

JOSÉ GABRIEL DELLAMANO

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE ELEMENTOS DE CIRCUITOS
LÓGICOS PNEUMÁTICOS

São Paulo
2012

JOSÉ GABRIEL DELLAMANO

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE ELEMENTOS DE CIRCUITOS LÓGICOS PNEUMÁTICOS

Monografia do Trabalho de Conclusão de
Curso apresentada à Escola Politécnica
como requisito parcial para a graduação em
engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Emílio C. Nelli Silva

São Paulo
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Dellamano, José Gabriel

Estudo e implementação de elementos de circuitos lógicos pneumáticos / J.G. Dellamano. -- São Paulo, 2012. p.

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

1. Circuitos de controle pneumático 2. Vácuo 3. Válvulas de controle pneumático I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Emílio C. Nelli Silva, pela orientação e pela disposição em me auxiliar, desde a busca pelo tema até os últimos ajustes na apresentação final. Ao prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau e ao Adílson, técnico da Escola Politécnica, pelo auxílio na construção dos protótipos.

A minha família, aos meus amigos e a minha namorada, que, em diferentes momentos e de diferentes formas, me deram todo apoio de que eu necessitava para passar por esses 5 anos de vida universitária.

RESUMO

Circuitos eletrônicos estão sujeitos aos mais diversos tipos de interferências e perturbações, existindo situações onde a utilização dos mesmos se torna impossível, ou muito perigosa, como equipamentos internos ao corpo humano, lugares próximos a materiais explosivos, etc. Como alternativa nessas situações, podemos citar circuitos pneumáticos. O estudo de circuitos microfluídicos permite, no ramo dos circuitos pneumáticos, o desenvolvimento de circuitos que possuem elementos com funcionamento análogo ao de elementos eletrônicos, como resistores, capacitores e até válvulas que atuam como transistores do tipo P-MOSFET. Nesses circuitos a diferença de pressão é análoga à diferença de potencial, e o fluxo de ar à corrente elétrica. Esse tipo de circuito pode ser implementado utilizando placas de materiais como o silício, vidro ou acrílico e membranas de material elástico. Esse trabalho visa a construção e demonstração de elementos de circuitos lógicos pneumáticos, que podem utilizar elementos análogos a elementos eletrônicos, principalmente válvulas que funcionam como transistores, para a implementação de lógica digital. Esse tipo de circuito pode substituir o trabalho de controladores lógicos eletrônicos nos casos em que seu uso pode oferecer algum risco. Inicialmente será feito o projeto de uma série de circuitos, com o intuito de demonstrar a aplicabilidade e o alcance desse tipo de dispositivo e, em seguida, o projeto e construção de protótipos, baseando-se nas características estudadas. O circuito a ser construído deve utilizar materiais de fácil acesso, e mostrar as principais características desse tipo de circuito.

Palavras chave: Microprocessador pneumático, Circuito lógico pneumático, Microfluídica.

ABSTRACT

Electronic circuits are subjected to several types of interferences, so that their use is impossible or very dangerous in some situations (devices in the human body, near explosive materials, etc.). As an alternative in these situations, we can use pneumatic circuits. The study on microfluidic circuits allows, in the field of pneumatic circuits, the development of circuits that have elements that work similarly to electronic elements, like resistors, capacitors and even valves that act like P-MOSFET transistors. In these circuits the pressure difference is analog to the potential difference, and the air flux is analog to the electric current. This kind of circuits can be implemented by materials like silicon, glass or acrylic and elastic membranes. This work's objective is to design and build pneumatic logical circuits elements, using elements that work like electronic elements, mainly transistors, for the implementation of digital logic. The circuits may be able to replace electronic controllers where its use may offer some risk. Initially, a series of circuits will be projected, showing the applicability and the range of use of this kind of device, then the project and construction of prototypes. The circuits must use accessible materials, and show the main characteristics of this type of the circuit.

Keywords: Pneumatic microprocessor, Pneumatic logical circuit, Microfluidics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de plataformas microfluídicas segundo seu acionamento.	9
Figura 2 - Esquema de funcionamento de microbomba.	10
Figura 3 – Somador digital pneumático de 8 bits	11
Figura 4 – Válvula pneumática análoga a PMOSFET.	12
Figura 5 – Aplicações de plataformas “Microfluidic large scale integration”	14
Figura 6 - Bomba microfluídica.	15
Figura 7 - Dispositivo de diagnóstico construído por Wang e Lee.	16
Figura 8 - Válvula NA com acionamento por aplicação de pressão	17
Figura 9 - Válvula NF com acionamento através de $P_i > P_c$	17
Figura 10 - Válvula NF com acionamento por $P_c > P_i$	18
Figura 11 - Válvula análoga a P-MOSFET.	18
Figura 12 - Funcionamento da válvula análoga a P-MOSFET	19
Figura 13 - Dispositivo construído por Takao; Ishida e Sawada.	20
Figura 14 - Elementos pneumáticos análogos a resistor (a) e capacitor (b)	21
Figura 15 - Válvula NF à vácuo construída por Rhee e Burns.	22
Figura 16 - Inversor pneumático.	23
Figura 17 - Circuitos lógicos pneumáticos propostos por Rhee e Burns	23
Figura 18 - Multiplexador pneumático construído por Rhee e Burns.	24
Figura 19 - Configuração de válvulas NF à vácuo.	25
Figura 20 - Circuito lógico pneumático de teste	26
Figura 21 - Sequência lógica executada pelo circuito de Grover et al.	26
Figura 22 - Demultiplexador pneumático.	27
Figura 23 – Esquema de Funcionamento de válvula NF à vácuo	27
Figura 24 - Circuitos lógicos pneumáticos.	28
Figura 25 - Somador pneumático de 8 bits	29
Figura 26 - Resultados obtidos pelo somador pneumático de 8 bits	29
Figura 27 - Estrutura física do transistor MOSFET.	33
Figura 28 - Gráfico de corrente de dreno i_D versus tensão dreno-fonte V_{DS} , com V_{GS} fixo, num transistor NMOS	34
Figura 29 - Símbolo do transistor P-MOSFET	35

Figura 30 - Simbologia adotada para válvulas propostas.....	37
Figura 31 - Símbolo de temporizador pneumático.....	37
Figura 32 - Circuito AND pneumático cíclico.	39
Figura 33 - Circuito AND pneumático cíclico com atuação por válvula externa.	39
Figura 34 - Circuito NAND pneumático cíclico.	41
Figura 35 - Implementação de AND com alteração no sinal de entrada.	43
Figura 36 - Projeto de demultiplexador pneumático.	44
Figura 37 - Esboço de projeto válvula NF à vácuo (peça 1).....	45
Figura 38 - Esboço de projeto válvula NF à vácuo (peça 2).....	46
Figura 39 - Esboço de projeto válvula NF à vácuo (montagem).....	46
Figura 40 - Seringa e válvula utilizadas no projeto.....	47
Figura 41 - Válvula utilizada no projeto.	48
Figura 42 - Conector “push-In fitting”.....	48
Figura 43 - Projeto de válvula NF à vácuo em CAD (peça 1).....	49
Figura 44 - Projeto de válvula NF à vácuo em CAD (detalhe da peça 1).	50
Figura 45 - Projeto de válvula NF à vácuo em CAD (peça 2).....	50
Figura 46 - Peças da válvula NF à vácuo construídas.	51
Figura 47 - Peça da válvula NF à vácuo (canais de entrada e saída).	51
Figura 48 - Peça da válvula NF à vácuo (câmara de deslocamento).	52
Figura 49 - Montagem de válvula NF à vácuo.....	53
Figura 50 - Detalhe da membrana demonstrando sinal de saída em teste de válvula NF à vácuo.	53
Figura 51 - Projeto em CAD de "AND" lógico (peça 1).....	55
Figura 52 - Projeto em CAD de "AND" lógico (peça 2).....	55
Figura 53 - Projeto em CAD de circuito com "OR" lógico (peça 1).....	56
Figura 54 - Projeto em CAD de circuito com "OR" lógico (peça 2).....	56
Figura 55 - Peças do circuito "AND" lógico.	57
Figura 56 - Detalhes das peças do circuito "AND" lógico.	57
Figura 57 - Circuito "AND" lógico montado e esquema do circuito.....	58
Figura 58 - Teste realizado com "AND" lógico.	58
Figura 59 - Peça 1 de circuito "OR" lógico pneumático.	59
Figura 60 - Peça 2 de circuito "OR" lógico pneumático.	59
Figura 61 - Detalhe das peças de circuito "OR" lógico.	60
Figura 62 - Montagem de teste de "OR" lógico e esquema do circuito	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Motivação.....	12
1.2 Objetivo.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4. DESENVOLVIMENTO	33
4.1 Transistor do tipo MOSFET	33
4.2 Definição das características do projeto	35
4.3 Projeto de Circuitos Lógicos.....	36
4.4 Projeto e construção da primeira válvula	44
4.5 Montagem da primeira válvula e testes.....	52
4.7 Circuitos lógicos	54
5. RESULTADOS E CONCLUSÕES	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO.....	65
APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DOS CIRCUITOS.....	67

1. INTRODUÇÃO

Quase 10 mil artigos foram publicados em 10 anos, até 2010, no tópico de circuitos microfluídicos. Além disso, mais de 10 mil patentes foram lançadas apenas nos EUA. Porém, o número de produtos comerciáveis baseados nesse tipo de circuito ainda é muito baixo (MARK et al., 2010).

Circuitos microfluídicos lidam com os mais diversos tipos de fluídos, diferindo de outros sistemas de fluídos devido à dimensão dos dispositivos. Os sistemas microfluídicos surgiram por volta da década de 50, para que, na década de 90, levassem a criação de diversas estruturas de micro válvulas e microbombas (MARK et al., 2010; HAEBERLE; ZENGERLE, 2007).

Mark (2010) cita diversas “plataformas microfluídicas”. Pode-se ver, na figura 1, um pequeno diagrama proposto por Mark (2010) que mostra os diversos tipos de circuitos microfluídicos.

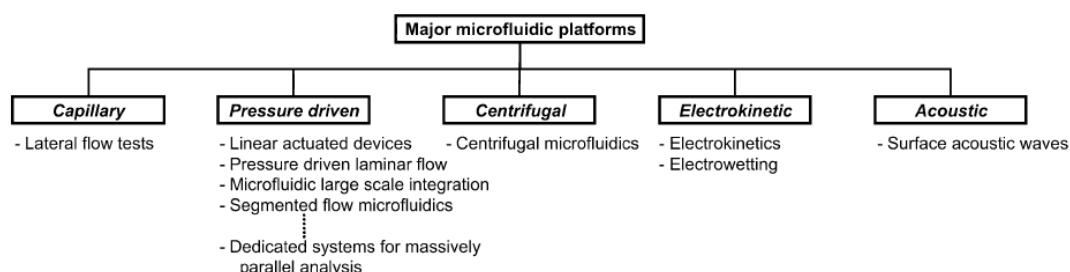


Figura 1 - Esquema de plataformas microfluídicas segundo seu acionamento (MARK et al., 2010).

Como se pode ver, os circuitos microfluídicos podem ser de diversas características quanto ao fluido utilizado, forma de atuação, utilização, etc., podendo ser acionado pelo movimento do próprio fluido, por acionamento auxiliado por energia elétrica, por força centrífuga, entre muitos outros, cada um com seus tipos de aplicação.

Dentre os circuitos citados, temos os “*Microfluidic large scale integration*”, que possibilitam a construção de pequenas válvulas pneumáticas. Essas válvulas se valem da atuação da pressão sobre uma membrana, que se deforma e atua sobre o circuito. Esse tipo de válvula possui diversas aplicações já demonstradas em alguns

trabalhos (JEONG; KONISHI, 2007a; WANG; LEE, 2005; GORISSEN et al., 2011), incluindo a construção de microbombas, como a proposta por Jeong e Konishi (2007a), cujo esquema de funcionamento pode ser visto na figura 2.

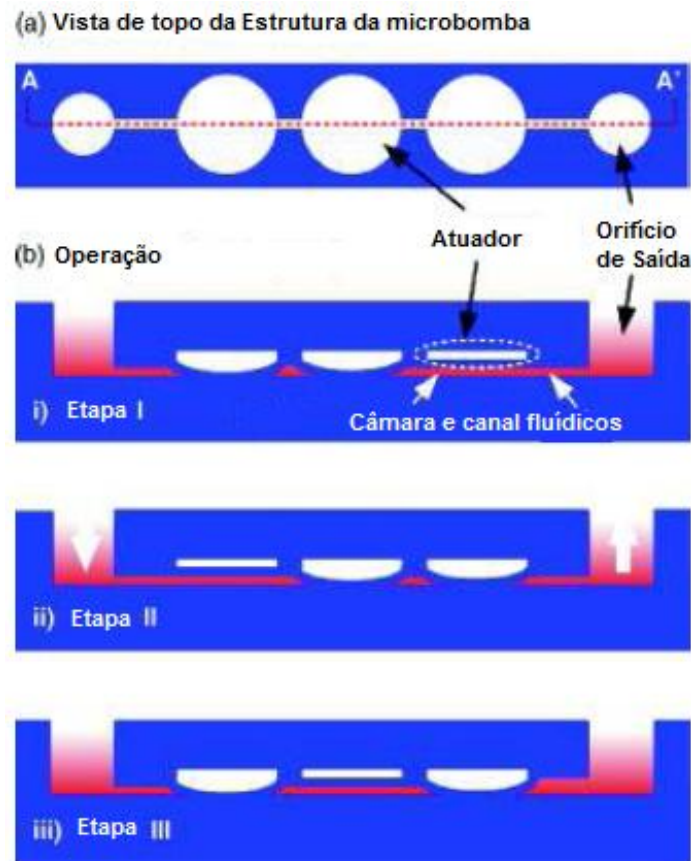


Figura 2 - Esquema de funcionamento de microbomba (JEONG; KONISHI, 2007a).

A partir dessas pequenas válvulas faz-se possível a construção de grandes circuitos microfluídicos, dentre os quais podemos citar os pneumáticos. A partir de microválvulas pneumáticas, podemos gerar grandes circuitos, controlando diversos tipos de processo por meio de lógicas de controle.

Por causa da dimensão reduzida desse tipo de válvula, cerca de $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, um único circuito pode acomodar milhares dessas válvulas (MARK et al., 2010). Um exemplo mostrado por Jensen; Grover e Mathies (2007) pode ser visto na figura 3.

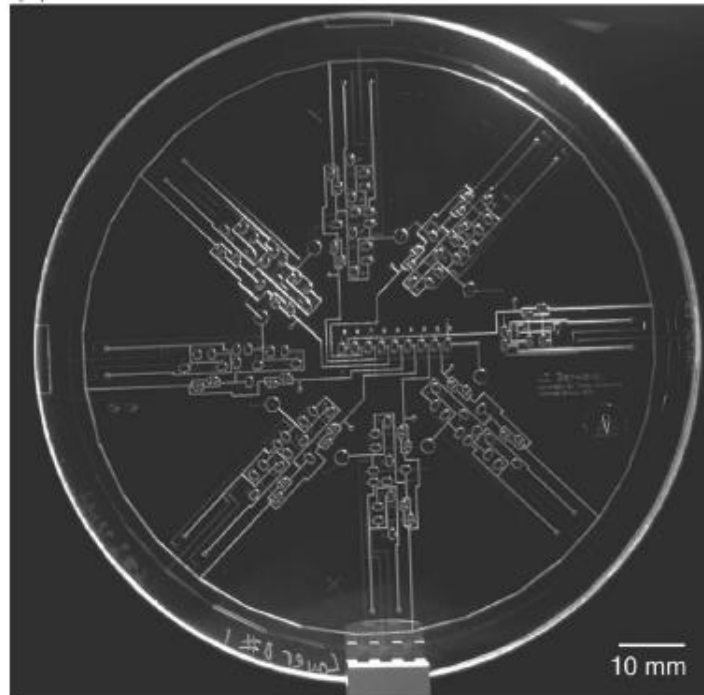


Figura 3 – Somador digital pneumático de 8 bits (JENSEN; GROVER; MATHIES, 2007).

Sistemas de lógica de controle pneumáticos são particularmente úteis em ambientes hostis nos quais dispositivos eletrônicos apresentam perigo ou mau funcionamento devido a interferência (JENSEN; GROVER; MATHIES, 2007). Assim, ambientes em que a presença de equipamentos elétricos não é permitida, como indústria de explosivos, dispositivos para serem utilizados dentro do corpo humano, entre outros, podem se favorecer do emprego de circuitos inteiramente pneumáticos. Vemos um exemplo desse tipo de atuação na criação de dispositivos pneumáticos de contato, em substituição de dispositivos elétricos, em portas automáticas (MILLER, 1967).

Já foi sugerida analogia entre P-MOSFET eletrônico e uma micro-válvula pneumática (HENNING, 2004), como a válvula esquematizada na figura 4 (o funcionamento dessa válvula será explicado posteriormente). A partir dessas válvulas, além de outras analogias com circuitos RC (TAKAO; ISHIDA, 2003), se permite a construção de circuitos complexos, capazes de executar diversas tarefas sem a necessidade de eletricidade.

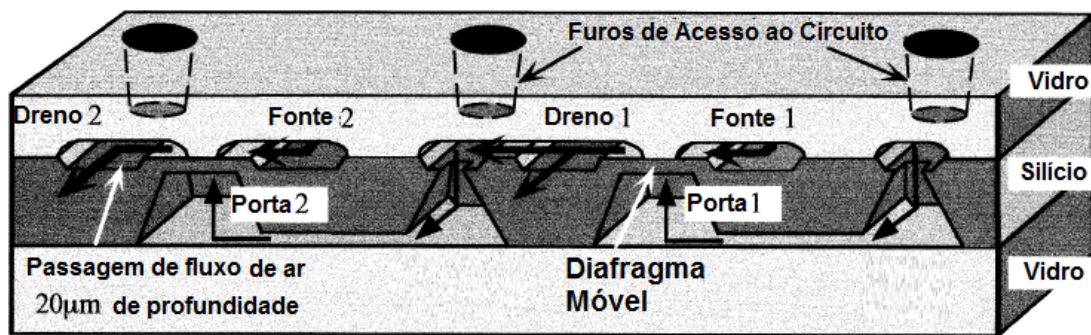


Figura 4 – Válvula pneumática análoga a PMOSFET (TAKAO; ISHIDA, 2003).

Como exemplo do alcance da complexidade que esse tipo de circuito pode atingir, podemos citar o desenvolvimento de um somador lógico e 8 bits, por Jensen; Grover e Mathies, visto na figura 3.

Assim, com capacidade de construção de circuitos de alto grau de complexidade, circuitos microfluídicos pneumáticos se mostram muito versáteis, servindo como alternativa para circuitos eletrônicos em diversas situações.

1.1 Motivação

Circuitos eletrônicos estão sujeitos a interferências e perturbações, que podem possuir diversas causas, como interferências eletromagnéticas, picos de tensão e corrente, etc. Em muitos casos a eletricidade se torna impossível de ser utilizada, podendo ser até perigosa, como em minas de carvão, fábricas de explosivos, dispositivos de bioengenharia (internos ao corpo humano, como o marca-passo), entre outros.

Como alternativa para esses casos, surge os circuitos pneumáticos. Circuitos lógicos pneumáticos são capazes de substituir circuitos eletrônicos mesmo no que diz respeito à implementação de lógicas digitais, podendo substituir, em muitos casos, CLPs (Controlador Lógico Programável) e até microprocessadores para o controle de processos.

1.2 Objetivo

Esse projeto tem por objetivo o estudo e a construção de elementos de circuitos lógicos pneumáticos simples, com materiais que sejam de fácil acesso, para a verificação dos principais conceitos relacionados a “Circuitos Lógicos Pneumáticos” de pequena escala, da ordem de centímetros. Para isso, o projeto inclui o desenho de diversos circuitos e a construção de elementos dos mesmos.

Os dispositivos a serem construídos devem ser capazes de implementar lógica digital, baseando-se na analogia entre circuitos pneumáticos e circuitos eletrônicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como visto anteriormente, o campo de estudo da microfluídica é bastante abrangente. Dependendo do tipo de fluido e da forma de atuação, esse tipo de circuito pode ter diversos tipos de aplicação. Primeiramente é importante definirmos a categoria em que se encaixam os circuitos propostos e entendermos suas principais características.

Temos em Mark et al. (2010) e em Haeberle e Zengerle (2007), uma base para que se tenha uma compreensão melhor dos tipos de circuitos microfluídicos, e as principais aplicações de cada um. A primeira categorização feita é pelo tipo de mecanismo de funcionamento do dispositivo, como vimos na figura 1. A divisão é feita entre circuitos cujo funcionamento se dá por meio de capilares, por meio da atuação de pressão, por atuação de força centrífuga, por “eletrocinética” e por ondas acústicas.

Dentre os acionados por diferença de pressão, temos o que Mark (2010) chama de “Microfluidic large scale integration”. Nesse tipo de circuito, temos a construção de circuitos com válvulas integradas aos chips, acionadas por intermédio de membranas que, ao serem deformadas, atuam sobre o circuito.

Esse tipo de plataforma surgiu por volta do ano de 1993, com a evolução da construção de microestruturas a partir de materiais como o silício (MARK et al., 2010). Nesse tipo de circuito, temos a utilização da pressão para a deformação da membrana, sendo que essa deformação atua sobre o circuito de alguma forma. Esse tipo de circuito, como apontado por Mark (2010), possui diversas aplicações, como a construção de válvulas (a), bombas (b), misturadores (c), etc. como demonstrado na figura 5.

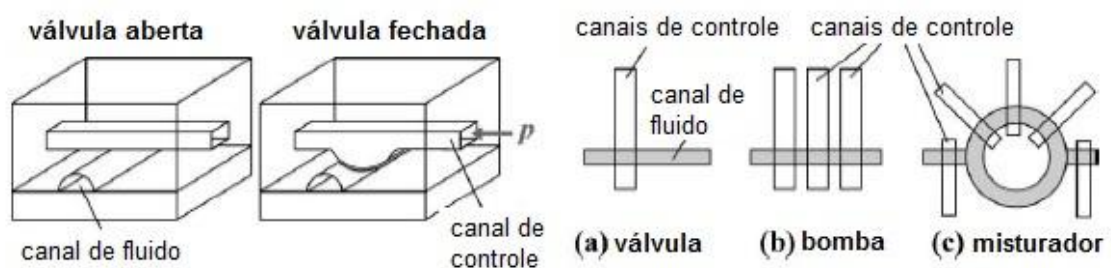


Figura 5 – Aplicações de plataformas “Microfluidic large scale integration” (MARK et al., 2010).

Aplicação deste tipo de circuito foi demonstrada por uma série de autores. Um primeiro exemplo, já citado, é demonstrado pela bomba de Jeong e Konishi (2007a), mostrada na figura 2. Como vemos, o movimento peristáltico da membrana de três câmaras fluídicas atuando de forma controlada pode atuar como uma microbomba, empurrando o fluído do canal posicionado na parte de baixo do sistema. Uma foto do dispositivo desenvolvido por Jeong e Konishi pode ser visto na figura 6.

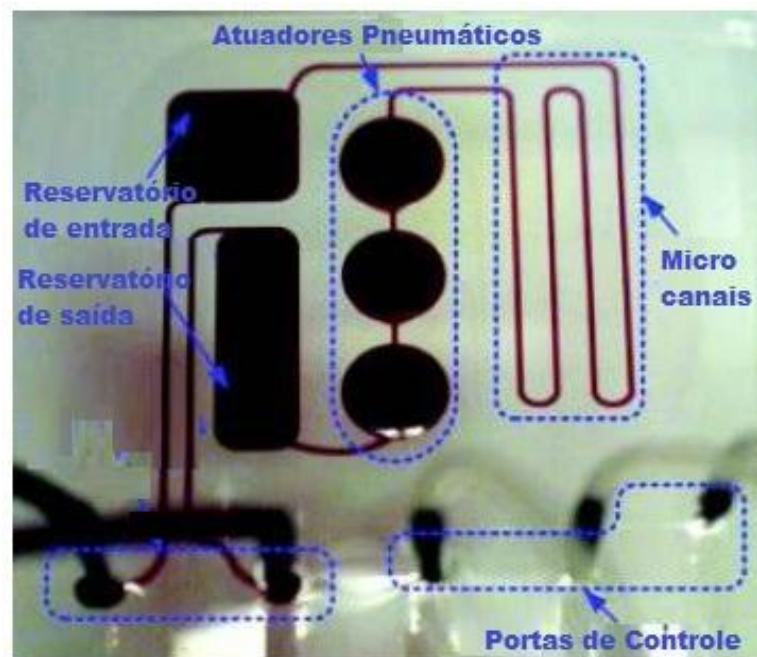


Figura 6 - Bomba microfluídica (JEONG; KONISHI, 2007a).

Outra aplicação é demonstrada por Wang e Lee (2005), com a construção de um chip para fazer diagnóstico, utilizando a mesma concepção de microbombas e tecnologia de sistemas MEMs (Microeletromecânicos). O esquema de funcionamento desse dispositivo pode ser visto na figura 7.

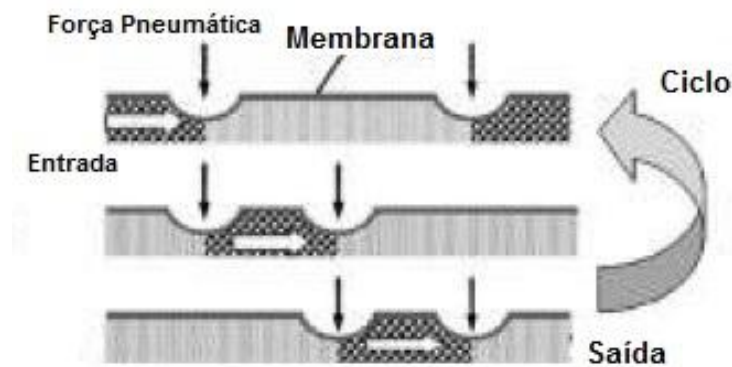


Figura 7 - Dispositivo de diagnóstico construído por Wang e Lee (2005).

O funcionamento de circuitos microfluídicos pneumáticos que conseguem gerar uma lógica digital se dá de maneira semelhante à microbomba utilizada por Jeong e Konishi (2007a) e Wang e Lee (2005). A atuação de um sinal de pressão (positiva ou negativa) faz deslocar uma membrana, o que altera a configuração de um determinado circuito posicionado junto da mesma, gerando um evento que influencia no funcionamento do dispositivo.

Esse tipo de conceito é demonstrado por Henning (2004, 2007) no desenvolvimento de válvulas que possuem funcionamento análogo a transistores do tipo MOSFET. Henning (2004, 2007) cria uma série de válvulas nas quais temos um sinal de entrada, um sinal de saída, e um sinal de controle (sendo que todos os citados são sinais de pressão), e seu funcionamento básico é a passagem do sinal de entrada para a saída, através de alguma relação de pressão entre os sinais de entrada e de controle.

Vemos, por exemplo, uma válvula normalmente aberta (NA) desenvolvida por Henning (2004, 2007), mostrada na figura 8. Nesse modelo, temos que a pressão de entrada, " P_{in} ", passa direto pelo dispositivo para a saída, " P_{out} ", a menos que haja influencia da membrana. O sinal de controle se dá na parte de cima da membrana. No caso de o sinal de controle superar o sinal de entrada, a membrana sofrerá um deslocamento para baixo, cobrindo a passagem da saída.

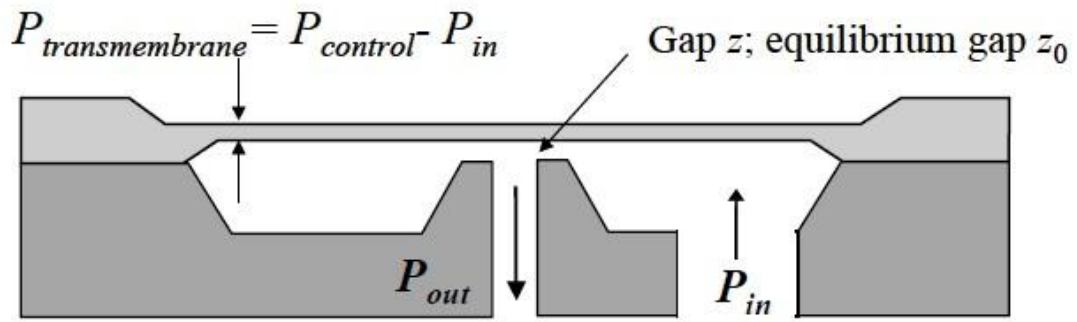


Figura 8 - Válvula NA com acionamento por aplicação de pressão (HENNING, 2007).

Henning (2004, 2007) também projeta válvulas normalmente fechadas (NF). No modelo que pode ser visto na figura 9, o acionamento depende da diferença de pressão entre o sinal de entrada e o sinal de controle. Caso a pressão de entrada supere a pressão de saída, a membrana é deslocada, liberando a passagem de ar para a saída.

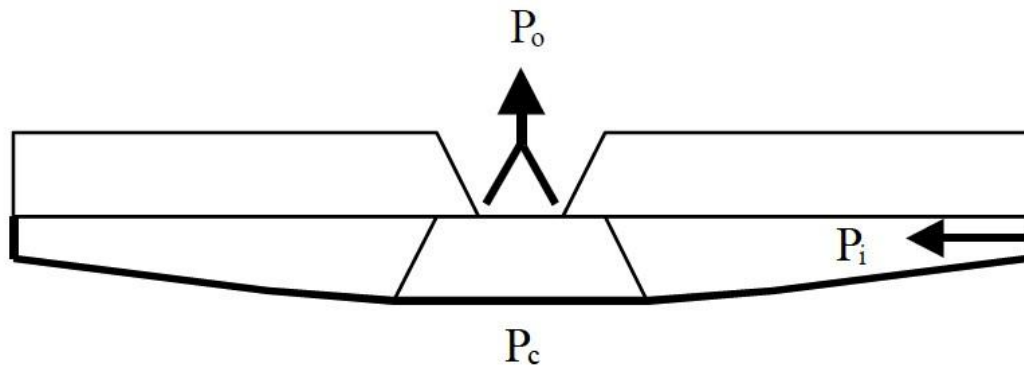


Figura 9 - Válvula NF com acionamento através de $P_i > P_c$ (HENNING, 2007).

Já no modelo da figura 10, temos o caso contrário. Para que haja a passagem da pressão de entrada para a saída, a pressão de controle deve ser maior que a pressão de entrada, deslocando a trava que impede a passagem do sinal de entrada.

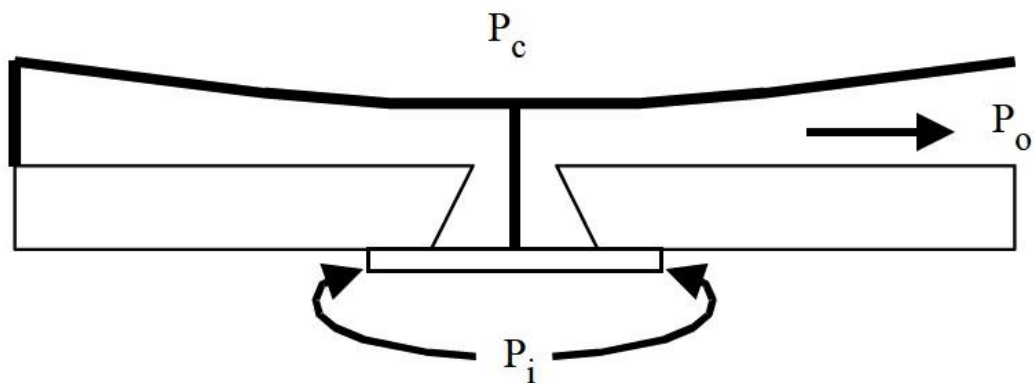


Figura 10 - Válvula NF com acionamento por $P_c > P_i$ (HENNING, 2007).

O trabalho de Henning (2004, 2007) ainda propõe válvulas que implementam lógica mais complexa, utilizando mais de uma das válvulas propostas construídas em série, além de fazer a modelagem do funcionamento dessas válvulas.

Para o desenvolvimento de seu trabalho, Henning (2004, 2007) se utiliza de conceitos já trabalhados por Takao; Ishida e Sawada (2002) e Takao e Ishida (2003) para a construção de válvulas pneumáticas que atuem de forma análoga a transistores do tipo MOSFET.

Takao; Ishida e Sawada (2002) e Takao e Ishida (2003) realizam projeto e construção de válvulas com essa proposta de funcionamento. Os dispositivos em questão não se utilizam apenas de uma membrana elástica por entre as placas, mas de um substrato de silício fabricado por intermédio de corrosão (*wet etching*), já formando a região que será deformada, bem como canais para a passagem dos sinais de pressão, como vemos nas figuras 4 e 11.

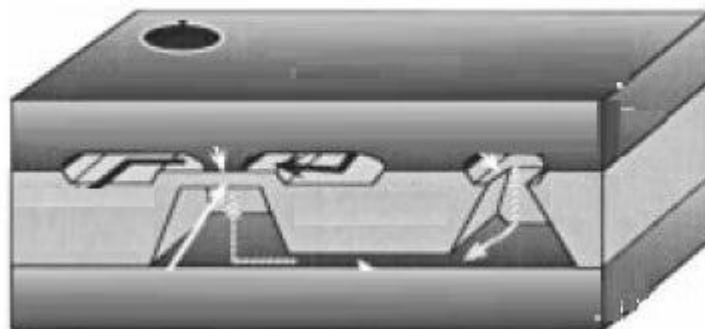


Figura 11 - Válvula análoga a P-MOSFET (TAKAO; ISHIDA; SAWADA, 2002).

O funcionamento da válvula de Takao, Ishida e Sawada (2002) se dá de forma diferente do que é proposto por Henning (2004, 2007), principalmente devido à natureza do sinal de acionamento da válvula. Ao contrário do que é visto em Henning (2004, 2007), nas válvulas de Takao, Ishida e Sawada (2002) e Takao e Ishida (2003) o sinal de controle é dado por uma pressão negativa para o deslocamento da membrana.

Nesses elementos, a pressão do ar é análoga à tensão dos circuitos eletrônicos, bem como a vazão de ar é análoga à corrente. Como estaremos lidando com circuitos digitais, fica já estabelecido que o sinal lógico “1” é dado quando temos uma pressão negativa, enquanto o sinal lógico “0” representa pressão positiva, ou pressão atmosférica.

Assim, como vemos pela figura 12, o diafragma móvel da válvula é deslocado para baixo com a aplicação de uma pressão negativa no sinal de controle, permitindo, então, a passagem de ar da fonte para o dreno. Podemos chamar a câmara na qual é aplicado o sinal negativo de “câmara de deslocamento”.

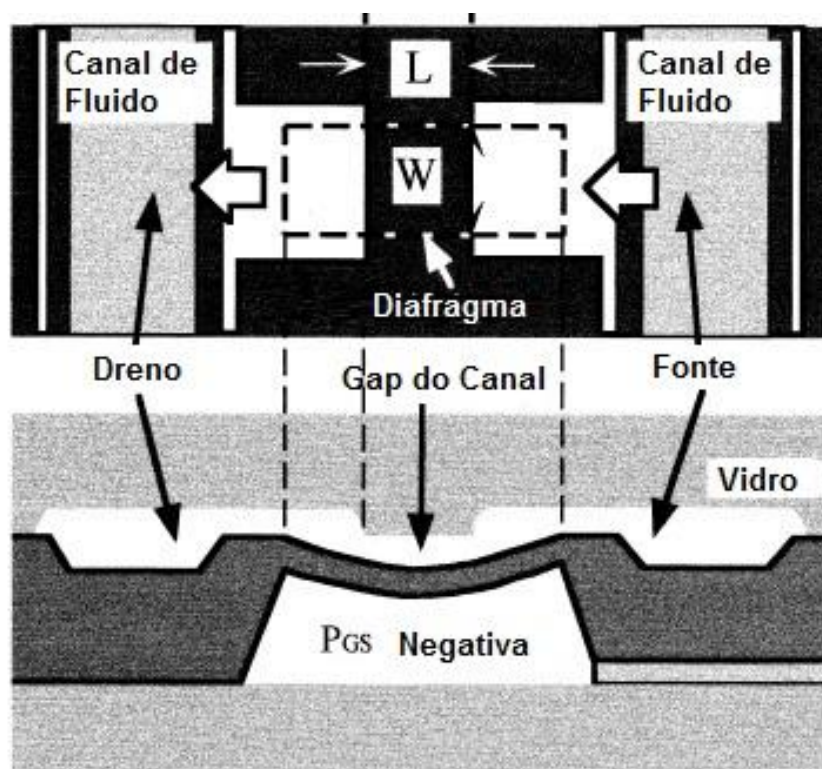


Figura 12 - Funcionamento da válvula análoga a P-MOSFET (TAKAO; ISHIDA, 2003).

As válvulas construídas por Takao e Ishida (2003) possuem dimensão da ordem de micrometros, confirmando o que é visto em Mark et al. (2010), que diz que um único circuito pode acomodar milhares dessas válvulas.

Takao; Ishida e Sawada (2002) construíram e testaram as válvulas propostas, fazendo um levantamento de valores de pressão e fluxo de ar em determinados pontos dos circuitos. O circuito construído pode ser visto na figura 13.

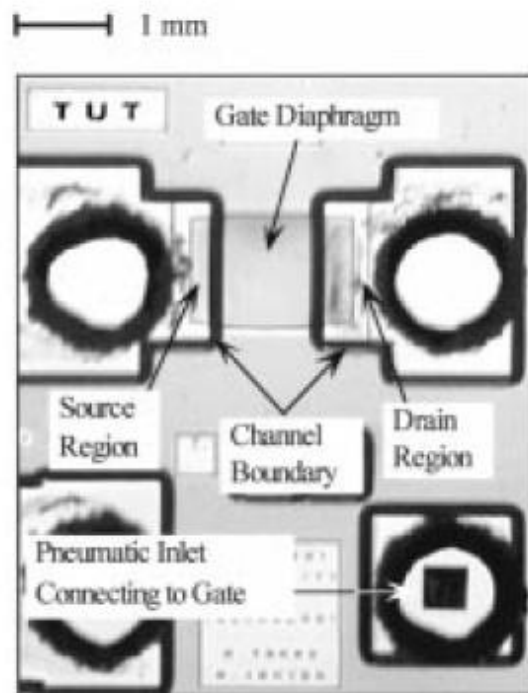


Figura 13 - Dispositivo construído por Takao; Ishida e Sawada (2002).

Outros dispositivos foram propostos por Takao e Ishida (2003) utilizando a mesma tecnologia. Elementos passivos de circuitos eletrônicos, como resistores e capacitores, que podem ser utilizados para a execução de diversos tipos de aplicação (como temporizadores), podem ser construídos através de métodos semelhantes. Os projetos desses elementos podem ser visto na figura 14.

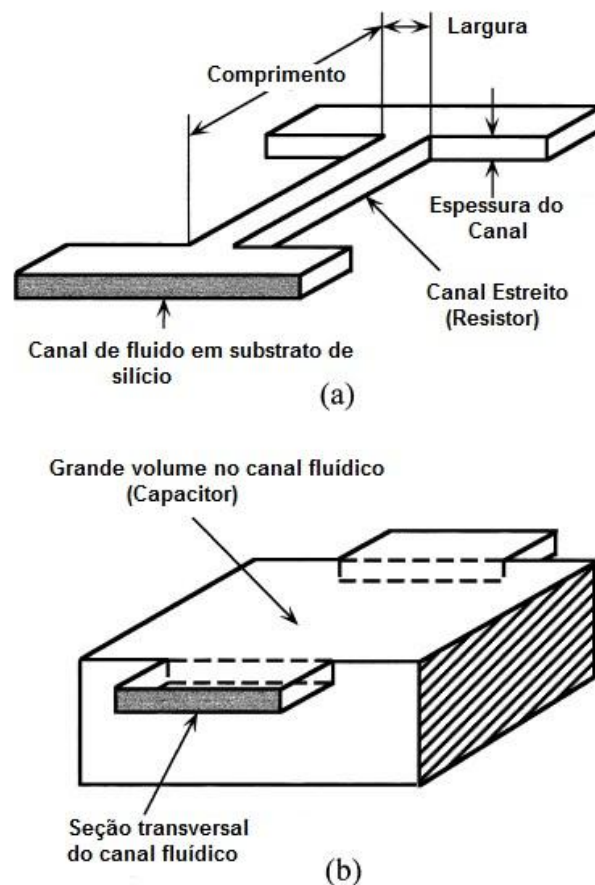


Figura 14 - Elementos pneumáticos análogos a resistor (a) e capacitor (b) (TAKAO; ISHIDA, 2003).

Assim, teremos a implementação de um dispositivo análogo a um resistor (a) a partir da confecção de canais de pequena espessura e profundidade, porém de grande comprimento. A passagem de ar é “dificultada”, gerando uma queda de pressão na saída. Já o elemento análogo ao capacitor (b), temos a implementação de um reservatório, no qual a pressão, inicialmente em zero, aumenta gradativamente até que se iguale à pressão aplicada.

A partir da confecção desses elementos (MOSFET, resistor e capacitor), uma grande quantidade de circuitos lógicos pode ser implementada, podendo se utilizar do conhecimento prévio em eletrônica, já que seu funcionamento será dado de forma análoga.

Utilizando esses conceitos alguns autores projetaram e construíram circuitos implementando lógicas digitais, desde as mais simples até lógicas que desenvolvem operações bastante complexas. Exemplos disso são os trabalhos apresentados por Grover et al. (2003, 2006, 2007), bem como o trabalho apresentado por Rhee e Burns (2009).

Rhee e Burns (2009) desenvolveram dispositivos utilizando de três camadas de PDMS (Dimetil polissiloxano), seguindo as ideias mostradas anteriormente. As camadas são fabricadas utilizando técnicas de litografia. Nesses circuitos o vácuo produzido é de aproximadamente -71kPa, e a pressão positiva utilizada foram aberturas para a atmosfera.

Rhee e Burns (2009) partem da construção de uma válvula, como mostrado na figura 15, para a construção de diversos circuitos lógicos. Além da válvula análoga ao transistor, o autor também se utiliza do conceito de resistência mostrado em Takao e Ishida (2003).

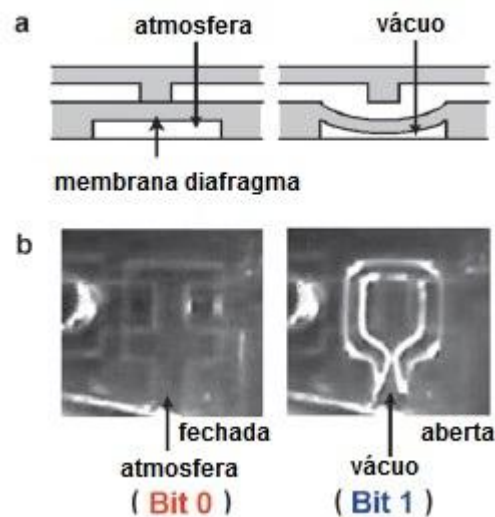


Figura 15 - Válvula NF à vácuo construída por Rhee e Burns (2009).

Vemos, inicialmente, a implementação de um inversor digital, ou seja, um dispositivo no qual aplicamos um sinal lógico “0” na entrada, nos dará um sinal “1” na saída, e vice-versa. Temos na figura 16, a representação elétrica da válvula (a e b), o esquema utilizado pelo autor para representar o circuito pneumático (c e d), e as fotos do circuito simulado (e e f), tanto da aplicação de um sinal de “0” (pressão positiva, representado pela área clara), quanto pelo sinal de “1” (pressão negativa, representado pela área escura).

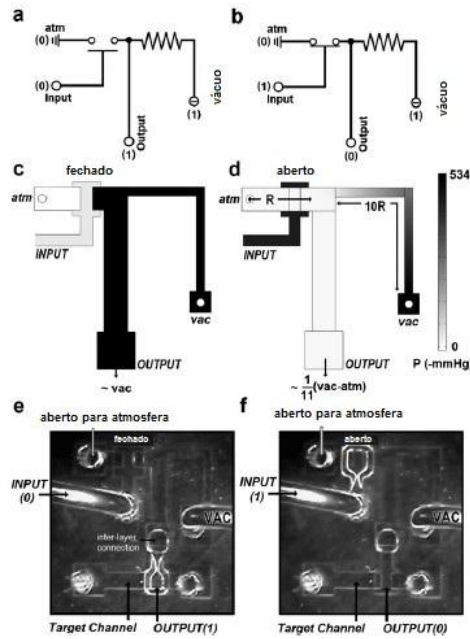


Figura 16 - Inversor pneumático (RHEE; BURNS, 2009).

A partir daí o autor desenvolve diversos circuitos lógicos utilizando os mesmos métodos. Temos a implementação de circuitos lógicos simples, como vemos na figura 17 (NAND, buffer e XOR), bem como circuitos lógicos de maior complexidade, como um multiplexador, visto na figura 18.

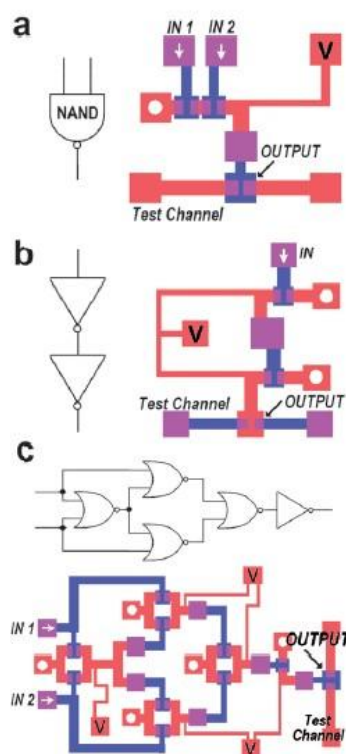


Figura 17 - Circuitos lógicos pneumáticos propostos por Rhee e Burns (2009).

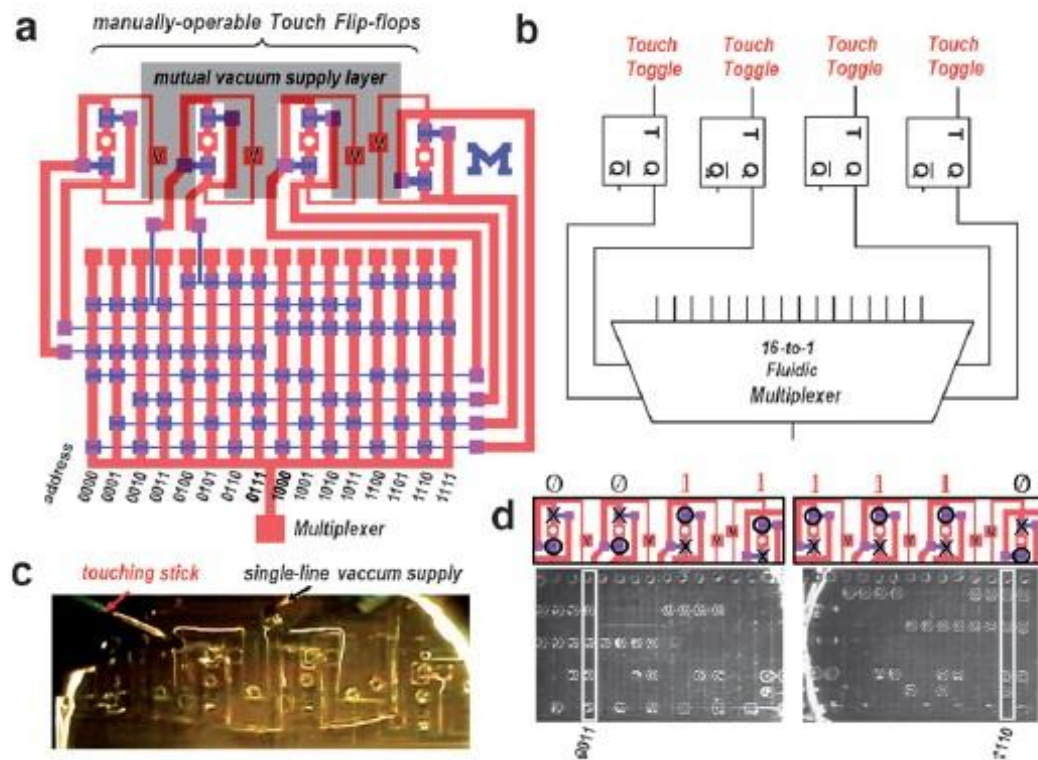


Figura 18 - Multiplexador pneumático construído por Rhee e Burns (2009).

Semelhante a Rhee e Burns (2009), o trabalho desenvolvido por Grover et al. (2003, 2006, 2007), desenvolve, a partir da ideia de uma válvula análoga ao MOSFET tipo p, uma série de circuitos lógicos que desenvolvem uma série de aplicações.

Grover et al. (2003) publicou um trabalho de desenvolvimento de válvulas e bombas para circuitos microfluídicos, com o objetivo de definir a resposta da válvula para diferentes dimensões ou formatos das mesmas. Os circuitos, construídos com vidro por métodos de ataque químico em placas de vidro, com membranas elásticas de PDMS, podem ser de duas ou três camadas, com diferentes formas, como podemos ver na figura 19.

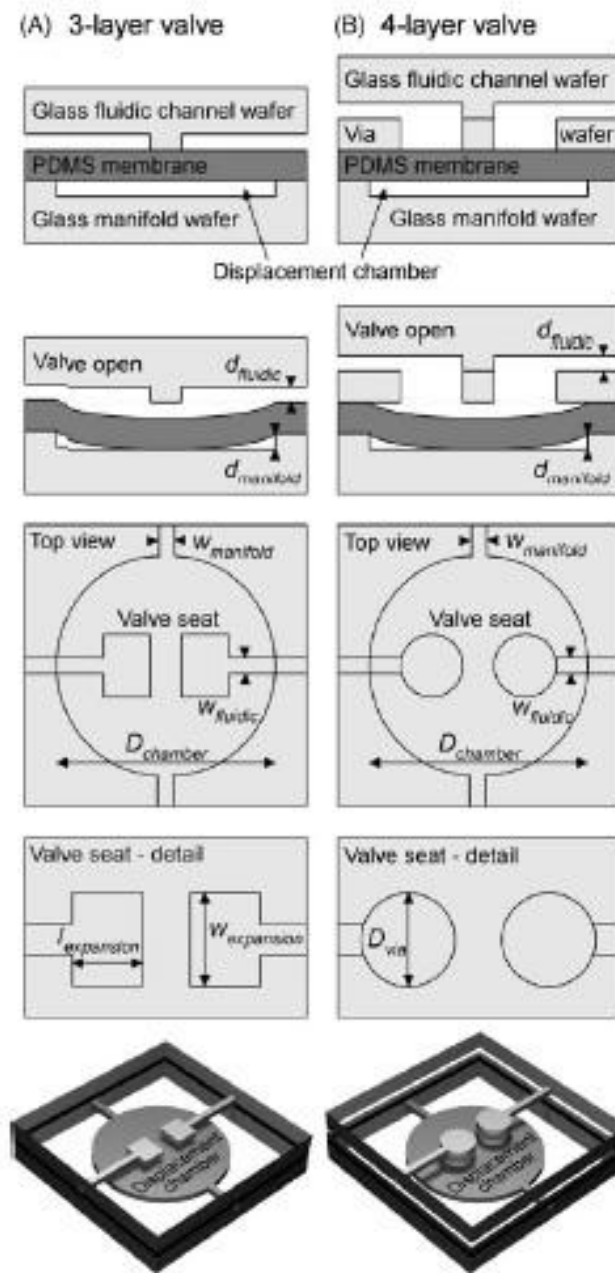


Figura 19 - Configuração de válvulas NF à vácuo (GROVER et al., 2006).

A partir daí, os autores foram capazes de desenvolver um trabalho de aplicação dessas válvulas em circuitos lógicos. Num trabalho publicado posteriormente (GROVER et al., 2006), o autor testa circuitos lógicos como os vistos na figura 20, a partir de pulsos rápidos de pressão (de 120ms), sendo o sinal de pressão negativa (vácuo) usado de -85kPa e o sinal de pressão positiva de 40kPa (além de um sinal neutro, no qual o pino não é conectado a nada). Vemos na figura, em A o esquema das duas placas do circuito e a montagem do mesmo, e em B o esquema do circuito já montado com os sinais de entrada e saída.

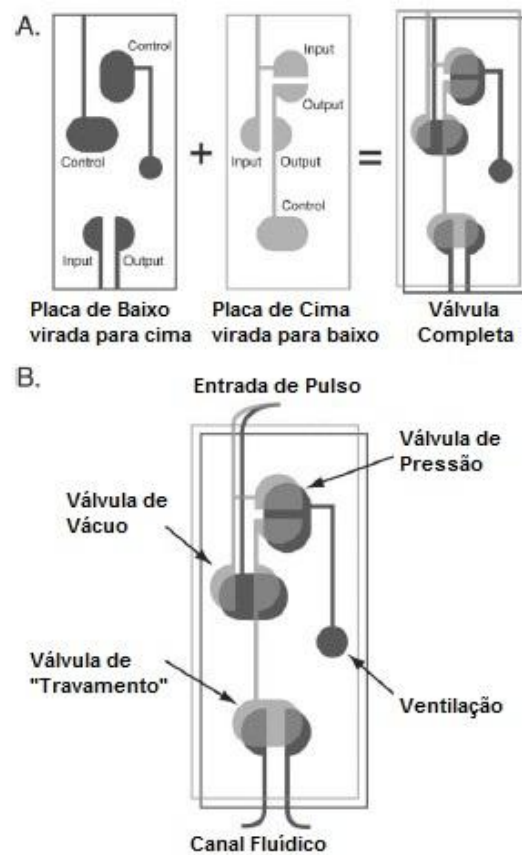


Figura 20 - Circuito lógico pneumático de teste (GROVER et al., 2006).

A partir dessas válvulas, os autores desenvolveram uma sequência lógica para a aplicação de sinais de pressão (negativa e positiva) para se observar o funcionamento dos circuitos. Uma lógica de funcionamento demonstrada pelo autor pode ser vista na figura 21. Além disso, o autor implementa um demultiplexador, que pode ser visto na figura 22.

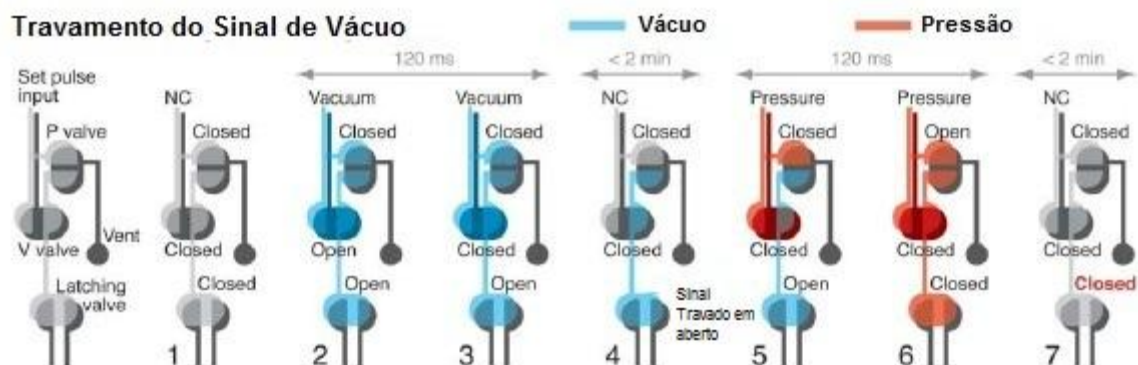


Figura 21 - Sequência lógica executada pelo circuito de Grover et al. (2006).

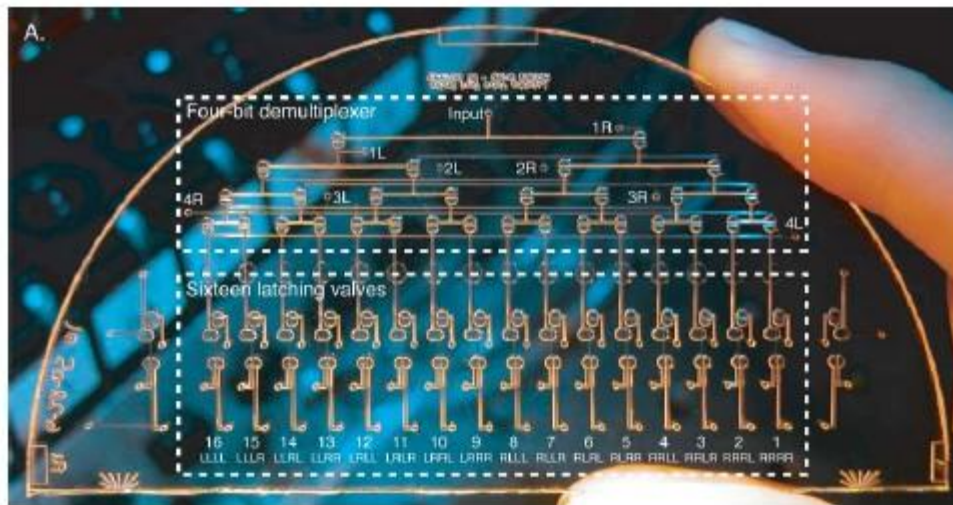


Figura 22 - Demultiplexador pneumático (GROVER et al., 2006).

Jensen; Grover e Mathies (2007) continuam a desenvolver o conceito de válvula análoga ao transistor tipo p-MOSFET. Temos a demonstração clara do funcionamento da válvula proposta (a), bem como sua analogia com circuitos eletrônicos (b) e a simbologia adotada (c), como visto na figura 23.

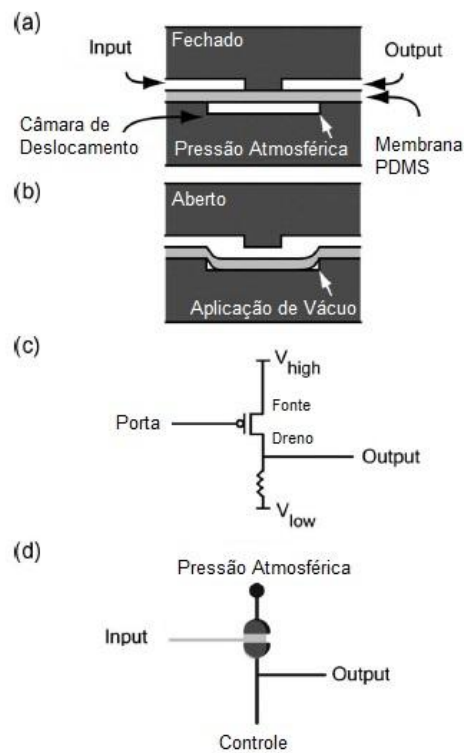


Figura 23 – Esquema de Funcionamento de válvula NF à vácuo (JENSEN; GROVER; MATHIES, 2007).

Nesse trabalho, os autores desenvolvem circuitos lógicos digitais, partindo de circuitos simples, como vemos na figura 24, até um somador digital de 8 bits, cujo projeto e resultados são demonstrados pelas figuras 25 e 26, utilizando os mesmos métodos de construção já vistos anteriormente. Diferentemente do trabalho anterior, os autores simulam apenas circuitos digitais, ou seja, com um sinal de nível lógico “1” e um sinal de nível lógico “0”, sendo que os valores adotados são -87kPa e +6kPa, respectivamente, não havendo um terceiro sinal de pressão positiva.

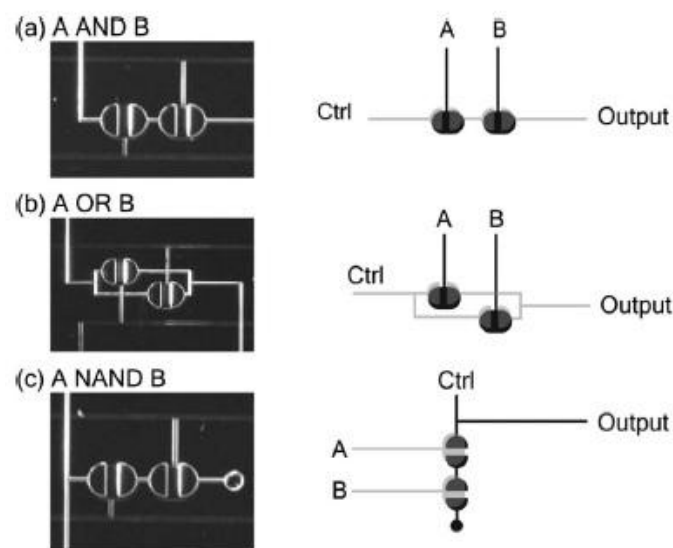


Figura 24 - Circuitos lógicos pneumáticos (JENSEN; GROVER; MATHIES, 2007).

Como vemos, Jensen, Grover e Mathies (2007) demonstram a construção de circuitos lógicos simples a partir dessas válvulas. Porém, a construção de grandes circuitos provém da construção de circuitos simples. Assim, os autores passam a desenvolver circuitos de complexidade cada vez maior, como circuitos “XOR” (conhecido com “OU exclusivo”, onde a saída é “1” quando uma, e apenas uma, das entradas for “1”), um somador binário simples e, por fim, o somador de 8 bits, mostrado na figura 25.

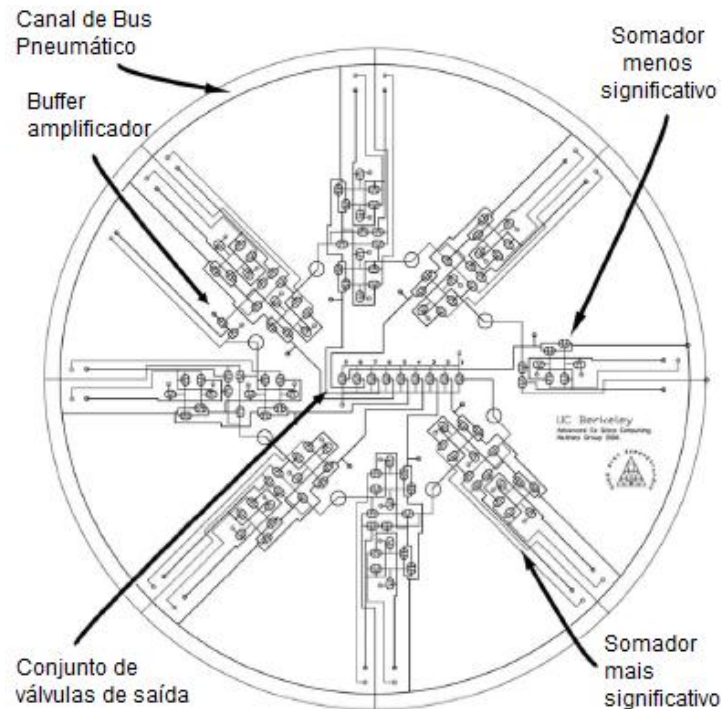


Figura 25 - Somador pneumático de 8 bits (JENSEN; GROVER; MATHIES, 2007).

	11111111	00000001	00000000	10101010
11111111	1 1 1 1 1 1 1 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 1 0 1 0 1 0
01111111	0 1 1 1 1 1 1 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 1 1 0 1 0 1 0
00111111	0 0 1 1 1 1 1 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 1 0 1 0
01000001	0 1 0 0 0 0 0 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 1 0 0 0 0 0 1
00100011	0 0 1 0 0 0 1 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 0 0 0 1 1
00000001	0 0 0 0 0 0 0 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 1
11001010	1 1 0 0 1 0 1 0	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 0 0 1 0 1 0
11000010	1 1 0 0 0 0 1 0	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 0 0 0 0 1 0
01010101	0 1 0 1 0 1 0 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 1 0 1 0 1 0 1
10111100	1 0 1 1 1 1 0 0	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 1 1 1 1 0 0
11100011	1 1 1 0 0 0 1 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 1 0 0 0 1 1
11111110	1 1 1 1 1 1 1 0	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 1 1 1 1 1 0
00111110	0 0 1 1 1 1 1 0	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 1 1 1 1 1 0
10111011	1 0 1 1 1 0 1 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 1 1 1 0 1 1
10110011	1 0 1 1 0 0 1 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 1 1 0 0 1 1
00011010	0 0 0 1 1 0 1 0	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 1 1 0 1 0
11100110	1 1 1 0 0 1 1 0	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 1 0 0 1 1 0
01000101	0 1 0 0 0 1 0 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 1 0 0 0 1 0 1
11010101	1 1 0 1 0 1 0 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 0 1 0 1 0 1
00000101	0 0 0 0 0 1 0 1	0	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 1 0 1

Figura 26 - Resultados obtidos pelo somador pneumático de 8 bits (JENSEN; GROVER; MATHIES, 2007).

A figura 26 mostra o sinal de saída obtido quando somado o bit da linha com o bit da coluna. Nesse caso, vemos em destaque os bits que estão no nível lógico “1”.

Dentre os principais pontos destacados pelo autor, para o desenvolvimento desse trabalho deve-se atentar para a utilização de sinais de pressão negativas de

magnitudes diferentes para o controle e sinal de entrada das válvulas. Como estamos lidando com circuitos digitais, com o sinal de “1” sendo o sinal de entrada de pressão negativa, corremos o risco de, ao aplicarmos a mesma pressão negativa em ambos os lados da membrana, ela fique na posição inicial. Assim sendo, ao aplicarmos -87kPa na câmara de deslocamento, e tentarmos passar um sinal de mesma magnitude do canal de entrada para o canal de saída, teremos que a membrana pode tentar retornar à sua posição inicial, mesmo com um sinal lógico de “1” na câmara de deslocamento. Para que isso não ocorra, é sugerido que se utilize sinais de diferentes magnitudes para a câmara de deslocamento e o sinal de entrada.

Outro problema apontado, a perda de carga ao longo do circuito, levou ao desenvolvimento de buffers amplificadores. Esse elemento permite que o sinal de menor intensidade seja usado para a atuação de uma válvula que permite a passagem do sinal vindo de uma nova fonte de vácuo, com maior intensidade.

Vale destacar também que sempre que nos utilizamos de sinais de pressão, é necessário que o sinal lógico “0” seja a aplicação de uma pressão positiva, e não apenas o fechamento da passagem do sinal, já que, caso apenas se feche a passagem do sinal, a pressão no interior da câmara seguirá a mesma.

O trabalho desenvolvido a seguir acompanha, principalmente, a linha de pesquisa de Grover et al. (2003, 2006, 2007), baseando-se na válvula construída por esse autor para o desenvolvimento de circuitos lógicos. Os métodos de construção e materiais utilizados, entretanto, devem ser alterados de forma a se adaptar aos objetivos desse projeto em específico, o que será visto a seguir.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos visados, definiu-se que o projeto se daria em 2 etapas. Primeiramente, a partir do material estudado, a proposição das válvulas que seriam projetadas e construídas e o projeto de circuitos lógicos para a demonstração da aplicabilidade e do alcance desse tipo de dispositivo. Em seguida, o projeto das válvulas e circuitos em CAD para sua construção, montagem e testes, para verificar a funcionalidade do que foi projetado e para analisar e aprimorar o método de projeto e construção.

Para a primeira etapa, foi utilizada a simbologia de circuitos pneumáticos. Escolhendo-se que tipos de válvulas seriam construídos, pôde-se aplicar essa simbologia para representar essas válvulas, e utilizar dessa representação para que se pudessem desenhar os circuitos propostos. O projeto desses circuitos não visa necessariamente a construção dos mesmos, mas sim mostrar como esse tipo de circuito pode ser aplicado, bem como a complexidade que pode-se alcançar a partir deles.

Na segunda etapa dá-se início à definição dos procedimentos a serem utilizados no projeto e construção das válvulas e circuitos escolhidos. Para isso, mantém-se um contato com professores e técnicos responsáveis por esse tipo de projeto.

Para o projeto do circuito em CAD foi utilizado o software AutoDesk Inventor®, a partir de uma licença estudantil. A proposta era que o circuito fosse construído a partir de materiais e métodos de fácil acesso. Portanto, os circuitos foram construídos a partir de placas de acrílico usinadas utilizando-se as máquinas-ferramenta da própria Escola Politécnica (com o auxílio de seus técnicos). Para a aplicação de sinais de vácuo (ou de pressão positiva), foi proposta inicialmente a utilização de seringas comuns, munidas de algum tipo de dispositivo de travamento no êmbolo, além da utilização de válvulas para que se pudesse controlar o acesso do ar dentro da seringa com os canais do circuito em si. Caso a utilização de seringas não cumprisse os requisitos necessários, a próxima alternativa seria a utilização de pequenos compressores de ar (como os utilizados em refrigeradores), para a aplicação de pressão negativa.

Para a membrana, como material de mais fácil acesso, inicialmente foram utilizadas bexigas de látex. Foram feitos alguns testes com esse material, para que se pudesse verificar se ele conseguiria atender aos requisitos, fazendo com que as válvulas funcionassem como esperado.

Os demais dispositivos utilizados na construção dos circuitos (tubulação, elementos de fixação, etc.), foram definidos conforme reuniões com os professores e técnicos responsáveis, de forma a facilitar a construção e montagem das peças.

A construção dos circuitos se iniciou com válvulas simples, que foram a base dos elementos de circuitos a serem construídos. A partir dos testes dessa válvula, bem como da análise da construção e montagem, foi possível a verificação dos pontos fortes e fracos desse projeto. A partir desses pontos, pôde-se aprimorar os métodos e materiais utilizados, para que os circuitos seguintes não sofressem com os mesmos problemas que os anteriores.

A quantidade de circuitos projetados e construídos foi condicionada pelo tempo disponível para a execução do projeto.

4. DESENVOLVIMENTO

Antes de dar-se início ao desenvolvimento do trabalho, é necessário entender melhor o funcionamento de um transistor do tipo P-MOSFET, para que seja mais bem aplicado o conceito da analogia das válvulas a esse elemento eletrônico.

4.1 Transistor do tipo MOSFET

O Transistor de efeito de campo, MOSFET, é um dispositivo de três terminais. O princípio básico desse tipo de dispositivo é o uso de uma tensão entre dois terminais para controlar o fluxo de corrente no terceiro terminal.

A figura 27 mostra a estrutura física de um MOSFET tipo enriquecimento canal n , fabricado sobre um substrato tipo p . O MOSFET será tratado como um dispositivo de três terminais: porta (G), fonte (S) e o dreno (D), sendo que temos que uma tensão aplicada na porta controla o fluxo de corrente entre a fonte e o dreno.

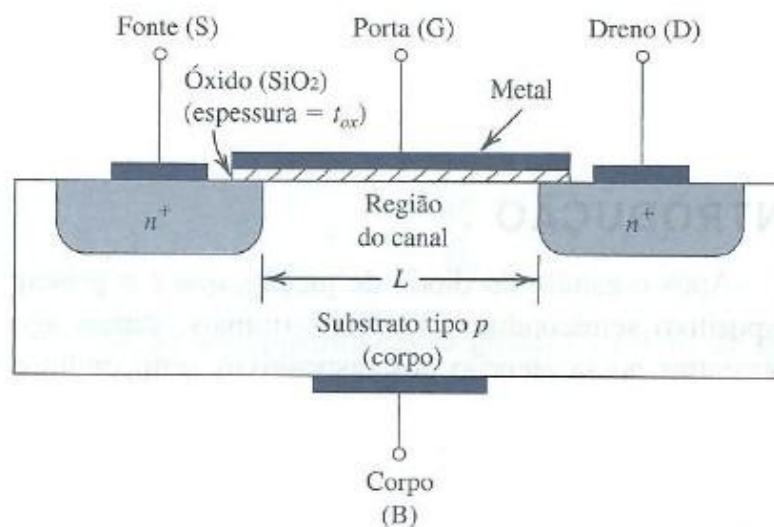


Figura 27 - Estrutura física do transistor MOSFET (SEDRA; SMITH, 2007).

Primeiro, temos a criação de um canal para a circulação da corrente no dispositivo. Aterrando a fonte e o dreno e aplicando uma fonte de tensão positiva na

porta, temos o aparecimento de uma tensão V_{GS} entre porta e fonte. A tensão positiva na porta faz com que as lacunas livres sejam repelidas da região do substrato sob a porta, deixando uma região depletada de portadores, cheios de ligações covalentes de cargas negativas. Assim, se aplicarmos uma tensão entre o dreno e a fonte, V_{DS} , uma corrente circulará por essa região induzida, ocorrendo um transporte de elétrons. No MOSFET tipo n , a corrente sempre fluirá do dreno pra fonte. O valor de i_D dependerá de V_{GS} , considerando que o dessa diferença de potencial depende a densidade de elétrons passando pelo canal.

Vemos no gráfico da figura 28, a relação entre a tensão na porta (V_{DS}) e a corrente que passa entre dreno e fonte (i_D). Na figura, V_t representa a tensão de limiar, valor de mínimo de V_{GS} para a criação de um canal de condução. Note que há uma região de saturação, na qual dizemos que ocorre a “estrangulação” no canal de condução. No gráfico consideramos um valor fixo de V_{GS} .

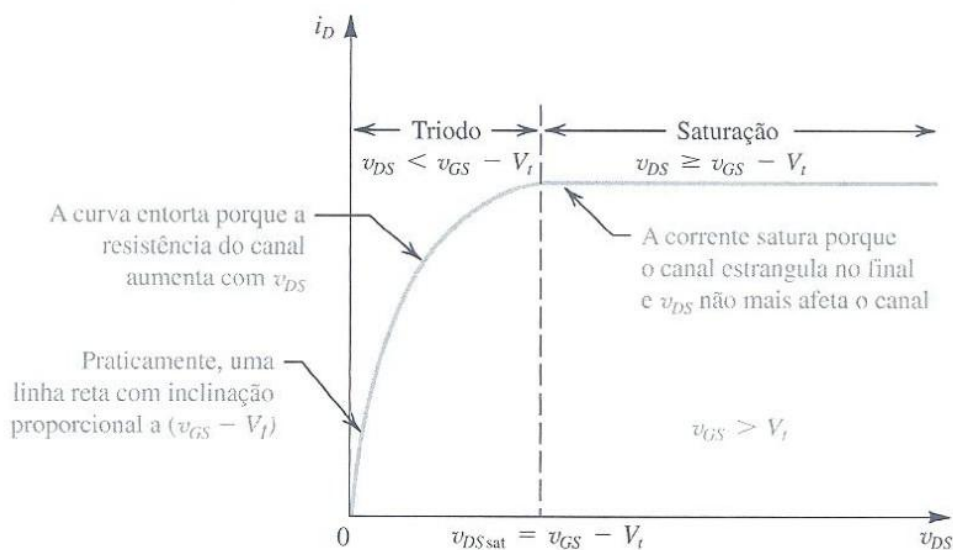


Figura 28 - Gráfico de corrente de dreno i_D versus tensão dreno-fonte V_{DS} , com V_{GS} fixo, num transistor NMOS (SEDRA; SMITH, 2007).

Já um dispositivo MOSFET de canal tipo p funciona de mesmo modo que o tipo n , exceto que as tensões V_{GS} , V_{DS} e V_T são negativas, e a corrente i_D entra pelo terminal da fonte e sai pelo terminal do dreno. O símbolo do transistor MOSFET tipo p é mostrado na figura 29, com a seta apontando o sentido normal do fluxo da corrente.

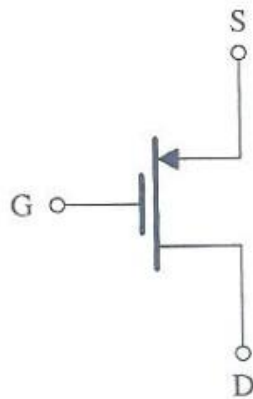


Figura 29 - Símbolo do transistor P-MOSFET.

Quanto à aplicação em circuitos digitais, temos o transistor MOSFET pode ser aplicado como chave. A chave está ligada quando aplicamos tensão, permitindo a passagem de corrente, deixando a saída com nível lógico “1”.

4.2 Definição das características do projeto

Para o desenvolvimento desse trabalho, inicialmente é necessária a definição dos requisitos a que se deve obedecer, além de um objetivo claro a que se deseja atingir com o mesmo. Como visto na motivação, o circuito a ser projetado e construído tem como principal objetivo a implementação de uma lógica digital sem a utilização de energia elétrica.

As principais características que se deseja mostrar com o circuito projetado são a funcionalidade da válvula atuante como P-MOSFET e a possibilidade de construção de circuitos mais complexos com as mesmas. Para isso, é necessário mostrar que a saída de uma das válvulas deve servir de comando para o acionamento de outra.

A construção impõe grande limitação ao circuito a ser projetado. Nesse trabalho propõe-se a construção de elementos de circuito de forma simples, utilizando apenas as placas de acrílico usinadas e as membranas.

Na revisão bibliográfica temos um levantamento de diversos tipos de válvula, com os mais diversos tipos de acionamento e aplicações. Como devemos utilizar

apenas métodos simples e não custosos, de fácil acesso, se pretende a utilização de válvulas nas quais a câmara de deslocamento seja usinada na própria placa do circuito, e o mecanismo de deslocamento do diafragma seja implementado somente por uma membrana elástica, não sendo necessário nenhum tipo de usinagem na mesma.

A partir do levantamento realizado, fica claro que 2 tipos de válvula possuem construção mais simples, e atendem aos requisitos necessários: Válvulas normalmente fechadas (NF), acionadas por intermédio de um sinal de vácuo, como as mostradas por Jensen; Grover e Mathies (2007) e válvulas normalmente abertas (NA), acionadas por intermédio de um sinal de pressão, como exposto em Henning (2004, 2007). Assim, os circuitos projetados poderão utilizar ambas.

Além dessas válvulas, os dispositivos “passivos” propostos por Takao e Ishida (2003) podem ser facilmente construídos e, conseqüentemente, utilizados. Esses elementos (resistores e capacitores) podem ser aplicados para os mais diversos tipos de aplicação, como o de temporizadores análogos a temporizadores eletrônicos RC, complementando os circuitos a serem projetados.

O projeto foi realizado em duas etapas. Numa primeira etapa temos o projeto lógico dos circuitos, ou seja, foram montados os desenhos lógicos dos circuitos a serem construídos posteriormente. A segunda etapa foi o projeto dos protótipos a serem construídos e, conforme os resultados obtidos, a melhoria nos processos de projeto e fabricação dos mesmos.

4.3 Projeto de Circuitos Lógicos

Para facilitar o projeto dos circuitos, e o entendimento dos mesmos, faz-se necessária a utilização de uma linguagem mais objetiva. Assim sendo, os circuitos a serem projetados terão por base a teoria de circuitos pneumáticos. Deve-se, portanto, aplicar essa simbologia para representar as válvulas propostas. Na figura 30, temos a representação das válvulas NF à vácuo e NA à pressão positiva.

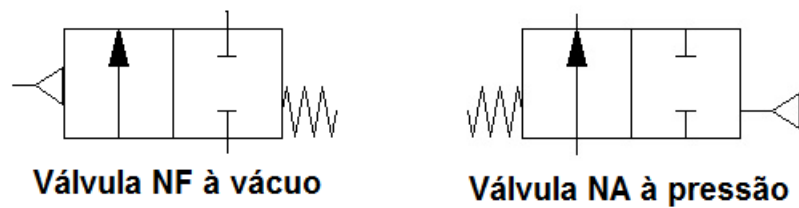


Figura 30 - Simbologia adotada para válvulas propostas.

As válvulas representadas são válvulas de 2 estados possíveis e apenas uma via de passagem de ar. O estado em que as vias de entrada e saída estão ligadas, é aquele que a válvula mantém quando não influenciada por nenhum agente externo. Vemos, portanto, que a válvula NF possui seu estado de repouso com o bloqueio da passagem do sinal de entrada, e na válvula NA, o estado padrão permite essa passagem.

A aplicação do sinal está representada pelo triângulo. O triângulo com a base apontando para a face da válvula é a representação do acionamento por intermédio de sinal de vácuo. Quando a ponta está virada para o dispositivo, temos a representação de um sinal de pressão positiva. A membrana é representada pela mola, já que, quando não há influência do sinal, ela mantém o circuito em posição de repouso.

Outro elemento importante a ser representado é o temporizador. Baseado na analogia de circuitos eletrônicos, podemos ver a construção de um temporizador utilizando-se de um resistor e um capacitor, os chamados “temporizadores RC”. Analogamente, com os elementos propostos por Takao e Ishida (2003), podemos construir temporizadores pneumáticos. Esses temporizadores serão representados pelo símbolo de temporizadores pneumáticos, visto na figura 31.

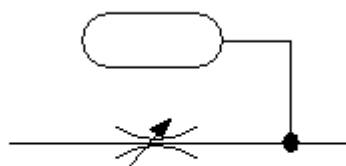


Figura 31 - Símbolo de temporizador pneumático.

Essa simbologia representa uma perda de carga e um acumulador (funções que serão executadas pelo resistor e capacitor, respectivamente), através do qual teremos um aumento gradativo de pressão, até atingirmos a pressão necessária para o acionamento das válvulas.

Definida a simbologia a ser adotada, podemos passar ao projeto de circuitos. Para o entendimento da aplicabilidade desse tipo de circuito e para a melhor seleção do que deve ser construído para mostrar as principais características desse tipo de projeto, alguns critérios para o projeto devem ser estabelecidos.

Propõe-se, inicialmente, a construção de circuitos lógicos em que o único sinal de acionamento da válvula seja o vácuo, afim de que os circuitos demonstrados atuem como circuitos digitais, de lógicas binárias (apenas com 2 níveis lógicos, “0” e “1”). Como se deseja analisar o funcionamento dos mesmos para uso geral, dá-se preferência a circuitos que sejam cíclicos e, se possível, executem os ciclos continuamente sem ação externa.

Os circuitos são projetados sempre de forma a mostrar a resposta num sinal de saída. Existem várias formas de se construir atuadores pneumáticos simples que podem responder a esse sinal. Um exemplo pode ser visto em Wang e Lee (2005). Considerando a saída de uma pressão positiva para a atmosfera, a colocação de um pequeno pedaço de papel na saída já demonstraria a saída do sinal de pressão devido a sua movimentação. Se considerarmos a saída como uma pressão negativa, o mesmo princípio utilizado nas membranas de acionamento das válvulas pode ser utilizado para demonstrar que o sinal de vácuo está presente no canal de saída.

Partindo dessa premissa, e considerando os sinais de vácuo representados pela letra “V” e os sinais de pressão positiva representados pela letra “P”, projetaram-se os seguintes circuitos:

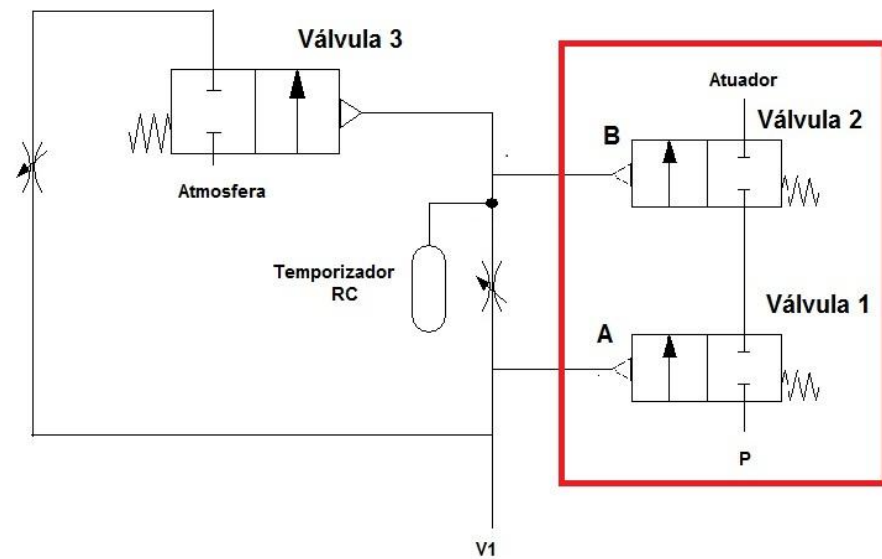


Figura 32 - Circuito AND pneumático cíclico.

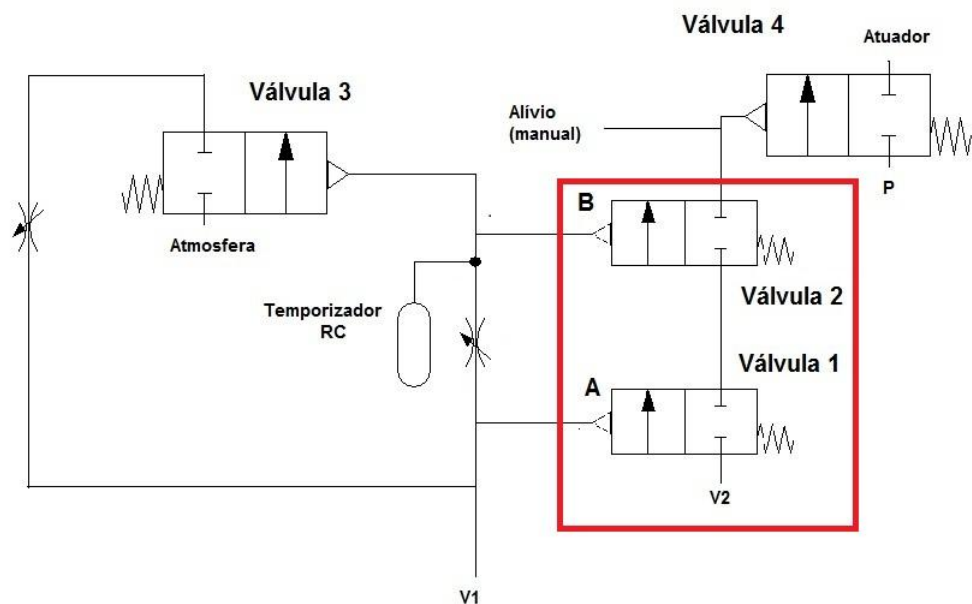


Figura 33 - Circuito AND pneumático cíclico com atuação por válvula externa.

Vemos nas figuras 32 e 33 a implementação de um AND lógico (representado pela área destacada em vermelho, enquanto os demais elementos tem por objetivo a geração dos sinais de entrada). Num circuito lógico AND, ou “E”, a saída da lógica será “1” quando todos os sinais de entrada também forem “1”. A tabela verdade de um circuito lógico AND de 2 entradas (E1 e E2) e saída S pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1 – Tabela verdade de circuito AND.

E1	E2	S
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

No circuito da figura 32 ambos os sinais provêm da mesma entrada V1, porém a atuação deles não se dá de forma simultânea devido ao temporizador e ao alívio implementados. Assim, o sinal de V1 atua na válvula 1 para, depois do tempo previsto pelo temporizador, atuar sobre a válvula 2. Estando ambas abertas, temos a passagem de um sinal de pressão atuando sobre um atuador qualquer.

O ciclo se fecha a partir do momento que o sinal de vácuo vindo do temporizador abre uma válvula de alívio, a válvula 3, liberando a saída para a atmosfera, despressurizando as entradas do AND (sequencialmente de acordo, novamente, com o tempo previsto pelo temporizador) e, em seguida, despressurizando a si mesma.

O circuito da figura 33 possui uma configuração semelhante, porém o sinal de entrada da lógica AND também é um sinal à vácuo, que atua sobre uma quarta válvula, válvula 4, que libera o sinal para o atuador. Esse tipo de circuito mostra a capacidade da implementação de circuitos maiores, considerando o sinal de saída de uma válvula capaz de atuar como sinal de controle da seguinte.

Em seguida, projeta-se um circuito que aplica uma lógica NAND. Um circuito lógico NAND, ou “NÃO E”, possui uma lógica de saída inversa ao sinal de saída de um circuito AND, como podemos ver pela tabela verdade vista na tabela 2. No circuito NAND, a saída só se encontra em nível lógico “1” quando ambos os sinais de entrada se encontram no nível lógico “0”.

Tabela 2 – Tabela verdade de circuito NAND.

E1	E2	S
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Na figura 34, vemos a implementação de uma lógica NAND (marcada pela área em vermelho), ou seja, o atuador ligado à válvula 4 se mantém acionado devido ao sinal de vácuo V1 enquanto as válvulas 1 e 2 não são ativas. A abertura dessas duas válvulas (que é dada através do mesmo sinal V1, sequencialmente devido ao temporizador 1), abre imediatamente o alívio (válvula 3), que despressuriza tanto a válvula 4, que aciona o atuador como o as entradas das válvulas 1 e 2 que formam o NAND e, por fim, ela mesma, através de um segundo temporizador, que impede que o alívio seja acionado antes que a lógica NAND esteja completa.

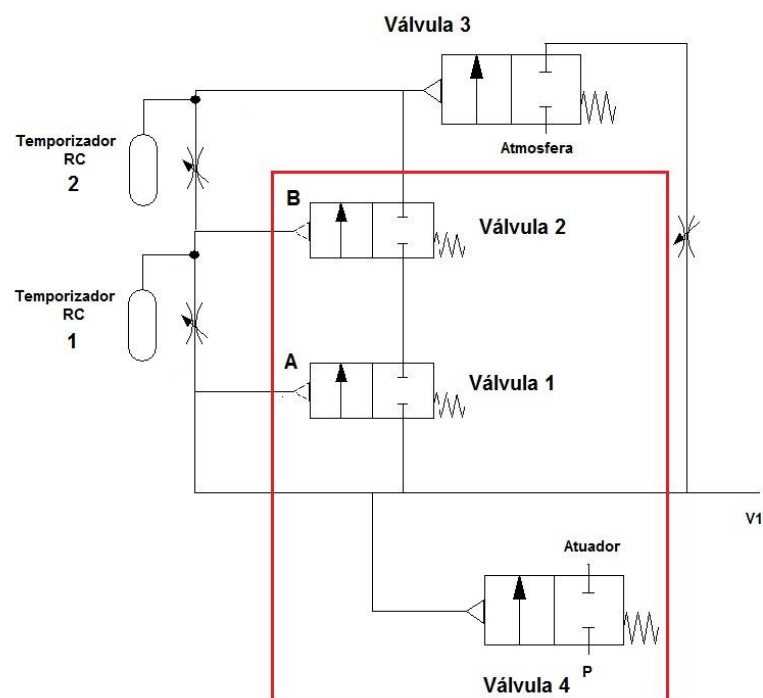


Figura 34 - Circuito NAND pneumático cíclico.

A partir desses circuitos, podem-se fazer algumas avaliações. A aplicação da saída de uma válvula como sinal de acionamento de outra acarreta num problema já apontado por Jensen; Grover e Mathies (2007). Se ambas as entradas da válvula estiverem expostas à mesma pressão, a válvula se fechará, não permitindo a passagem do sinal. Esse problema pode ser resolvido com a aplicação de sinais de diferentes pressões.

A grande dificuldade encontrada no projeto dos circuitos que atendem aos requisitos levantados é a questão da despressurização de uma linha já acionada. Como o único sinal de entrada é o sinal de vácuo, o fechamento da válvula não suspende o sinal enviado pela mesma, já que a pressão se manterá a mesma na saída, não havendo despressurização.

Esse tipo de problema é devido à limitação do tipo de válvula que pode ser utilizada, que não permite a aplicação de válvulas que possam fazer um “switch” entre a aplicação de vácuo e a despressurização. Jensen; Grover e Mathies (2007) possuem em seus circuitos, a aplicação de vácuo e pressão positiva através do mesmo canal, com o “switch” feito externamente ao circuito por meio de solenoides controlados por computador. Como não se deseja aplicar energia elétrica, o “switch” pode ser feito manualmente, através de uma válvula.

Assim, com a permissão de 2 sinais na entrada (vácuo e pressão), e a permissão de ação externa para alternar os sinais, pode-se pensar em novos circuitos de diversas funcionalidades, como os mostrados abaixo na sequência.

O circuito da figura 35 funciona de forma semelhante aos circuitos descritos anteriormente. Entretanto, a capacidade de variação do sinal de entrada permite ao circuito aplicar uma lógica AND a partir de vácuo e, trocando ambos os sinais de vácuo por pressão, a implementação de uma lógica NAND, que completa o circuito.

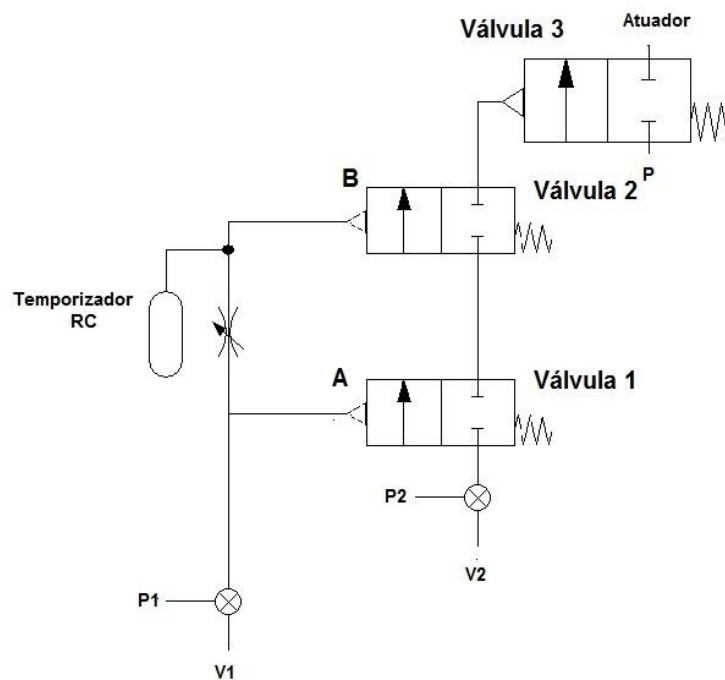


Figura 35 - Implementação de AND com alteração no sinal de entrada.

Um elemento lógico que demonstra a vasta aplicabilidade desse tipo de dispositivo é o demultiplexador, também conhecido como DEMUX. Um circuito DEMUX possui um sinal de entrada e diversos canais de saída. Sinais de controle são utilizados para que se defina para qual saída o sinal de entrada será direcionada. Se considerarmos um sistema de 2 canais de saída (Out1 e Out2), e o sinal de controle **C** utilizado para selecionarmos através de qual saída a entrada **E** passará, teremos a seguinte tabela verdade, vista na tabela 3.

Tabela 3 - Tabela verdade de demultiplexador de 2 saídas.

C	Saída
0	Out1
1	Out2

A figura 36 demonstra a construção de um demultiplexador a partir da válvula NF à vácuo. Considerando a entrada podendo variar entre vácuo e pressão, podemos

fazer facilmente o controle desse circuito escolhendo a saída através da qual desejamos passar o sinal de entrada.

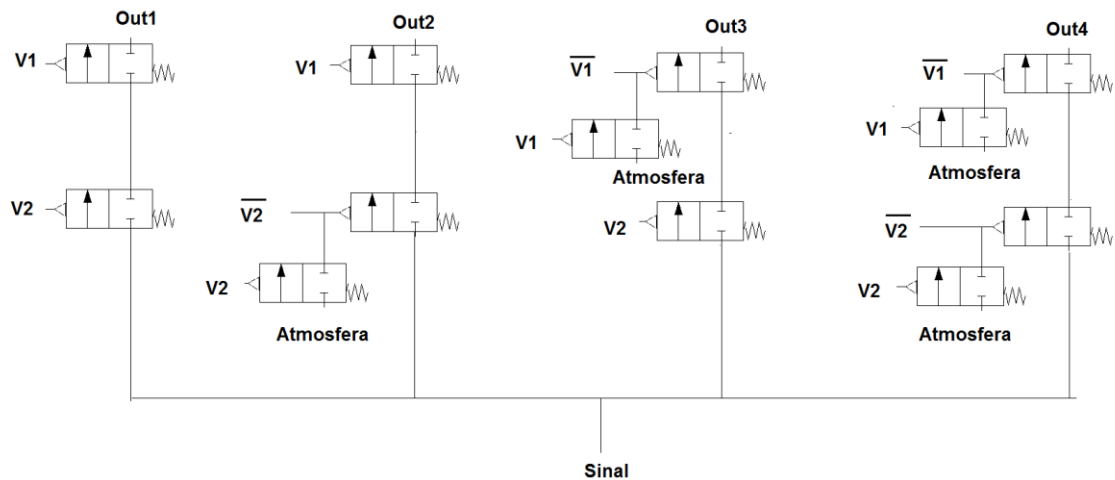


Figura 36 - Projeto de demultiplexador pneumático.

Assim, mantendo-se os sinais “negados” de V1 e V2 (representados com a barra sobre o símbolo) sempre em nível lógico “1”, temos a escolha da saída pela qual passará o sinal de entrada pela combinação dos sinais de entrada V1 e V2.

Circuitos DEMUX possuem vasta aplicabilidade, o que demonstra o alcance da construção de circuitos pneumáticos desse tipo, mesmo tendo em vista todas as restrições que foram levadas em consideração devido aos métodos de construção e à natureza dos sinais de entrada.

Tendo desenvolvido essa série de circuitos, pode-se dar início ao projeto físico dos mesmos.

4.4 Projeto e construção da primeira válvula

Tendo em vista o que foi desenvolvido anteriormente, considerando o levantamento dos possíveis problemas que serão enfrentados, bem como o alcance dos circuitos a serem construídos, parte-se para o projeto e construção das válvulas e dos circuitos projetados. A proposta é que esse processo seja iniciado

construindo-se a válvula de atuação análoga ao p-MOSFET e, em seguida, a construção de elementos de circuitos lógicos.

A definição dos materiais e métodos utilizados se deu conforme visto na seção anterior, limitados pelos métodos de construção acessíveis ao projeto, acabando por gerar circuitos de maior dimensão do que os vistos no trabalho de Jensen; Grover e Mathies (2007). Todos os circuitos devem ser construídos considerando que o intuito do projeto é a demonstração da funcionalidade dos conceitos, e não a fabricação de um dispositivo comercial.

O corpo do circuito é projetado em acrílico. A escolha se deve ao fácil acesso ao material, que foi disponibilizado pelo orientador. Assim, deve-se escolher como o dispositivo será construído e montado, suas dimensões, como será produzido o vácuo a ser utilizado como sinal de acionamento do dispositivo, bem como o método para que esse sinal seja passado ao dispositivo e a membrana a ser utilizada.

A partir da ideia inicial do que foi visto em Jensen; Grover e Mathies (2007) pode-se realizar um primeiro esboço do projeto, ainda sem as dimensões adequadas. O projeto foi realizado utilizando-se o software AutoDesk Inventor®, a partir de uma licença estudantil. Esse primeiro esboço pode ser visto nas figuras 37, 38 e 39.

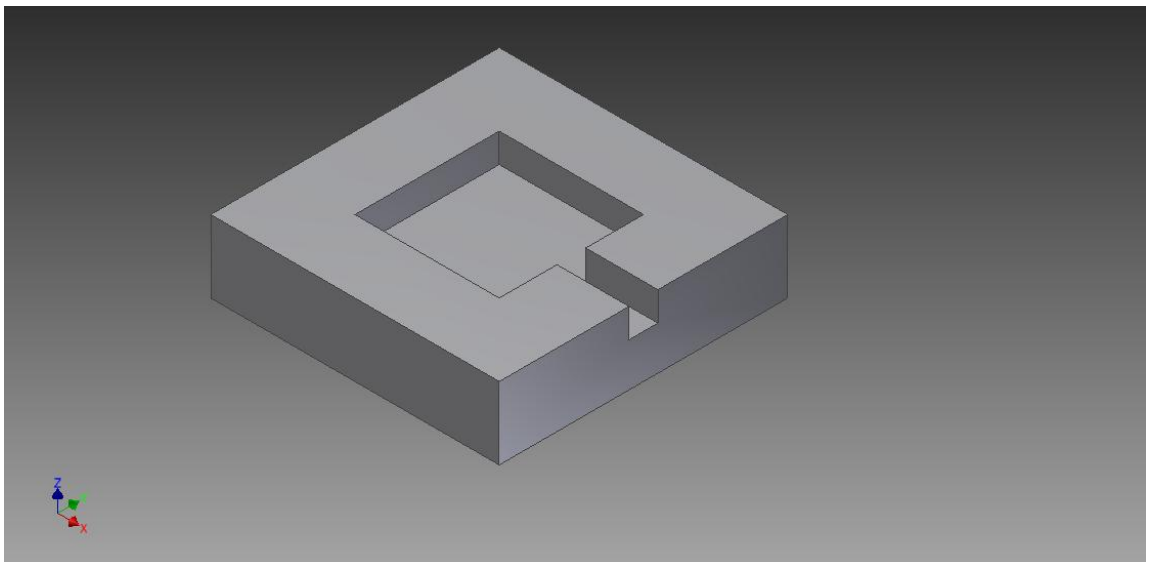


Figura 37 - Esboço de projeto válvula NF à vácuo (peça 1).

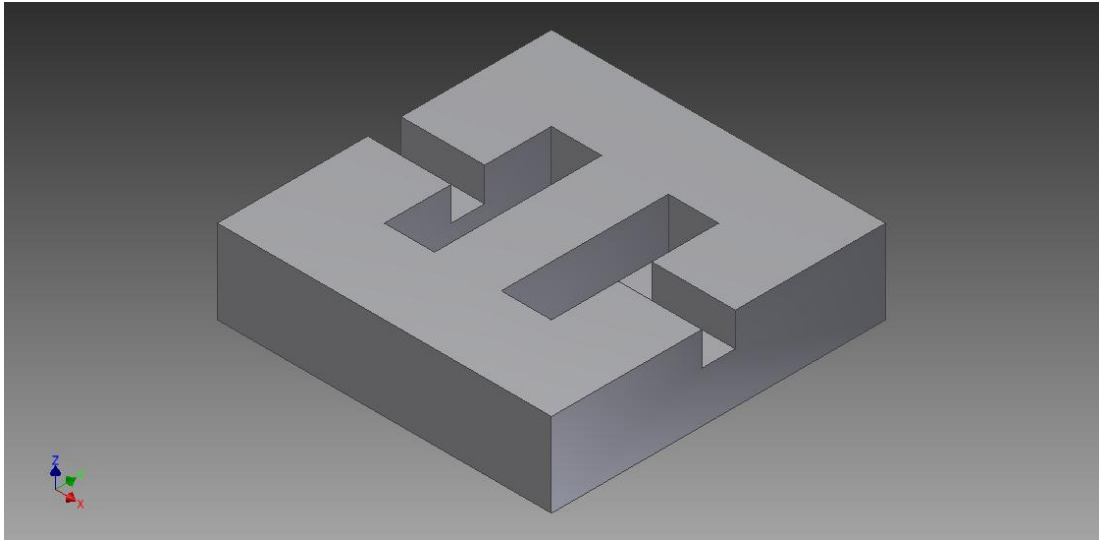


Figura 38 - Esboço de projeto válvula NF à vácuo (peça 2).

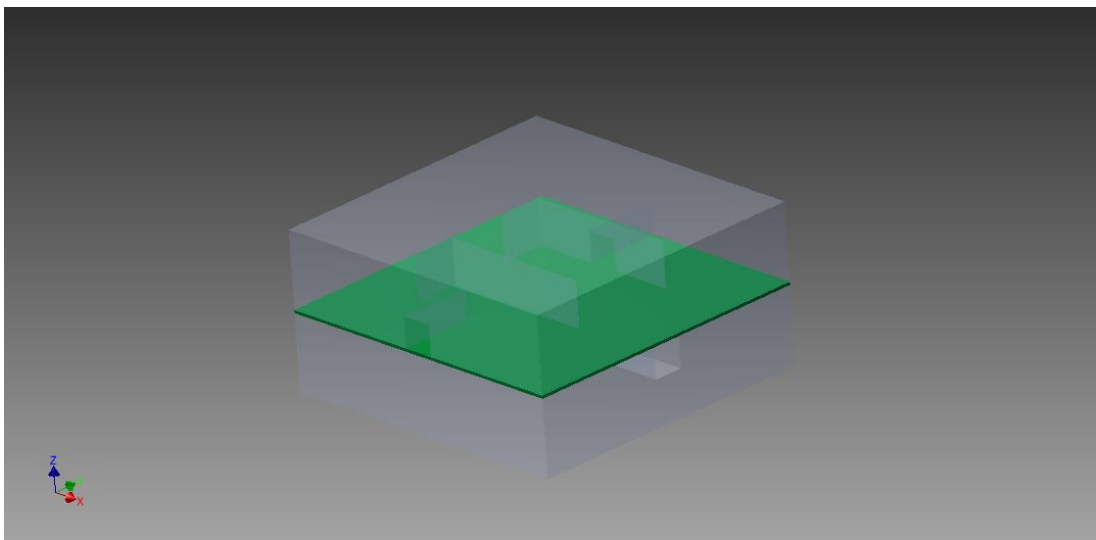


Figura 39 - Esboço de projeto válvula NF à vácuo (montagem).

Após o esboço do projeto, iniciou-se um contato com o Prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau, do departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica. Esse contato tem por objetivo auxílio no projeto e construção dos dispositivos.

As primeiras discussões foram acerca da fonte de vácuo a ser utilizada no circuito. As duas principais alternativas levantadas foram pequenos compressores de ar (como os utilizados em geladeiras) ou utilização de seringas como “acumuladores”. A partir de experiência prévia do orientador, bem como pela facilidade de montagem e custo de materiais, optou-se pela utilização de seringas. As seringas devem possuir alguma espécie de dispositivo com o qual se possa prender o êmbolo em uma posição fixa, bem como uma válvula para liberar o acesso

do ar na seringa para o restante do circuito, ou para a atmosfera, caso se deseje despressurizar o mesmo.

A utilização da seringa é muito simples: se mantivermos uma pequena quantidade de ar na seringa e, em seguida, fechamos o acesso de ar para a atmosfera (por intermédio da válvula), pode-se puxar o êmbolo, aumentando o volume de ar dentro da seringa e, conseqüentemente, diminuindo a pressão no interior da mesma. Considerando o ar como gás ideal, essa relação será dada pela fórmula abaixo.

$$P * V = n * R * T$$

Onde P é a pressão aplicada, V é o volume do gás, n a quantidade (em mols) do gás no sistema, R a constante do gás e T a temperatura.

Assim, adquiriu-se seringas de 60ml, bem como válvulas para controlar o acesso do ar dentro da seringa para o restante do circuito. Algumas relações da pressão que pode ser obtida por essa seringa pode ser vista no apêndice A (memorial de cálculo). Podemos ver esses equipamentos nas figuras 40 e 41. Resta, então, projetar como esse ar será transferido para o circuito.



Figura 40 - Seringa e válvula utilizadas no projeto.



Figura 41 - Válvula utilizada no projeto.

A partir das discussões realizadas com o prof. Rodrigo, definiu-se que o melhor método de se colocar em contato o ar da seringa com o do circuito seria fixar no acrílico, conectores “push-In fitting” próprios para o encaixe de tubos. Considerando as válvulas adquiridas para as seringas, torna-se mais fácil a compra dessa tubulação de um diâmetro que consiga um fácil encaixe na válvula, e a compra dos conectores de forma a possibilitar o encaixe da tubulação. Assim, adquiriu-se uma tubulação de 6 mm de diâmetro externo, e conectores adequadas para esse tipo de tubulação. Essas peças podem ser vistas na figura 42.



Figura 42 - Conector “push-In fitting”.

Como utilizaremos seringas para a geração do vácuo, o volume dos canais do circuito deve ser suficientemente pequeno para ser desprezível em comparação ao volume da seringa, de forma que não se perca a pressão negativa gerada pela mesma. Assim, para a construção do circuito em si, escolheu-se usinar o acrílico com uma fresa de pequeno diâmetro, de forma a seguir esse requisito, além de demonstrar como os circuitos podem ser construídos em pequena escala. Para a construção desses circuitos adquiriu-se fresas de 1mm de diâmetro.

Considerando a fresa de 1mm de diâmetro, se fizermos os canais com 1mm de profundidade, o volume dependerá apenas da extensão dos canais usinados no circuito. Se considerarmos a câmara de deslocamento de uma válvula com 25 mm² de área e 1 mm de profundidade, teremos uma câmara de 25mm³ de volume. 60ml equivalem a 60cm³, ou 60.000 mm³. Assim, podemos considerar que o volume dos canais do circuito são desprezíveis em relação ao volume da seringa, e que, portanto, a perda de carga no circuito não é relevante.

Como os conectores devem ser rosqueados no acrílico, esse deve possuir uma espessura suficiente para que se possam fixar essas peças e ainda assim desenhar os circuitos na superfície oposta. Definiu-se, então, uma espessura mínima de 10mm para as placas de acrílico a serem utilizadas.

Com as dimensões já definidas, se torna possível o projeto do circuito. O projeto da primeira válvula no AutoDesk Inventor® pode ser visto nas figuras 43, 44 e 45. Os desenhos técnicos dessa válvula e das demais estão no apêndice B.

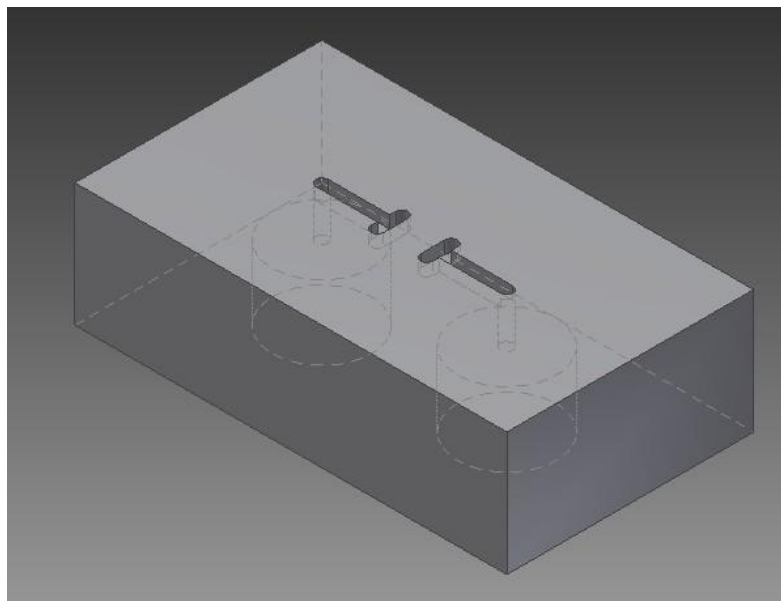


Figura 43 - Projeto de válvula NF à vácuo em CAD (peça 1).

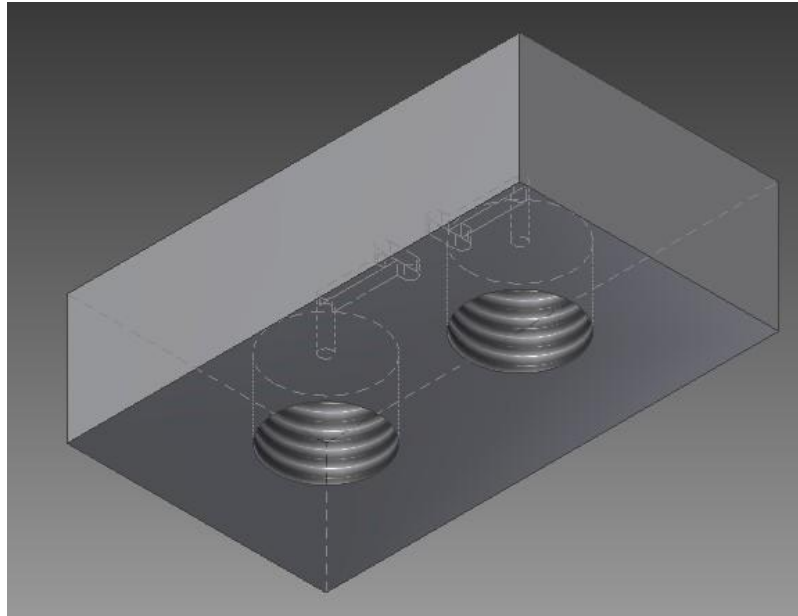


Figura 44 - Projeto de válvula NF à vácuo em CAD (detalhe da peça 1).

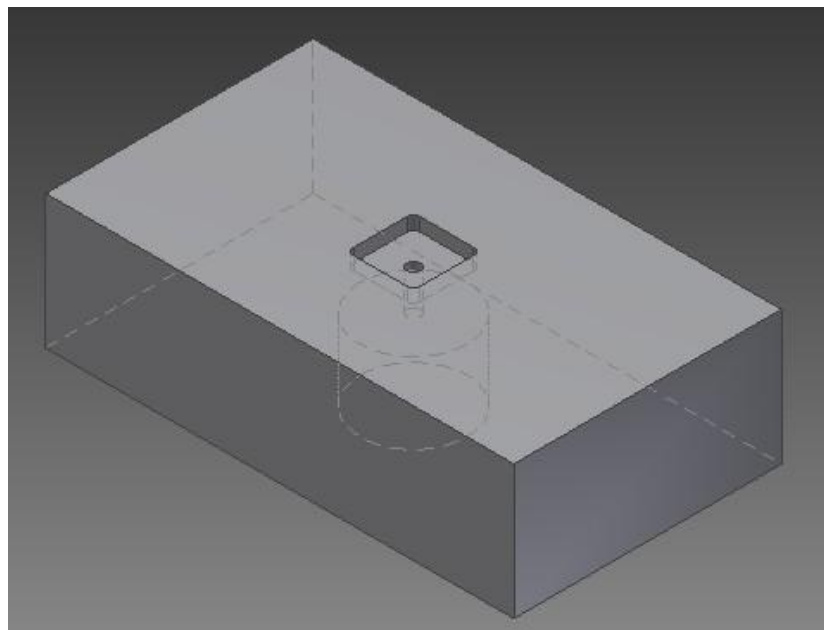


Figura 45 - Projeto de válvula NF à vácuo em CAD (peça 2).

Como membrana, decidiu-se inicialmente a utilização de bexigas de látex comuns, mais fáceis de adquirir, e, caso necessário, a procura de outro material posteriormente.

Feitos os desenhos, a primeira válvula foi construída pelo técnico Adilson da Escola Politécnica. Essa válvula pode ser vista nas figuras 46, 47 e 48.



Figura 46 - Peças da válvula NF à vácuo construídas.



Figura 47 - Peça da válvula NF à vácuo (canais de entrada e saída).



Figura 48 - Peça da válvula NF à vácuo (câmara de deslocamento).

4.5 Montagem da primeira válvula e testes

Tendo a primeira válvula construída, dá-se início a montagem e aos testes da mesma, de forma a levantar os pontos fortes e fracos do projeto, para que se possa iterativamente melhorar o projeto para a construção dos próximos circuitos.

Como elementos de fixação, propôs-se, inicialmente, a utilização de adesivos. Alguns produtos foram testados para a definição de um adesivo que fosse eficiente na aderência entre as bexigas e as placas de acrílico.

Contudo, para um primeiro teste, utilizou-se a própria elasticidade da bexiga para se envolver uma das placas do circuito. Garante-se, assim, que a membrana permaneça sempre esticada. A montagem da outra placa foi feita pressionando-se uma placa contra a outra e fixando as duas por intermédio de fita isolante.

No primeiro teste, inicialmente são colocadas nas seringas 10ml e 15ml para a câmara de deslocamento e para o sinal de entrada, respectivamente, sendo ambas, após selada a entrada de ar, puxadas para a posição de 25ml (ocasionando uma pressão negativa de -60kPa e -40kPa, respectivamente). A diferença de pressão nas seringas é feita de forma que a membrana não sofra a atuação da mesma pressão

dos 2 lados da válvula, e, conseqüentemente, não retorne à sua posição inicial após a aplicação do sinal.

Para verificar o funcionamento da válvula, um pedaço de tubulação com uma membrana na ponta foi inserido na saída, de forma que, se pudermos verificar um deslocamento dessa membrana para dentro da tubulação, significa que ocorreu a passagem do sinal de vácuo. Algumas fotos do primeiro teste podem ser vistas nas figuras 49, que também mostra o circuito que está sendo implementado, e 50.

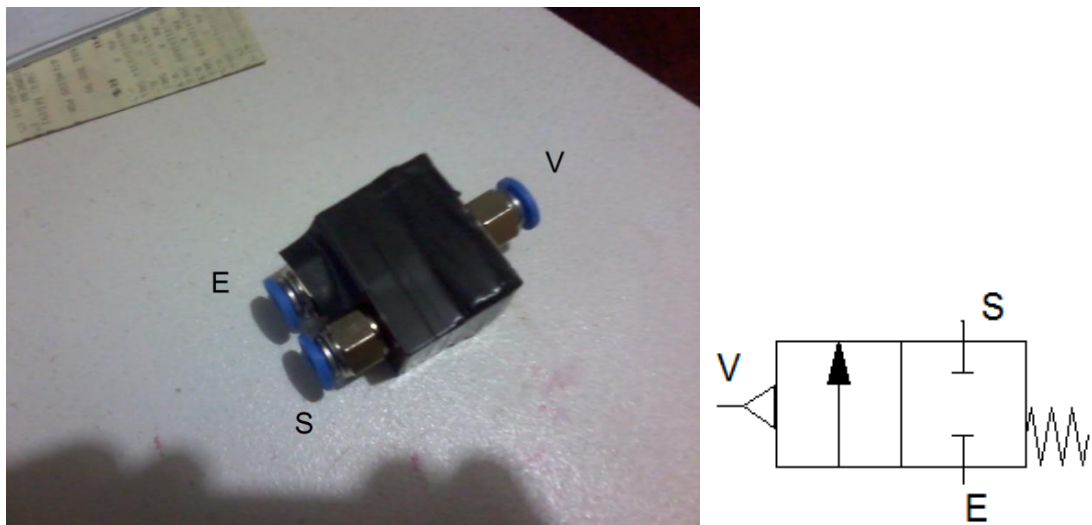


Figura 49 - Montagem de válvula NF à vácuo e representação.



Figura 50 - Detalhe da membrana demonstrando sinal de saída em teste de válvula NF à vácuo.

Os primeiros testes se mostraram bem sucedidos. Encontrou-se alguma dificuldade na fixação da membrana. Os testes com os adesivos mostraram-se eficientes, porém a utilização das mesmas podia inutilizar uma peça de teste caso usada erroneamente. Além disso, a utilização das colas pode facilitar vazamentos, já que pode ocasionar desníveis na superfície. Entretanto, o teste preliminar sem a utilização de colas, apenas bexiga e fita isolante, se mostrou eficiente, sendo definido que esse método seria adotado para os testes seguintes.

A pressão gerada nas seringas foi capaz de deslocar a membrana dentro da válvula, bem como a membrana de saída, como esperado, sendo que o sinal de entrada só foi passado para a saída quando a válvula era acionada pelo sinal na câmara d deslocamento.

Como todos os sinais possíveis da válvula foram testados, concluiu-se que o teste foi bem sucedido, de forma que o sinal de entrada só passava para a saída quando a válvula era acionada. Como já previsto, para testes feitos repetidamente, é necessário à utilização da válvula presa no bocal da seringa para que seja feita uma despressurização do sinal, já que, se a válvula for simplesmente fechada e não despressurizada, a pressão negativa se manterá dentro do circuito, mantendo o sinal em questão em “1”.

4.7 Circuitos lógicos

Construída a válvula que serve de base para todos os demais circuitos, parte-se para o projeto e construção de válvulas que implementam circuitos lógicos. O primeiro circuito lógico escolhido para ser construído foi um “AND”. O projeto do circuito AND no AutoDesk Inventor® pode ser visto nas figuras 51 e 52, e seus desenhos técnicos em apêndice B.

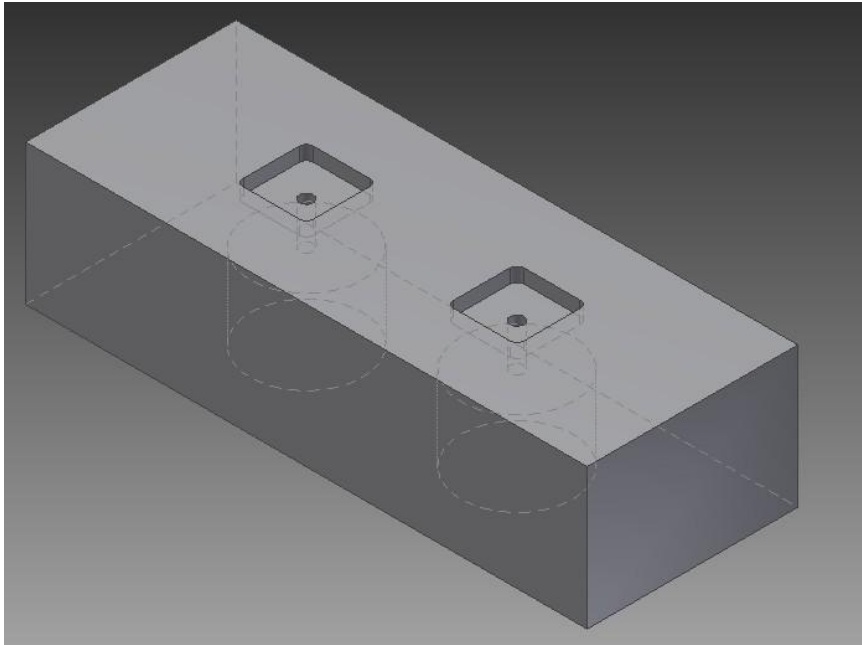


Figura 51 - Projeto em CAD de "AND" lógico (peça 1).

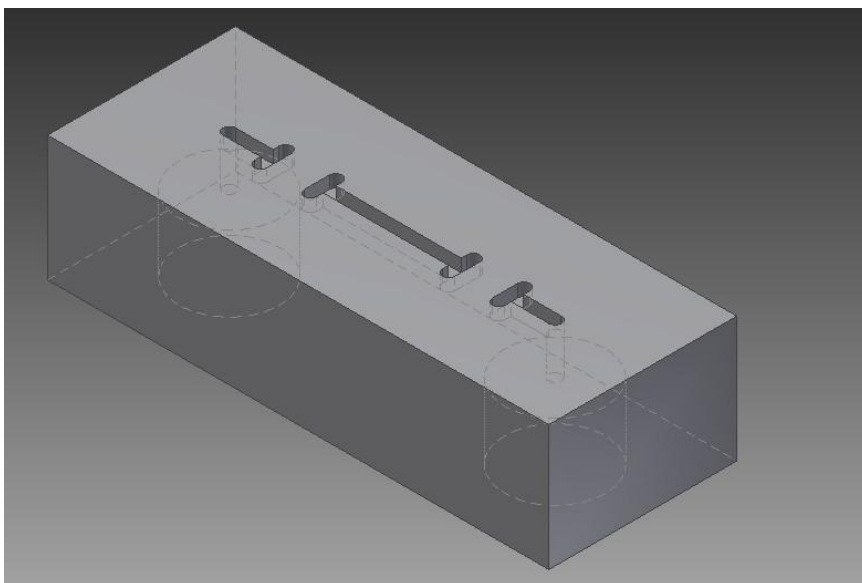


Figura 52 - Projeto em CAD de "AND" lógico (peça 2).

O circuito AND será capaz de mostrar a aplicação do conceito das válvulas em série, ou seja, para que o sinal de entrada consiga avançar até a saída, é necessário que ambas as câmaras de deslocamento sejam ativadas. Os mesmos métodos de construção aplicados à primeira válvula foram utilizados nesse circuito.

Devido aos testes bem sucedidos da primeira válvula, decidiu-se dar andamento ao projeto de circuitos durante a construção do circuito AND. O próximo passo a ser dado na construção de um circuito, mostrado a aplicabilidade de uma lógica digital a

partir do “NA/D” construído, seria a implementação de um dispositivo que possuísse não só uma lógica implementada, mas também que possuísse essa lógica atuando sobre outra válvula. Assim, projetou-se um circuito que possui um “OR” digital, e a saída desse circuito é o sinal da câmara de deslocamento utilizado para a ativação de outra válvula. O projeto desse circuito no AutoDesk Inventor® pode ser visto nas figuras 53 e 54.

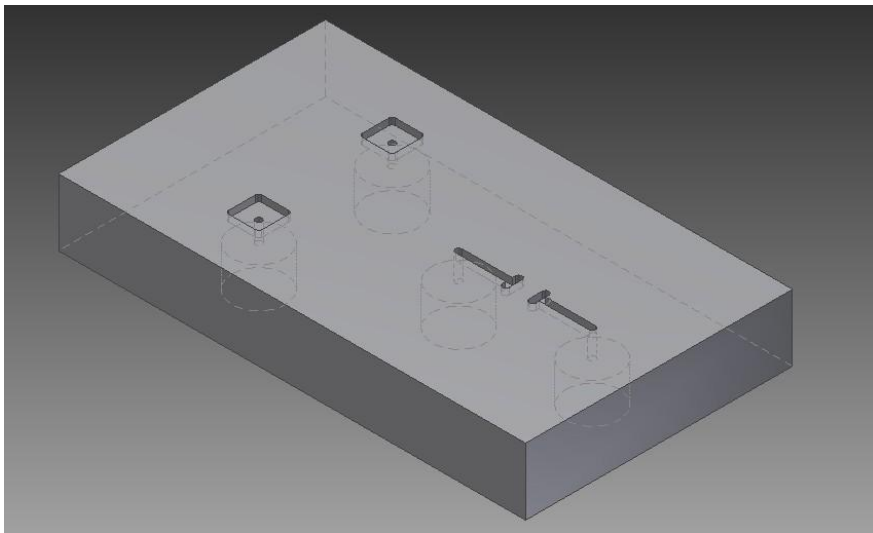


Figura 53 - Projeto em CAD de circuito com "OR" lógico (peça 1).

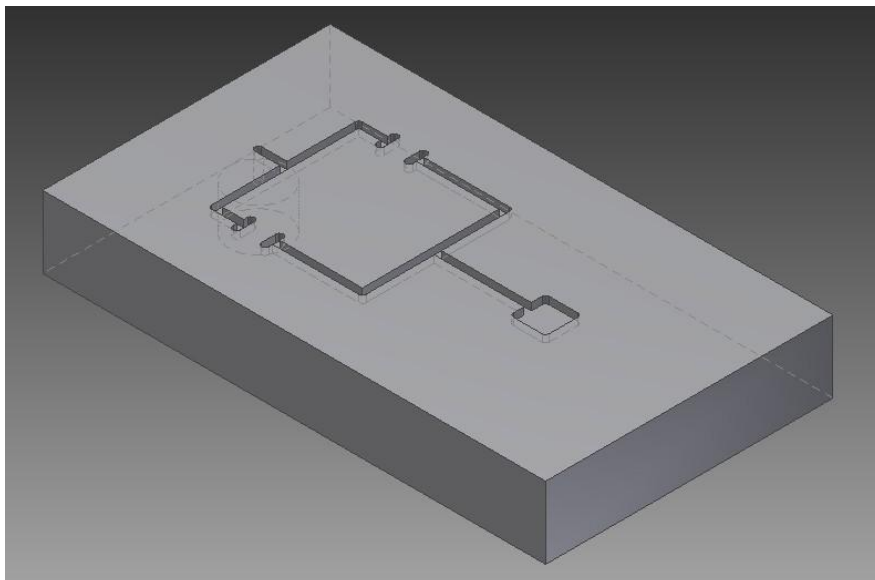


Figura 54 - Projeto em CAD de circuito com "OR" lógico (peça 2).

Foi, então, construído e testado o circuito lógico "AND". As placas de acrílico usinadas, bem como a montagem do teste podem ser vistos nas figuras 55, 56 e 57. A figura 57 também mostra o circuito que foi implementado no dispositivo a partir da simbologia proposta.



Figura 55 - Peças do circuito "AND" lógico.



Figura 56 - Detalhes das peças do circuito "AND" lógico.

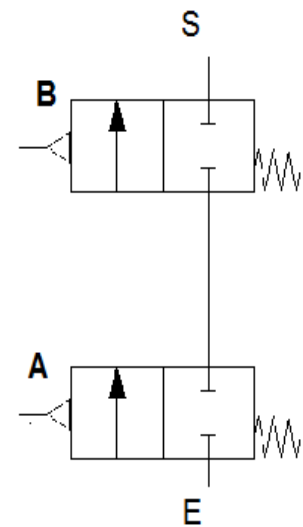
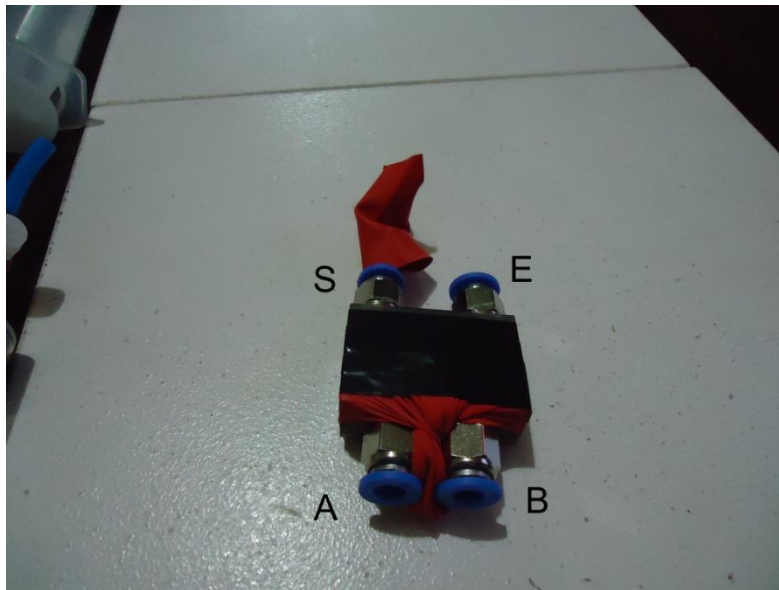


Figura 57 - Circuito "AND" lógico montado e esquema do circuito.

O método de montagem desse circuito foi o mesmo utilizado na primeira válvula. Como na válvula anterior, os testes demonstraram funcionamento de acordo com o esperado, seguindo a tabela verdade demonstrada na tabela 1. Imagens do teste realizado podem ser vistas na figura 58.

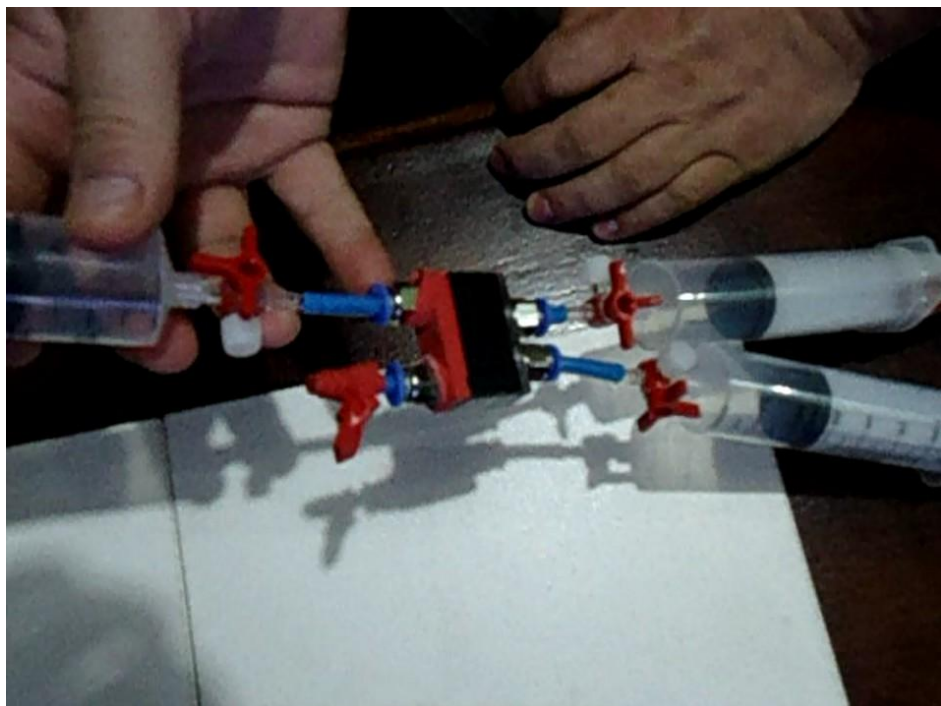


Figura 58 - Teste realizado com "AND" lógico.

Como no circuito anterior, houve certa dificuldade na montagem. Por ser um circuito pneumático, todo o circuito necessita estar devidamente selado para que não haja nenhum vazamento. Portanto, as peças devem ser fixadas firmemente para que não haja nenhuma perda dos sinais para a atmosfera.

Imagens do circuito que envolve um “OR” lógico e o acionamento de uma válvula a partir da saída da anterior podem ser vistas nas figuras 59, 60 e 61.

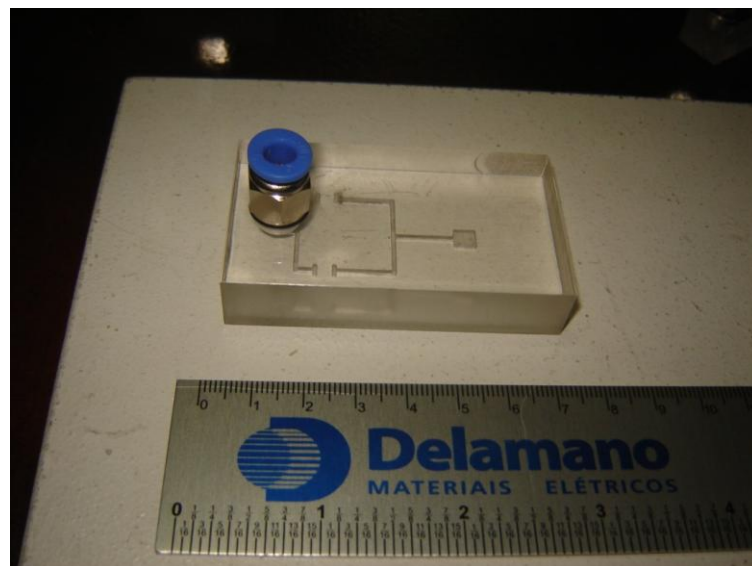


Figura 59 - Peça 1 de circuito "OR" lógico pneumático.



Figura 60 - Peça 2 de circuito "OR" lógico pneumático.

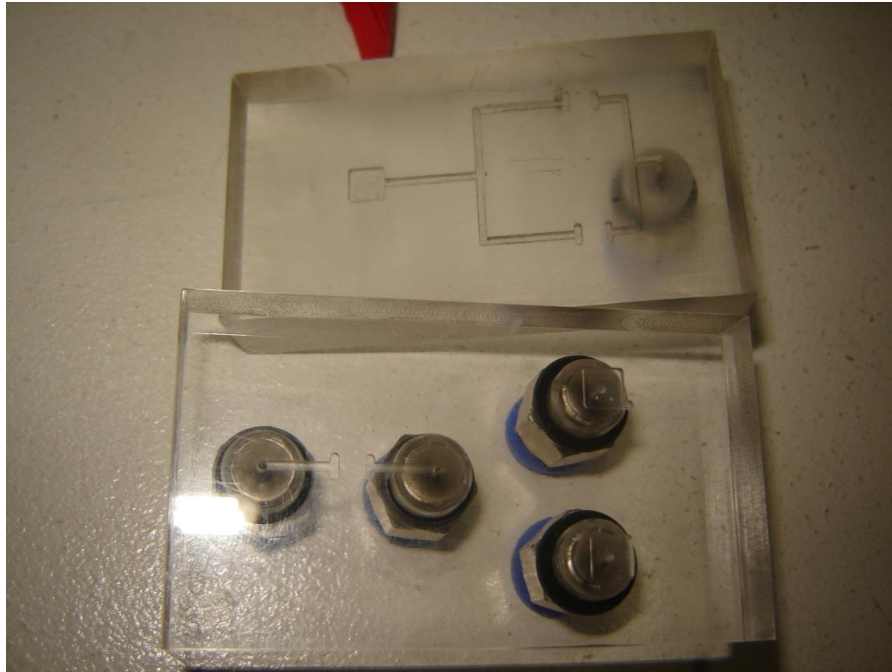


Figura 61 - Detalhe das peças de circuito "OR" lógico.

Como os elementos anteriores, essa válvula foi montada e testada, como se pode ver na figura 62, que também mostra o circuito lógico que foi implementado conforme a simbologia proposta. Devido às maiores dimensões desse circuito, que possui maior número de elementos, observamos o surgimento de problemas de vazamento devido à falta de planicidade das placas. Assim, como pode ser observado na figura, utilizamos morsas para melhor fixação das partes do circuito.

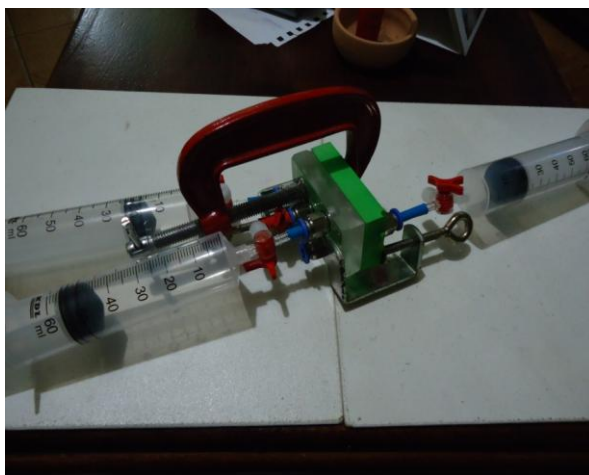


Figura 62 - Montagem de teste de "OR" lógico e esquema do circuitp.

A utilização das morsas auxiliou na resolução do problema, sustentando o sinal de resposta por mais tempo. Ainda assim, essa válvula continuou a apresentar problemas de vazamento. Conclui-se que os métodos de construção e montagem utilizados precisariam ser revistos para circuitos de maiores dimensões, possivelmente com a aplicação de uma retificação das faces das placas do circuito, além de a aplicação de guias para o alinhamento correto do circuito. Entretanto, o circuito foi capaz de executar a lógica conforme o previsto.

5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Circuitos lógicos pneumáticos aparecem como excelente alternativa para controladores eletrônicos em situações nas quais o uso de eletricidade pode oferecer algum risco. Esse trabalho mostrou diversos aspectos relevantes quanto à projeto, construção, aplicabilidade e alcance desse tipo de dispositivo.

Utilizando principalmente a analogia entre circuitos eletrônicos e circuitos pneumáticos, puderam-se projetar diversos circuitos pneumáticos. O projeto desses circuitos demonstrou que a partir desses elementos se torna simples a construção de circuitos com diversos tipos de aplicação, e que podem atuar com o mínimo de atuação externa. A implementação de um demultiplexador, que é um elemento de mais alta complexidade e que possui alta aplicabilidade, é um exemplo de como esse tipo de circuito possui grande alcance. Já a implementação de temporizadores e de circuitos que, através deles, podem gerar sinais de tempos diferentes a partir da mesma entrada de ar (ou vácuo), demonstra que se pode construir circuitos automatizados com um mínimo de atuação de operadores.

O projeto e construção de protótipos, utilizando sempre métodos de construção e materiais simples, mostra que esse tipo de circuito tem fácil implementação. Temos métodos de construção que se utilizam de diversas tecnologias, desde tecnologias de circuitos microeletromecânicos (MEMs) para a construção de circuitos da ordem de micrômetros ou milímetros, até a usinagem utilizando fresadoras, como proposto nesse trabalho, gerando circuitos de dimensões maiores, da ordem de centímetros. Esse trabalho alcançou os objetivos propostos, chegando à construção de elementos de circuitos que implementaram a lógica prevista com os materiais e métodos propostos.

Conclui-se que esse tipo de dispositivo possui vasta aplicabilidade, sendo que o projeto e construção de produtos e projetos comerciáveis trariam alternativas úteis para a atuação em controle de processos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MARK, D. et al. **Microfluidic lab-on-a-chip platforms: requirements, characteristics and applications.** Chem. Soc. Rev. n. 39, p. 1153-1182, jan. 2010.

JENSEN, E. C.; GROVER, W. H.; MATHIES, R. A. **Micropneumatic Digital Logic Structures for Integrated Microdevice Computation and Control.** JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEM. v. 16, n. 6, p1378-1385, dez. 2007.

GROVER, W. H. Et Al. **Development and multiplexed control of latching pneumatic valves using microfluidic logical structure.** LAB CHIP. n. 6, p623-631, 2006.

GROVER, W. H. Et Al. **Monolithic membrane valves and diaphragm pumps for practical large-scale integration into glass microfluidic devices.** Sensors and Actuators B. n.89, p315-323, 2003.

HENNING, A. K. **MICRO-PNEUMATIC LOGIC.** In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND RD&D EXPO, nov. 2004. Anaheim, CA.

HENNING, A. K. **Concepts for micropneumatic and microhydraulic logic gates.** Proc. SPIE. v. 6465, 2007.

TAKAO, H.; ISHIDA, M.; SAWADA, K. **A Pneumatically Actuated Full In-Channel Microvalve With MOSFET-Like Function in Fluid Channel Network.** JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEM. v. 11, n. 5, p421-426, out. 2002.

TAKAO, H.; ISHIDA, M. **Microfluidic Integrated Circuits for Signal Processing Using Analogous Relationship Between Pneumatic Microvalve and MOSFET.** JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEM. v. 12, n. 4, p497-505, out. 2003.

HAEBERLE, S.; ZENGERLE, R. **Microfluidic platforms for lab-on-a-chip applications**. LAB CHIP. n. 7, p1094-1110, 2007.

JEONG, O. C.; KONISHI, S. **Fabrication and drive test of pneumatic PDMS micro pump**. Sensors and Actuators A. n. 135, p 849-856, 2007a.

JEONG, O. C.; KONISHI, S. **Pneumatic gas regulator with cascade PDMS seal valves**. Sensors and Actuators A. n. 143, p84-89, 2007b.

WANG, C.; LEE, G. **Automatic bio-sampling chips integrated with micro-pumps and micro-valves for disease detection**. Biosensors and Bioelectronics. n. 21, p419-425, 2005.

GORISSEN, B. Et Al. **Flexible pneumatic micro-actuator: analysis and production**. Procedia Engineering. n. 25, p681-684, 2011.

RHEE, M.; BURNS, M. A. **Microfluidic pneumatic logic circuits and digital pneumatic microprocessors for integrated microfluidic systems**. LAB CHIP. n. 9, p 3131-3143, 2009.

MILLER BROTHERS. MILLER, N. K. **Pneumatic Safety Edge for Power Operator Door**. N. 3303303, 7 Fev. 1967.

SILVA, E. C. N. **Apostila de Pneumática**. São Paulo: EPUSP, 2002. Apostila para disciplina de graduação do Departamento de Engenharia Mecatrônica, PMR 2481 – Sistemas Fluidomecânicos.

SEDRA, A. S; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. São Paulo: Perason Prentice Hall, p 141-225, 2007.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO

Considerando a pressão atmosférica como 1atm, aproximadamente 10^5 Pascal (ou 100 kPa), e considerando o ar como gás perfeito, obedecendo a relação mostrada na seguinte fórmula:

$$PV = nRT$$

Sendo P a pressão, V o volume, n o número de mols presentes do gás, R a constante dos gases perfeitos e T a temperatura.

No caso do experimento realizado, a temperatura será sempre constante em regime permanente (temperatura ambiente). Se colocarmos um determinado volume de ar na seringa, fecharmos sua saída de ar e puxarmos o êmbolo, teremos a expansão do ar dentro da seringa. Assim, o número de mols de ar dentro da seringa permanece constante, bem como a temperatura e a constante R. Logo, podemos relacionar a pressão dentro da seringa ao volume de ar dentro da mesma. Temos, na expansão do ar.

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}$$

Assim, se considerarmos a pressão inicial como a pressão atmosférica (100 kPa), e fizemos uma série de relações entre possíveis valores de volume inicial e final de ar dentro da seringa, podemos obter os seguintes resultados de pressão (em kPa):

Tabela 4 - Pressão absoluta do ar (kPa) na expansão de V1 para V2.

		V1 (ml)			
		5	10	15	20
V2 (ml)	20	25,00	50,00	75,00	100,00
	25	20,00	40,00	60,00	80,00
	30	16,67	33,33	50,00	66,67
	35	14,29	28,57	42,86	57,14
	40	12,50	25,00	37,50	50,00
	45	11,11	22,22	33,33	44,44
	50	10,00	20,00	30,00	40,00
	55	9,09	18,18	27,27	36,36
	60	8,33	16,67	25,00	33,33

É mais conveniente trabalharmos com valores de pressão relativa, ou seja, a diferença entre a pressão da seringa e a pressão atmosférica. Novamente considerando a pressão atmosférica como (100kPa), teremos as seguintes pressões relativas (em kPa):

Tabela 5 - Pressão relativa do ar (kPa) na expansão de V1 para V2.

		V1 (ml)			
		5	10	15	20
V2 (ml)	20	-75,00	-50,00	-25,00	0,00
	25	-80,00	-60,00	-40,00	-20,00
	30	-83,33	-66,67	-50,00	-33,33
	35	-85,71	-71,43	-57,14	-42,86
	40	-87,50	-75,00	-62,50	-50,00
	45	-88,89	-77,78	-66,67	-55,56
	50	-90,00	-80,00	-70,00	-60,00
	55	-90,91	-81,82	-72,73	-63,64
	60	-91,67	-83,33	-75,00	-66,67

APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DOS CIRCUITOS

