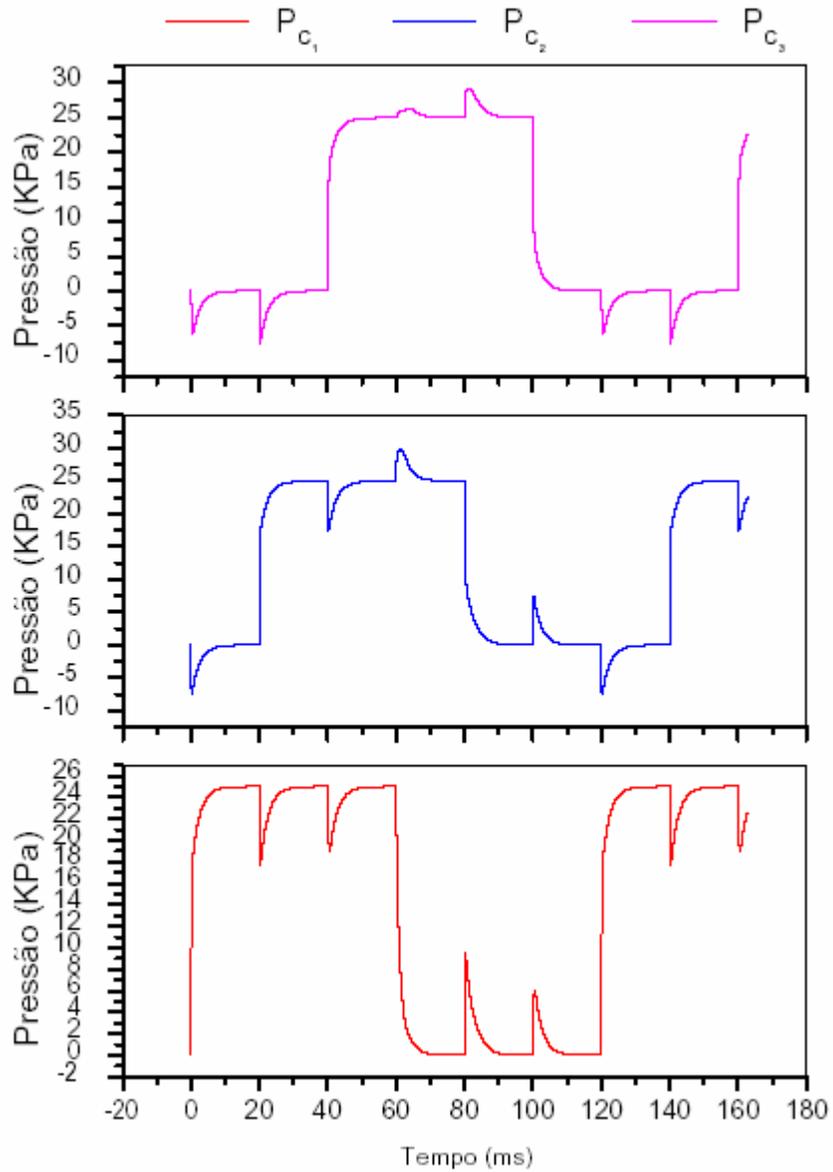


Figura 34- Gráficos das pressões diferenciais nas membranas, II. As pressões diferenciais nas membranas são representadas por P_{c_1} , P_{c_2} e P_{c_3} . A variação de uma delas é sentida pela outras duas. Veja figura 37.

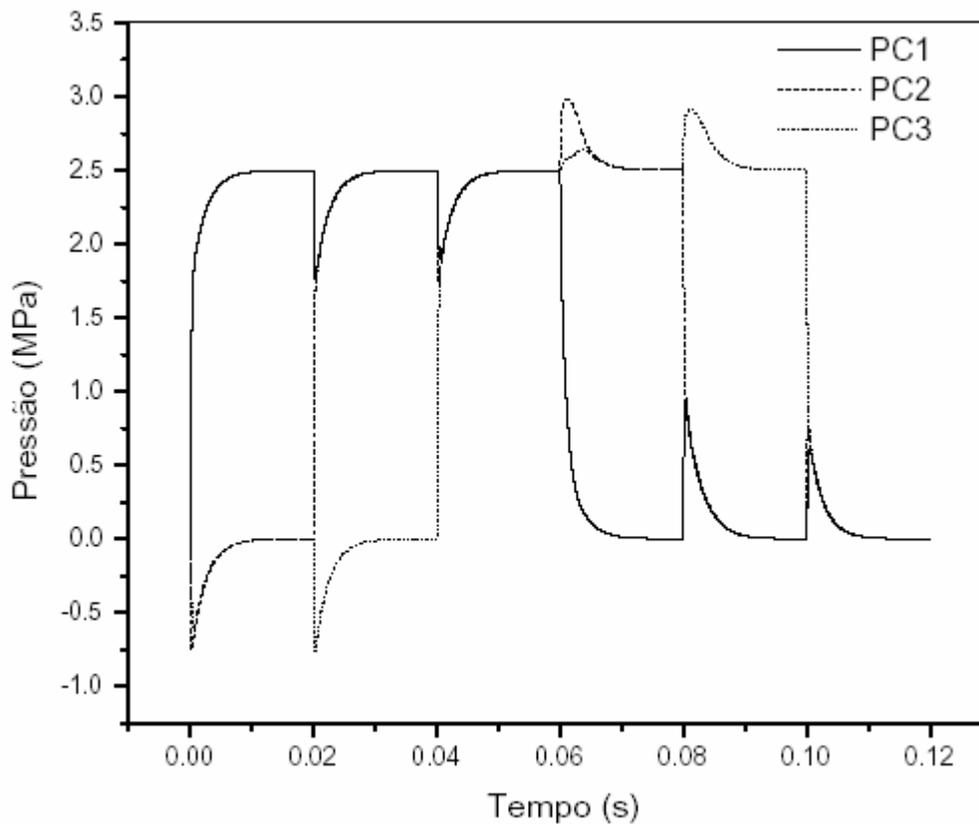


Figura 35- Nesta figura podemos verificar a influencia da pressão diferencial de uma membrana sobre as a outras duas. Para o instante de 0 a 0,02 s , temos que quando Π aumenta, pico subindo, na membrana 1(PC₁), a pressão diferencial fica negativa nas membranas 2 (PC₂) e 3 (PC₃) devido ao aumento nas pressões médias, P_m , do tubo. Este comportamento de aumentar e diminuir Π e P_m e repetido durante todo o ciclo de bombeamento mostrando a interação entre os componentes da microbomba.

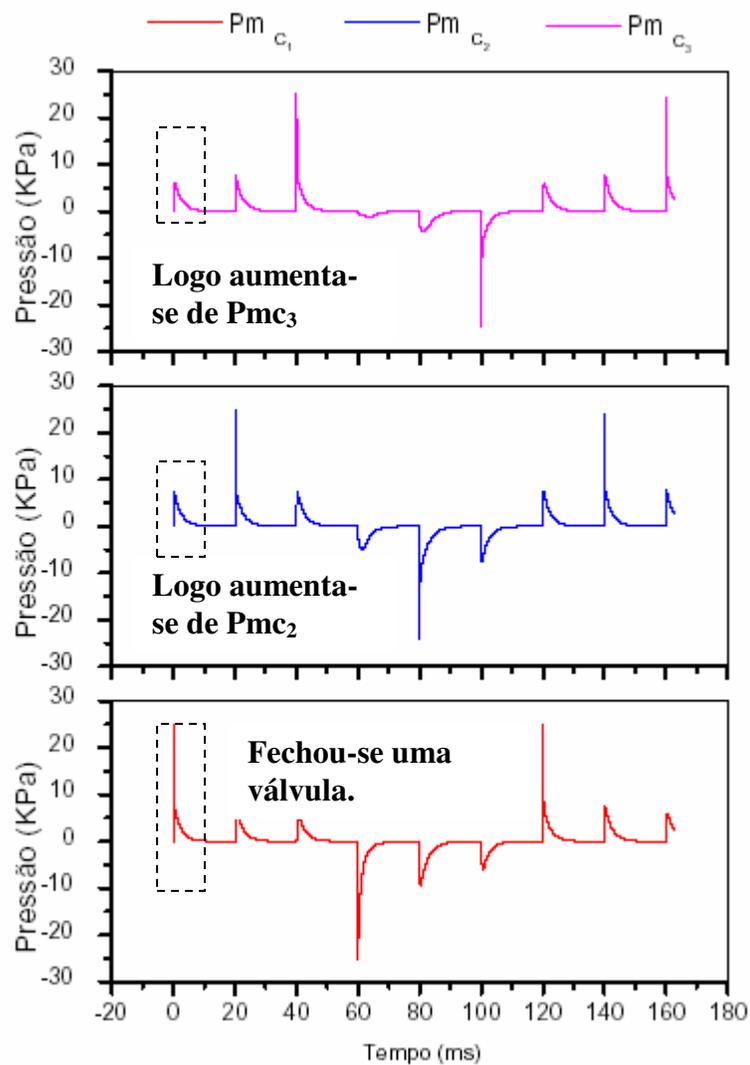


Figura 36- Gráficos das pressões nos tubos da microbomba. As variações das pressões diferenciais causam uma mudança, queda ou aumento, nas pressões dos tubos, Pm_{c_1} , Pm_{c_2} e Pm_{c_3} . Analisando os primeiros picos das Pm , vê-se os picos mais altos, estritos e negativos representam a abertura de uma válvula que causa uma queda nos outras pressões médias que são mostrados por pequenos picos negativos dos outros Pm s. Os picos mais altos, estritos e positivos representam a fechamento de uma válvula causando o aumento de pressão nas pressões médias dos outros tubos mostrados como pequenos picos positivos.

Devido aos aumentos na diferença de pressão, $P_c = \Pi$, tem-se as deflexões nas membranas, que expulsam todo o volume abaixo delas nas direções de saída e entrada do canal de trabalho. Quando uma válvula se fecha e sua vizinha está fechada, há um aumento de P_m causando uma queda na pressão diferencial da válvula vizinha que está fechada, resultando em leve subida do diafragma causando um refluxo (fig 37). Este resultado também pode ser visualizado pelo gráfico que representa o deslocamento da membrana (fig 38). O volume expelido é de 2.8pm^3 por ciclo de bombeamento.

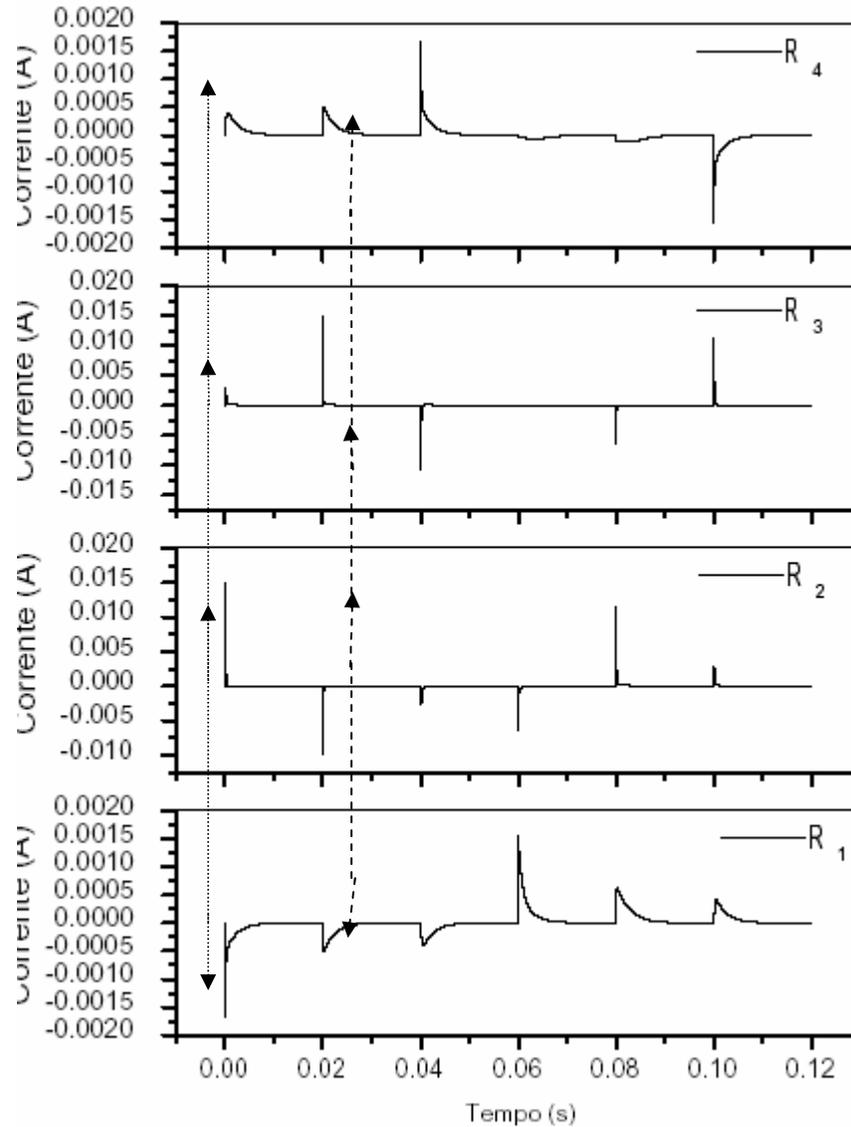


Figura 37- Todos os fluxos da microbomba sofrem modificações com a variação da pressão diferencial e da pressão no tubo. Devido ao aumento da pressão no tubo observamos refluxos por todo o processo de bombeamento do fluido. As setas pontilhadas apresentam um estágio de bombeamento da primeira válvula, seta para baixo em R₁, expulsando uma parte do fluido para baixo e outra para cima. Os picos superiores indicam que a membrana podem ter defletido levemente na direção do canal de atuação aumentando o volume em baixo dela, assim diminuindo um pouco da quantidade de fluido expelido em R₁. Outro estágio importante é representado pelas setas tracejadas, onde a válvula de R₂ expeli um volume de fluido em R₁, R₃ e R₄. Com a deflexão da membrana, P_m aumenta causando um diminuição em Π e o vazamento de fluido existirá.

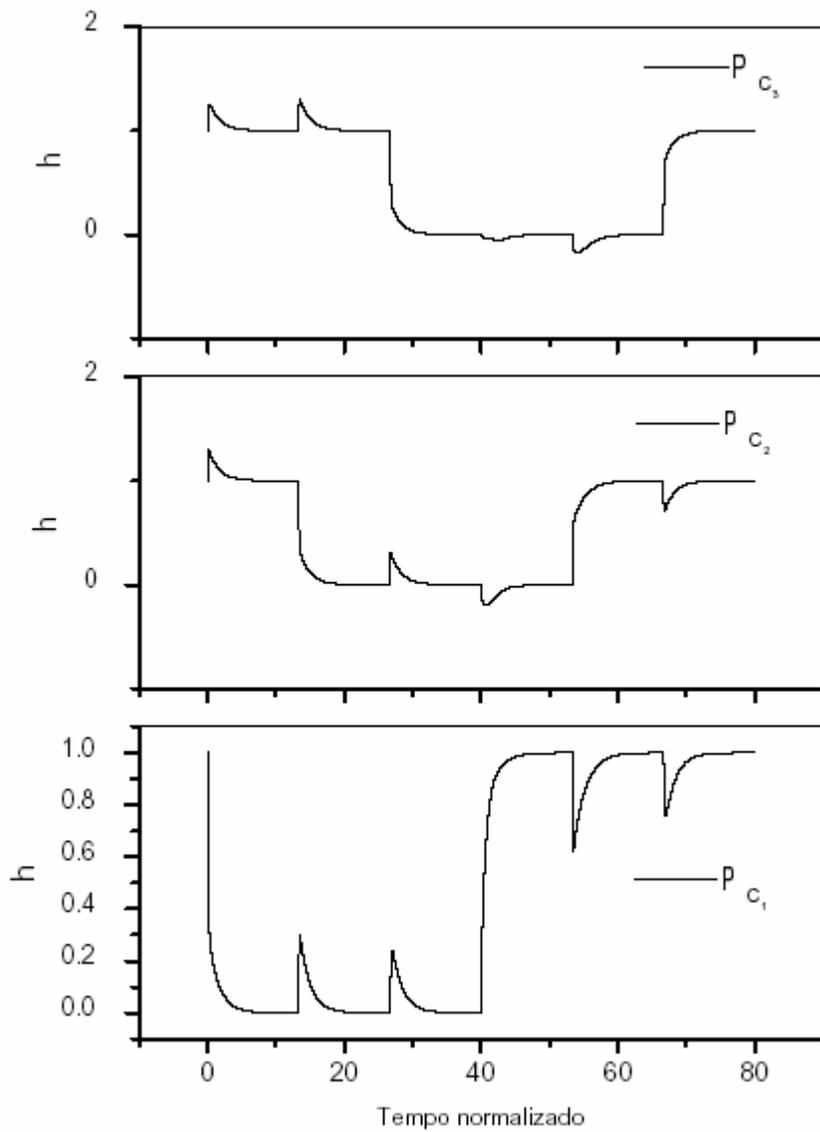


Figura 38 A variação da posição h é influenciada de pela pressão diferencial do sistema. E as interações são mostradas pelos picos do gráfico.

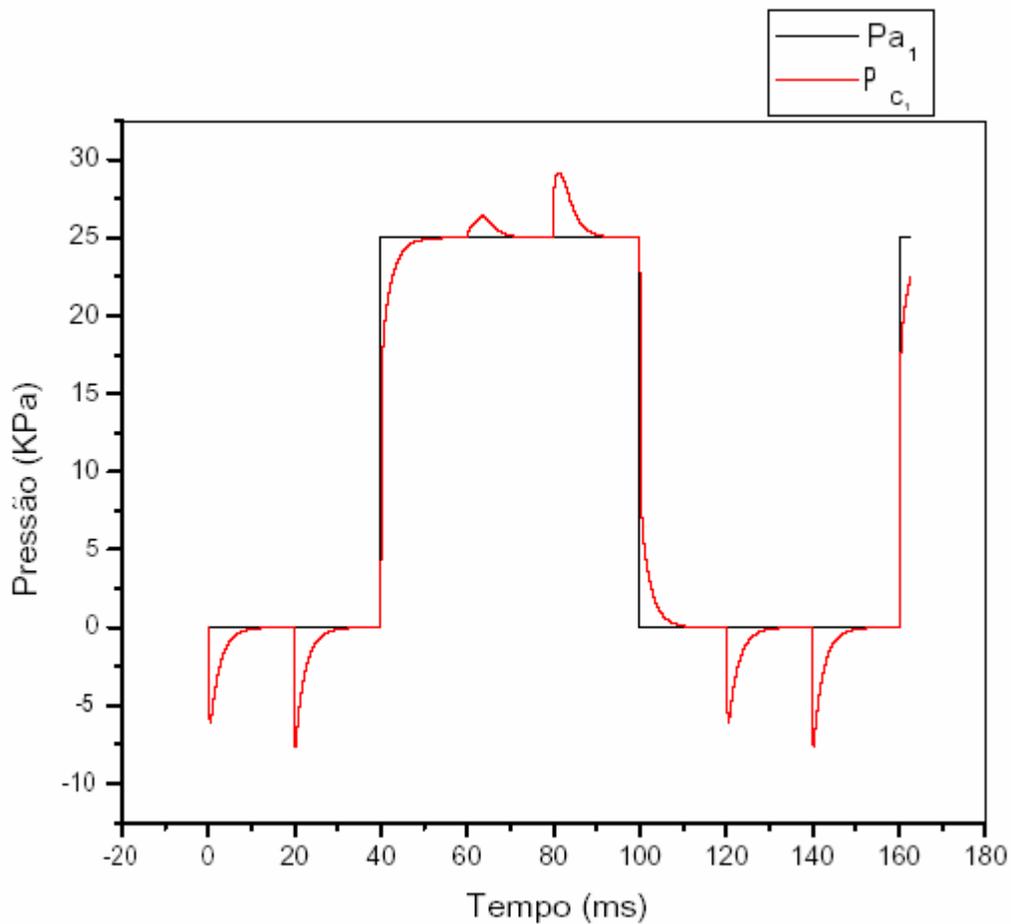


Figura 39- Temos a pressão de atuação, onda quadrada, e o comportamento da pressão diferencial na última membrana do sistema. Com este gráfico é possível observar a influência dos estados das pressões diferenciais nas outras membranas e também pelas pressões no tubo, sendo evidenciadas por picos ascendentes e descendentes.

O como mostrado anteriormente, a forma de onda da resistência variável proposta por Goulpeau [43] e a da chave analógica são bastante semelhantes. Assim variando CON e COFF para 2V e 4V respectivamente, obtemos resultados semelhantes e já interpretados anteriormente, aos do modelo I e II. A maior diferença está mostrada pela figura 42, em que o volume expelido é de aproximadamente 5pm^3 .

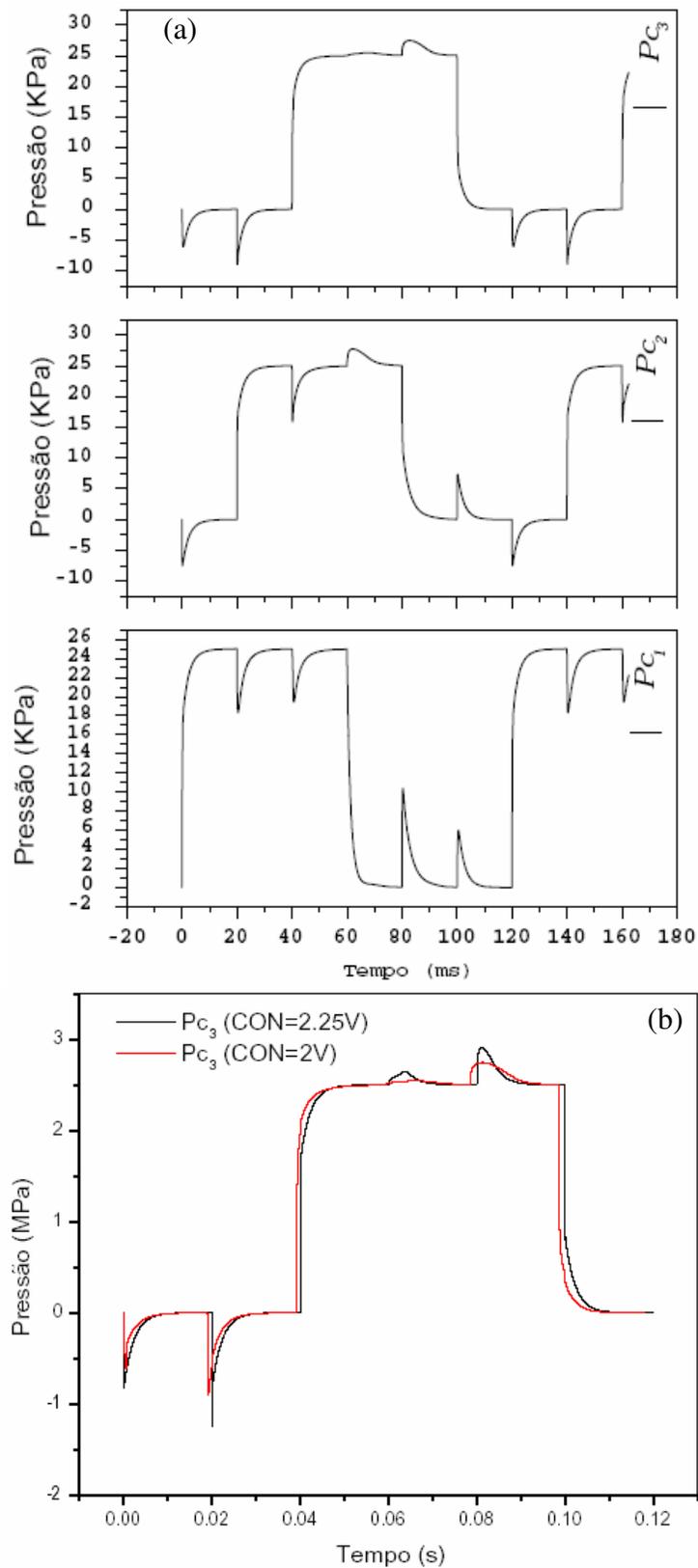


Figura 40- As variações diferenciais de pressão de membrana são refletidas nas demais (a). (b) Comparação entre as pressões diferenciais sobre a membrana representada por C_3 .

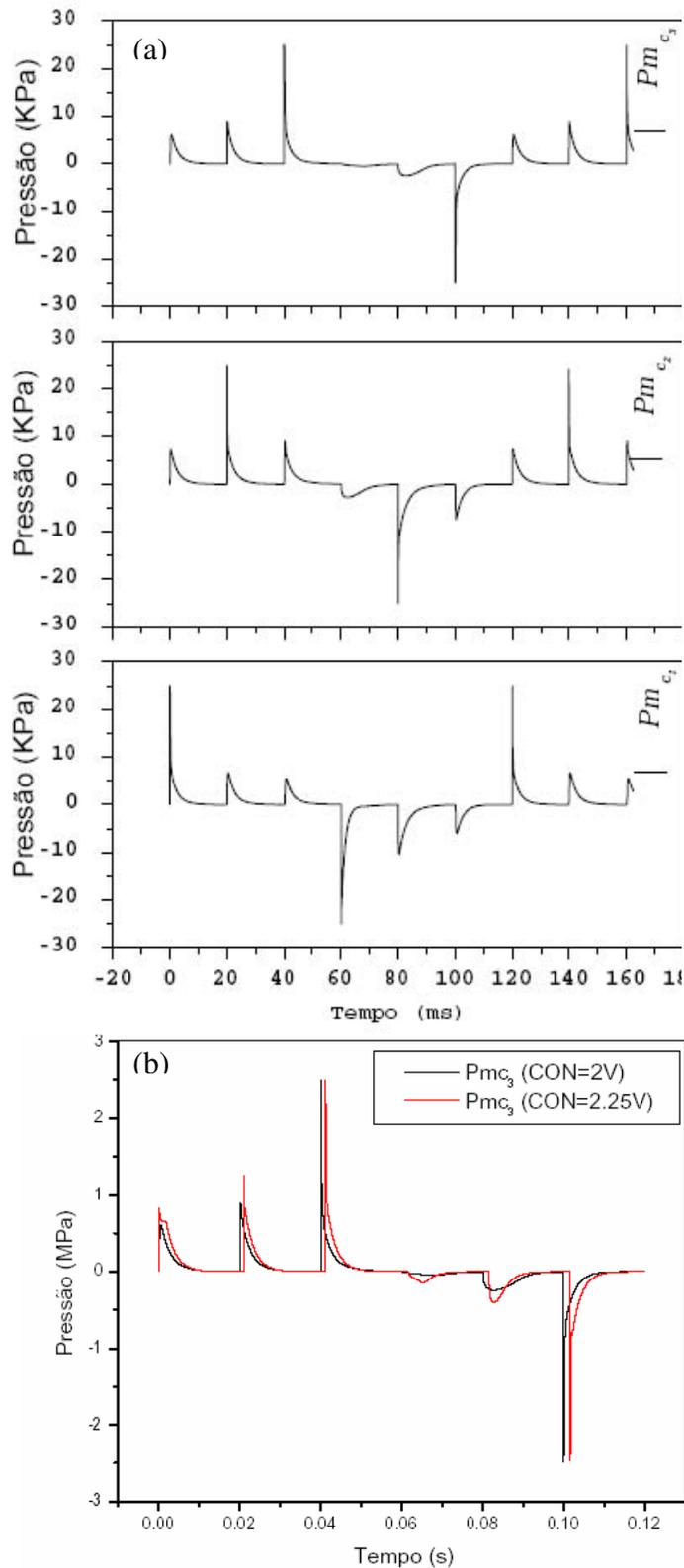


Figura 41- (a) Gráficos das pressões média nos tubos da microbomba. As variações das pressões diferenciais causam um uma mudança nas pressões dos tubos, Pm_{c_1} , Pm_{c_2} e Pm_{c_3} . (b) Comparação entre os efeitos de contra pressão na região válvula C_3 .

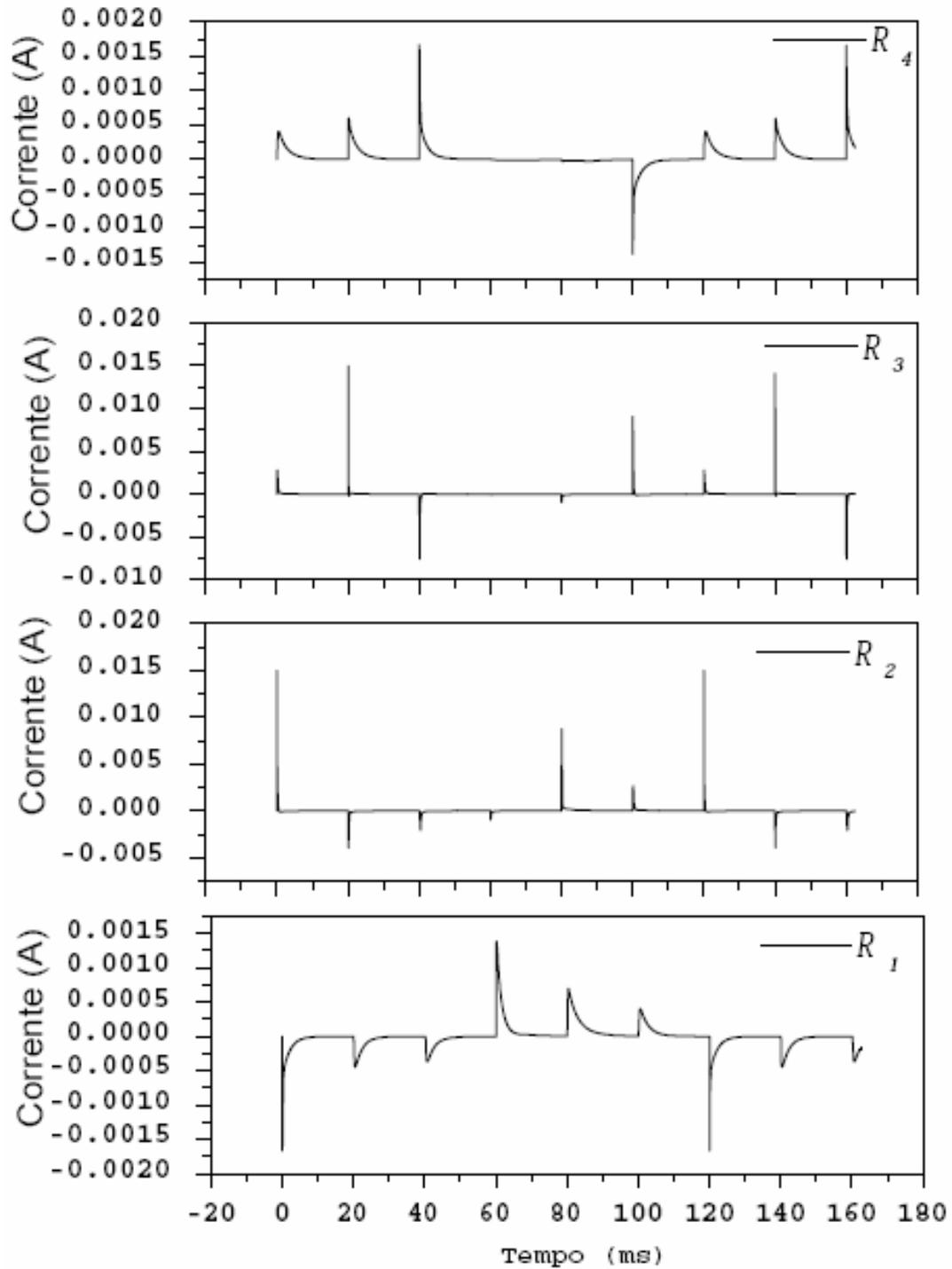


Figura 42 - Todos os fluxos da microbomba sofrem modificações com a variação da pressão diferencial e da pressão no tubo. Devido ao aumento da pressão no tubo, observamos refluxos em todo o processo de bombeamento e admissão do fluido.

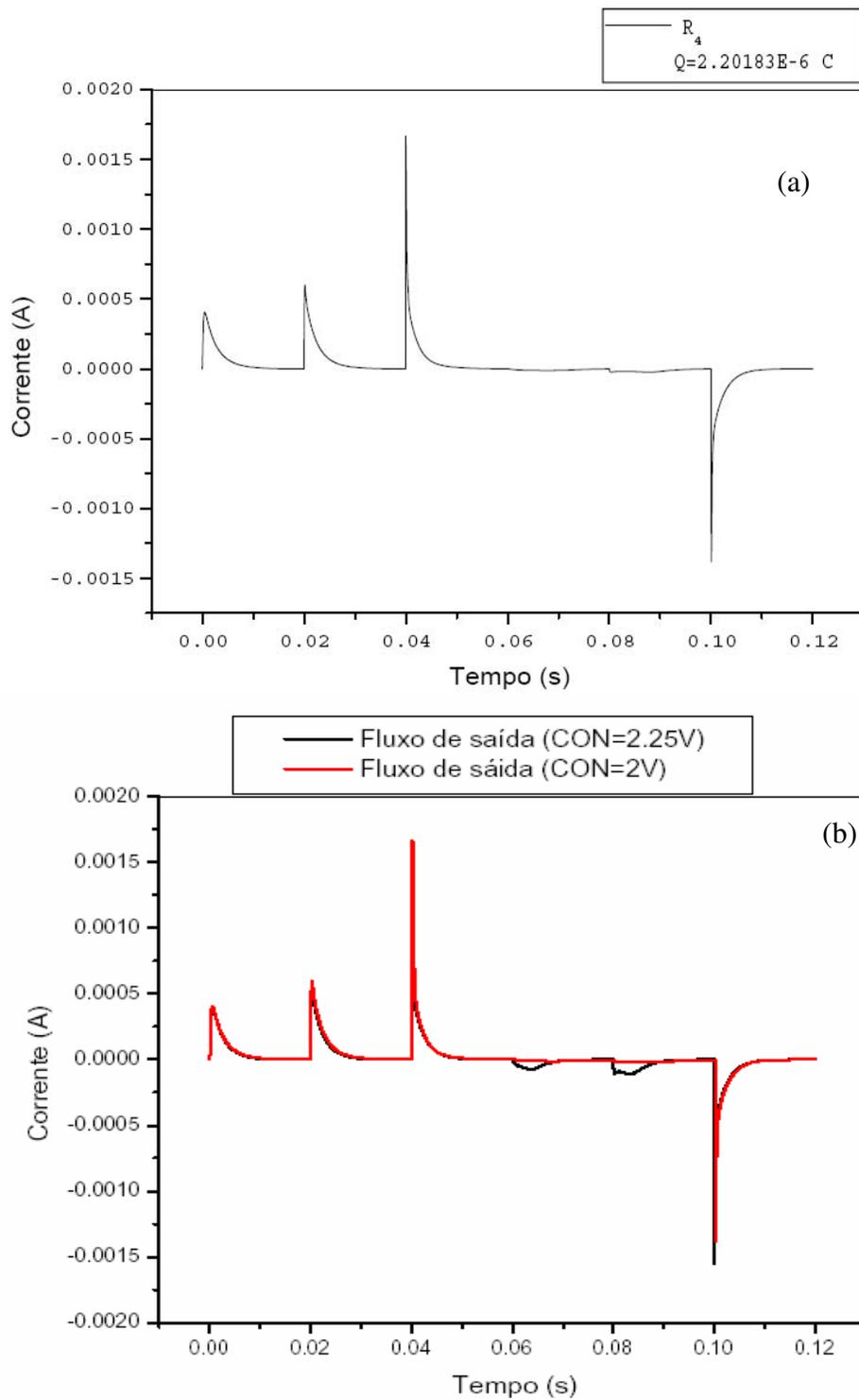


Figura 43- O fluxo saída, corrente em R_4 , em um ciclo de bombeamento. O volume expelido foi de 5 pm^3 (a). Em (b) temos uma comparação dos fluxos de CON=2.25V e 2V.

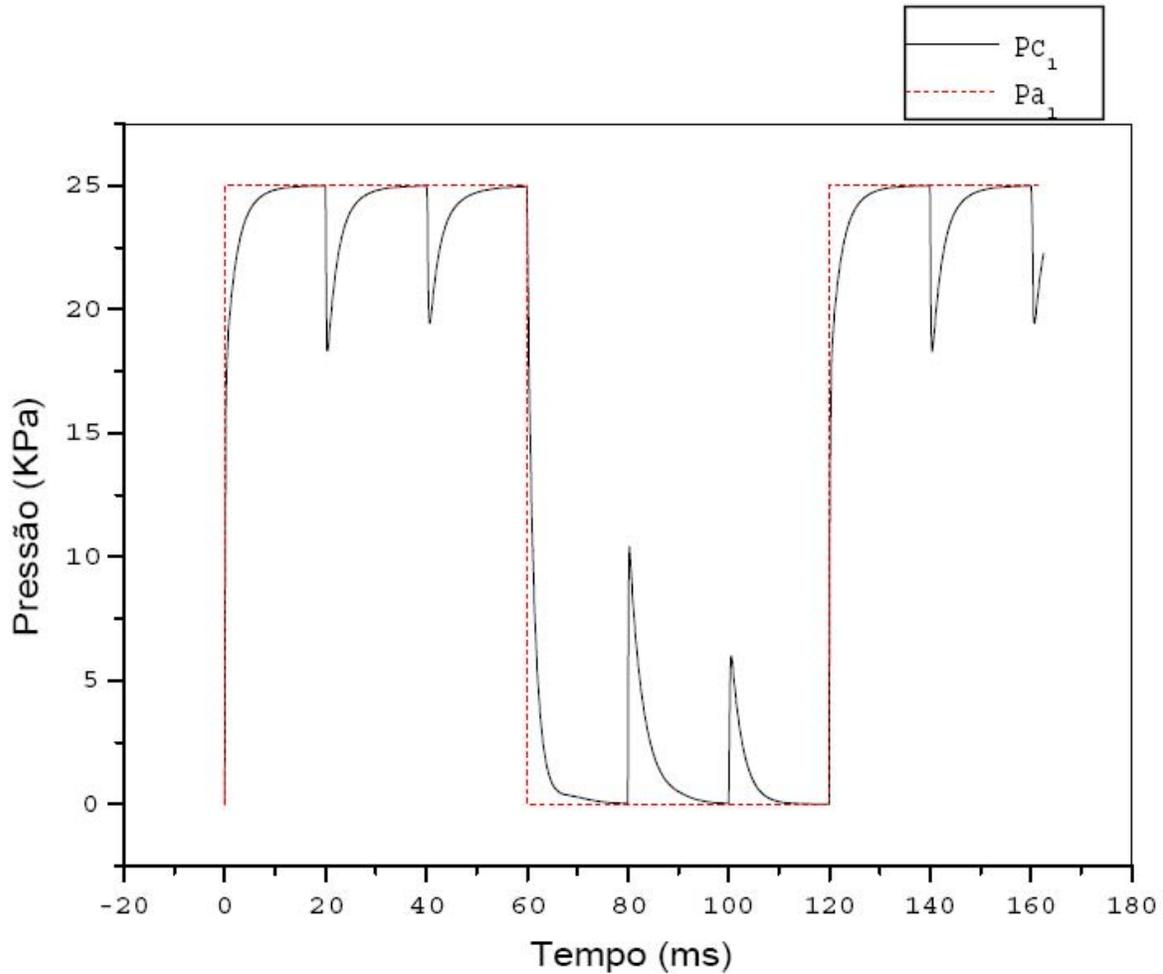


Figura 44 -Temos a pressão de atuação, onda quadrada, e o comportamento da pressão diferencial na membrana. Os valores para CON e COFF para este gráfico são respectivamente 4,0 e 2,0V. E o valor pressão de Controle, P_a , varia de 0 a 2.5V. A linha sólida representa a diferença de pressão na membrana ($\Pi = P_a - P_m$). Temos um leve atraso na descida e subida da curva de Π , em relação a pressão de atuação. Este fato demonstra um pequeno atraso no abrir e fechar da válvula com a pressão de atuação.

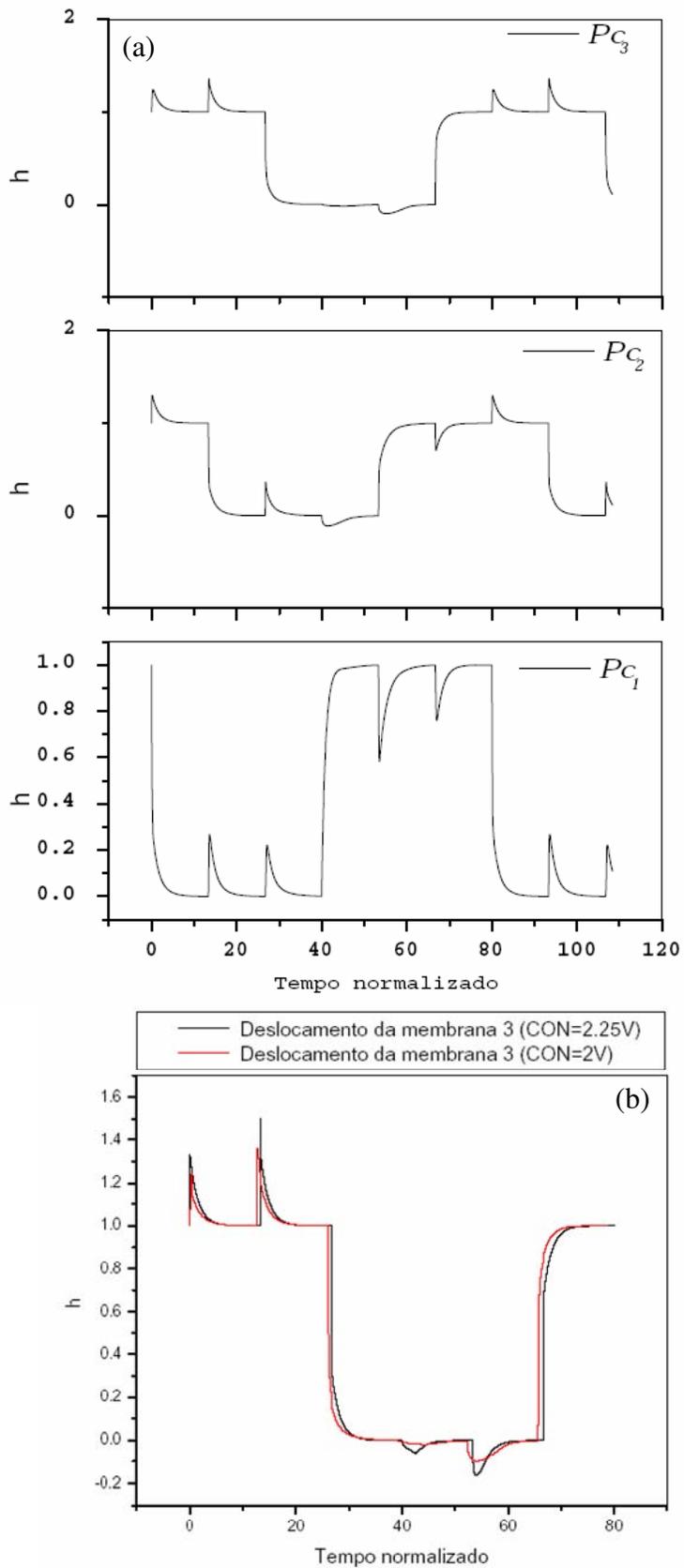


Figura 45- (a) A variação da posição h influenciada pela pressão diferencial do sistema, sendo as interações mostradas pelos picos do gráfico. (b) Comportamento de h com valores de $CON=2,25V$ e $2V$.

Dispondo dos resultados das simulações apresentados para os dois modelos faremos uma análise crítica dos resultados obtidos no próximo capítulo.

Capítulo 5

Análise dos resultados e conclusão

No capítulo anterior mostrou-se os resultados para as duas modelagens realizadas neste trabalho. O modelo I tratava-se da reprodução do único modelo de microbomba peristáltica de elastômero que temos conhecimento. O modelo II realizou a modelagem de todo o dispositivo sem o artifício simplificador utilizado pelo modelo anterior, que se utilizava da hipótese de que o volume expelido por um ciclo de bombeamento é duas vezes o volume expelido por uma válvula da microbomba.

As características da microbomba e as condições de funcionamento baseiam se em um trabalho experimental realizado por Goulpeau et al [43], para um conjunto de microbombas. Estes experimentos verificaram que volume expelido por ciclo de bombeamento é aproximadamente igual ao volume em baixo de uma válvula, em particular para a microbomba 450-A daquele trabalho, o volume expelido medido foi aproximadamente 6.3pm^3 [43].

A hipótese simplificadora utilizada pelo modelo I, ou seja, modelar somente uma válvula da microbomba e depois extrapolar para todo o sistema, mostrou-se incompleto na verificação do comportamento de volume expelido por ciclo bombeamento, apresentando um erro de 100% em relação ao volume medido experimentalmente como pode ser conferido na figura 32. Nesta figura temos que uma válvula expede 5.6pm^3 de fluido por ciclo de bombeamento, assim o volume total expelido por toda a microbomba seria de $11.2. \text{pm}^3$.

A deficiência modelo I está em não considerar a interação dos componentes de toda a microbomba. Verificamos através das figuras que mudanças na pressão diferencial sobre a membrana causam modificações na pressão interna do tubo refletindo-se no volume expelido para todo o dispositivo, como pode ser conferido nos resultados.

O modelo II trata de todas as interações entre os componentes evidenciando um refluxo devido às alterações de pressão dentro do tubo. O comportamento do fluxo na microbomba assemelha-se a filtros passa baixa associados em série, em que um sinal de entrada vai sofrendo quedas de amplitude até a saída do sistema.

Verificamos que a não linearidade sugerida pela equação de resistência variável (r) pode ser bem representada pelo comportamento da variação de resistência de uma chave analógica. No entanto, a insensibilidade sugerida pelo modelo I que a razão r_0/R , r_0 sendo a resistência mínima da chave e R a resistência do tubo de entrada ou saída, teria sobre o modelo não foi verificada. Percebemos que a existência de valores ótimos de CON e COFF que implementados no modelo II mostram um volume expelido de aproximadamente 5pm^3 , apresentando uma variação de 20% em relação ao volume medido experimentalmente. Estes valores ótimos de CON e COFF estão dentro uma faixa bem fina de valores entre 4V e 2V respectivamente, pois para valores fora desta faixa os resultados divergem dos dados experimentais.

Concluimos que a modelagem realizada com a técnica de analogias eletro-mecânicas é bastante conveniente para o uso em microbombas, devido à relação de equivalência entre seus componentes e os elementos de circuitos elétricos. Com o modelo de circuito equivalente montado podemos implementá-lo em programas de análise de circuito elétricos e as medidas de tensão/pressão, corrente/fluxo são facilmente previstas. Portanto, a modelagem de uma microbomba peristáltica de elastômero, com a arquitetura de canais cruzados e atuada defesamente em 60 graus nos seus canais de atuação foi conseguida. Isto torna possível o projeto e microfabricação de nossas próprias válvulas e microbombas peristálticas de elastômero, a partir das previsões fornecidas pela modelagem.

Propostas para trabalho futuros

Novos estudos sobre a influência da não-linearidade da resistência da microválvula devem ser realizados para determinar-se a real sensibilidade do modelo de não-linearidade.

O modelo desenvolvido poderá ser estendido para modelar microbombas peristálticas de elastômero acionadas termo-pneumaticamente, utilizando-se o método dos elementos finitos como ferramenta para a obtenção dos macromodelos térmico, mecânico e fluídico a parâmetros concentrados que constituirão os elementos do modelo por analogias eletro-mecânicas.

Referências Bibliográficas

- [1] M. Koch, A Evans, A. Brunnschweiler, *Microfluidics Technology and Application Research Studies Press*, Badlock, 2000.
- [2] A Manz, H Becker, *Microsystem Technology in Chemistry and Life Science*, Berlin, 1999.
- [3] M. Heller, A. Guttman, *Integrated Microfabricated Biodevices*, Marcel Dekker, New York, 2001.
- [4] Frost & Sullivan; *Lab-on-a-chip: The revolution in portable instrumentation*, 3rd edition, 2001.
- [5] M. Elwenspoek, T.S.J. Lammerink. R. Miyake, J.H.J. Fluitman, *Towards integrated microliquid handling systems*, J. Micromech. Microeng.4 (4) (1994) 227-245.
- [6] D J Laser and Santiago, *A review of micropump*, Department of Mechanical Engineering, J. Micromech. Microeng. 14 (2004) R35 – R64, Stanford University, Stanford, CA , USA.
- [7] Tuckerman D B and Pease R F W 1981 *High-performance heat sinking for VLSI IEEE Electron Device Lett.* 2 126–9.
- [8] Wiberg D EyreB, Shchglov K, White V and Garkanian V 2001 *Progress toward highly miniaturized vacuum pumps* 2nd Workshop on Harsh-Environment Mass Spectrometry (St. Petersburg, FL).
- [9] Wong C C, Flemming J H and Adkins D R 2002, *Evaluation of mini/micro-pumps for micro-chem-lab* Proc. 2002 ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition (New Orleans, LA).

- [10] Information web site: <http://www.myfluidix.com/>
- [11] Pennathur S 2001, *Micro-scale turbopump blade cavitation* MIT Master's thesis.
- [12] Bart S F, Tavrow L S, Mehregany M and Lang J H 1990 *Microfabricated electrohydrodynamic pumps* Sensors Actuators A 21 193–7.
- [13] Takamura Y 2001 *Low-Voltage electroosmotic pump and its applications to on-chip linear stepping pneumatic pressure source* Proc. Micro Total Analytical Systems 2001 (Monterey, CA).
- [14] J. Jang, S. S. Lee, *Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic) micropump*, Sens. Actuators 80 (2000) 84 – 89.
- [15] J. C. Rife, M. I. Bell, J. S. Horwitz, M. N. Kabler, R.C.Y Auyeung, W.J. Kim, *Miniature valveless ultrasonic pumps and mixers*, Sensors and Actuators 86 (2000) 135-140.
- [16] McKnight T E, Culbertson C T, Jacobson S C and Ramsey J M 2001, *Electroosmotically induced hydraulic pumping with integrated electrodes in microfluidic devices* Anal. Chem. 73 4045 – 9.
- [17] Richter A, Plettner A, Hofmann K A and Sandmaier H 1991 *A micromachined electrohydrodynamic (EHD) pump* Sensors Actuators A 29 159 – 68.
- [18] Lemoff A V and Lee A P 2000, *An AC magnetohydrodynamic micropump*, Sensors Actuators B 63 178–85.
- [19] Paul P H, Arnold DWand Rakestraw D J 1998 *Electrokinetic generation of high pressures using porous microstructures* Proc. Micro Total Analysis Systems 1998 (Banff,Canada).

- [20] Yao S H, Hertzog D E, Zeng S L, Mikkelsen J C and Santiago J G 2003 Porous glass electroosmotic pumps: design and experiments *J. Colloid Interface Sci.* 268 143–53.
- [21] Woias P 2005 *Micropumps—past, progress and future prospects* *Sensors Actuators B* 105 28–38.
- [22] Koch M, Harris N, Evans A G R, White N M and Brunnschweiler A 1998 *A novel micromachined pump based on thick-film piezoelectric actuation* *Sensors Actuators A* 70 98–103.
- [23] MIP Implantable product information, www.debiotech.sa
- [24] Dario P, Croce N, Carrozza M C and Varallo G 1996 *A fluid handling system for a chemical microanalyzer* *J. Micromech. Microeng.* 6 95–8.
- [25] Meng E, Wang X-Q, Mak H and Tai Y-C 2000 *A check-valved silicone diaphragm pump* *Proc. MEMS 2000: 13th Annual Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (Miyazaki, Japan)* pp 62–7.
- [26] Andersson H, van der Wijngaart W, Nilsson P, Enoksson P and Stemme G 2001 *A valve-less diffuser micropump for microfluidic analytical systems* *Sensors Actuators B* 72 259–65
- [27] Bardell R, Sharma N, Forster F, Afromowitz M and Penney R J 1997 *Designing high-performance micro-pumps based on no-moving-parts valves* *Proc. 1997 ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition (Dallas, TX)*.
- [28] M. Koch, A.G.R. Evans, A. Brunnschweiler, *The dynamic micropump driven with screen printed PZT actuator*, *J. Micromech. Microeng.* 8 (2) (1998) 119-122.
- [29] J. Branbjerg, P. Gravesen, *A new electrostatic actuator providing improved stroke length and force*, in: *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems, An*

Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots, Travemunde, Germany, 4-7 February 1992, pp. 6-11.

- [30] X. Yang, C. Grosjean, Y.-C. Tai, C.-M. Ho, *A MEMS thermopneumatic silicone membrane valve*, in: Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems, An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots, Nagoya, Japan, 26 - 30 January 1997, pp. 114-118.
- [31] Grover W H, Skelley A M, Liu C N, Lagally E T and Mathies R A 2003 *Monolithic membrane valves and diaphragm pumps for practical large-scale integration into glass microfluidic devices* Sensors Actuators B 89 315–23.
- [32] Unger M A, Chou H P, Thorsen T, Scherer A and Quake S R 2000 *Monolithic microfabricated valves and pumps by multilayer soft lithography* Science 288 113–6.
- [33] Bohm S, Olthuis W and Bergveld P 1999 *A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials* Sensors Actuators A 77 223–8.
- [34] Berg J M *et al* 2003, *A two-stage discrete peristaltic micropump* Sensors Actuators A 104 6–10.
- [35] Kamper K-P, Dopfer J, Ehrfeld W and Oberbeck S 1998, *A self-filling low-cost membrane micropump*, Proc. 11th Annual Int. Workshop on Micro Electro Mechanical.
- [36] Yoon H J, Sim W Y and Yang S S 2001, *The fabrication and test of a phase-change micropump* Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition (New York).
- [37] Gass V, Vanderschoot B H, Jeanneret S and Derooij N F 1994 *Integrated flow-regulated silicon micropump* Sensors Actuators A 43 335–8.

- [38] Benard W L, Kahn H, Heuer A H and Huff M A 1998 *Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps* J. Microelectromech. Syst. 7 245–51.
- [39] Thorsen, T., Maerkl, S.J. and Quake, S.R. 2002. *Microfluidic large-scale integration*. Science 298: 580–584.
- [40] Quake S and Scherer A 2000 *From micro- to nanofabrication with soft materials* Science 290 1536–40.
- [41] Berg J M, Anderson R, Anaya M, Lahlouh B, Holtz M and Dallas T 2003 *A two-stage discrete peristaltic micropump* , Sensors Actuators A 104 6–10.
- [42] V. Studer, G. Hang, A. Pandolfi, M. Ortiz, W. F. Anderson, and S. Quake, *J. Appl. Phys.* 95, 393 (2004).
- [43] Jacques Goulpeau, Daniel Trouchet, Armand Ajdari, and Patrick Tabeling *Experimental study and modeling of polydimethylsiloxane peristaltic micropumps* J. Appl. Phys. 98, 044914 (2005).
- [44] van de Pol F C M, van Lintel H T G, Elwenspoek M and Fluitman J H J 1990 *A thermopneumatic micropump based on microengineering techniques* Sensors Actuators A 21–3 198–02.
- [45] Zengerle R and Richter M 1994 *Simulation of microfluidic systems* J. Micromech. Microeng. 4 192–204.
- [46] BourquinaT, Grandchamp J.P., "*Modeling micropumps with electrical equivalent networks*", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.6, pp. 398-404, 1996.
- [47] M. Carmona, S. Marco, J. Samitier, and J. R. Morante, *Dynamic simulations of micropumps*, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 6, pp. 128-130, 1996.

- [48] Français, Olivier & Bendib, Samir. Electrical analogies applied on a volumetric micropump “highlighting of its fluidic resonant frequency”. Saatavilla: (viitattu 5.4.2004).
- [49] Xia Y N and Whiteside G M 1998 *Soft lithography* Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 37 550–75.
- [50] David Erickson, *Towards numerical prototyping of labs-on-chip: modeling for integrated microfluidic devices* Microfluid Nanofluid (2005) 1: 301–318.
- [51] Harrie A C Tilmans *Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: I. Lumped-parameter systems* 1996 *Journal of Micromechanics and Microengineering* 6 157–76.
- [52] I. Fuduli, A. Montefusco, E. Morganti, M. Petasecca, G. U. Pignatela , *MODELING AND OPTIMIZATION OF PIEZOELECTRIC MICROPUMPS FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS* IAEAC, the 6th Workshop on Biosensors and BioAnalytical μ -Techniques in Environmental and Clinical Analysis ENEA – University of Rome “La Sapienza”: October 8-12, 2004 – Rome, Italy.
- [53] Senturia, S. D., *Microsystem Design*, Kluwer Academic Pub, 2001.
- [54] Julio C. B. Fernandes , Luiz O. S. Ferreira, *Manufacturing of Miniature Fluidic Modules for Lab-On-a-Chip using UA Photoresin from Flexographic Platemaking Process(289/05V2)* accepted for publication on the *Journal of the Brazilian Chemical Society*. Feb .2006

