

**LUIZ EDUARDO NISHINO GOMES DO AMARAL**

**VÁLVULA DISPENSADORA MAGNÉTICA VEDADA COM  
FERROFLUIDO**

**CURITIBA  
2013**

**LUIZ EDUARDO NISHINO GOMES DO AMARAL**

**VÁLVULA DISPENSADORA MAGNÉTICA VEDADA COM  
FERROFLUIDO**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.**

**Orientador: Prof. Dr. Wido Herwig Schreiner**

**Co-orientador: Prof. Dr. Cyro Ketzer Saul**

**CURITIBA**

**2013**

---

A485v

Amaral, Luiz Eduardo Nishino Gomes do  
Válvula dispensadora magnética vedada com ferrofluido / Luiz  
Eduardo Nishino Gomes do Amaral. – Curitiba, 2013.  
61f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor  
de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e  
Ciência dos Materiais - PIPE

Orientador: Wido Herwig Schreiner

Co-orientador: Cyro Ketzer Saul

1. Válvulas . 2. Dispositivos fluídicos. I. Schreiner, Wido  
Herwig. II. Saul, Cyro Ketzer. III. Universidade Federal do Paraná.  
IV. Título.

CDD: 621.84

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE  
Setor de Tecnologia

### RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos vinte e cinco dias do mês de julho de 2013, no auditório do CEHPAR - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Dante Homero Mosca Jr., coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a ducentésima quadragésima quarta defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Prof. Dr. Wido H. Schreiner (UFPR), Cyro Ketzer Saul (UFPR), Fabio K. Schneider (UTFPR). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **LUIZ EDUARDO NISHINO GOMES DO AMARAL**, a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**VÁLVULA DISPENSADORA MAGNÉTICA VEDADA COM FERROFLUIDO.**” Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de argüição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a argüição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 25 de julho de 2013.

Prof. Dr. Wido H. Schreiner.  
Orientador

Prof. Dr. Cyro Ketzer Saul  
Examinador

Prof. Dr. Fabio K. Schneider  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço ao Professor Dr. Wido Herwig Schreiner pela orientação, apoio e paciência durante o mestrado e ao Professor Dr. Cyro Ketzer Saul pela co-orientação. Agradeço ao Reuni e CNPq por fornecer o apoio financeiro para essa pesquisa. Ao Dr. Leonardo Foti e Sr. Carlos Alberto Fotio por fornecerem as bobinas *b5* e *b6* que foram fundamentais no trabalho. Ao Professor Dr. Fábio Schneider pela participação na banca e colaboração nas correções. Ao Professor Dr. César Dartora pela participação da banca de qualificação e as correções dos cálculos. Ao Professor Dr. Valderes Drago por me receber e me ajudar com o ferrofluido. A Leonardo Berlim Schneider que sempre colaborou com tudo que podia. A Mariana Coelho Maximino por revisar a dissertação. Finalmente a minha família, colegas e amigos sem os quais esse trabalho não seria possível.

# SUMÁRIO

RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABELAS.....	V
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	VI
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. OBJETIVO .....	2
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: VÁLVULAS MICROFLUÍDICAS .....	3
3. INTRODUÇÃO TEÓRICA .....	9
3.1. FLUÍDICA.....	9
3.2. ÍMÃS DE NDFEB .....	15
3.3. FERROFLUIDO .....	19
3.4. INDUTORES .....	21
3.5. INTERAÇÃO ENTRE INDUTOR E ÍMÃ.....	24
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	26
4.1. EVOLUÇÃO DOS PROTÓTIPOS .....	26
4.2. CONFECÇÃO DO DISPOSITIVO.....	28
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO INDUTOR .....	29
4.4. CARACTERIZAÇÃO DA VÁLVULA .....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
5.1. INDUÇÃO MAGNÉTICA, CORRENTE E TENSÃO NO INDUTOR.....	36
5.2. IMPEDÂNCIA DO INDUTOR .....	41
5.3. PRESSÃO MÁXIMA DA VÁLVULA .....	44
5.4. TENSÃO IDEAL DO INDUTOR.....	46
5.5. DISPENSA EM DIFERENTES PRESSÕES.....	51
5.6. VAZÃO DA VÁLVULA .....	53
5.7. NÚMERO DE REYNOLDS .....	55
5.8. REPRODUTIBILIDADE DA VÁLVULA.....	56
6. CONCLUSÕES .....	57
7. ANEXO: PEDIDO DE PATENTE .....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

## RESUMO

O desenvolvimento de dispositivos microfluídicos abre uma vasta gama de aplicações, que pode incluir simples válvulas, ou até complexos sistemas de análise química. A principal característica de tais sistemas é operar em escalas muito pequenas, reduzindo a quantidade de reagentes, amostras e baixando o tempo de análise drasticamente.

Este trabalho relata o desenvolvimento de uma tecnologia que pode ser usada como dosador para dispositivos microfluídicos, uma válvula dispensadora magnética vedada com ferrofluido. A válvula utiliza uma esfera de um ímã de NdFeB envolvida com ferrofluido para fazer a vedação e é controlada por um indutor externo. Tanto o indutor quanto a válvula são caracterizados, obtendo-se dados como a faixa de pressão ideal para operação e as tensões aplicadas no indutor.

As válvulas testadas apresentaram um desvio muito pequeno em sua dispensa, sob as mesmas condições. A margem de erro, considerando um intervalo de confiança de 95%, representa menos de 1% da média das amostras na maioria dos casos. Foram produzidas dispensas em volumes tão pequenos quanto 1  $\mu\text{l}$ , porém medidas precisas aparecem somente na faixa de 30  $\mu\text{l}$  e acima.

Apesar da boa confiabilidade na dispensa de cada válvula, cada uma possui uma vazão distinta, causada pelo processo de fabricação da válvula e de seus componentes. Para obter um lote de válvulas que tenha a mesma vazão, é preciso criar uma peça única que substitua alguns passos no processo de fabricação que podem gerar diferenças nas válvulas.

## **ABSTRACT**

The development of microfluidic devices creates a wide range of applications, ranging from simple valves to complex systems for chemical analysis. The main characteristic of these systems is the capability to operate at small scales thus reducing the amount of reagents and samples, reducing the time for analysis dramatically.

This paper reports the development of a technology that can be used as a dispenser for microfluidic devices, a magnetic dispensing valve sealed with ferrofluid. The valve uses a sphere of an NdFeB magnet wrapped with ferrofluid for sealing and is controlled by an external inductor. Both the inductor and the valve are characterized, defining values such as the pressure range of ideal operation and the voltages applied on the inductor.

The valves tested showed a very small deviation in its behaviour, within the same conditions. Considering an confidence interval of 95%, the margin of error represents less than 1% of the average for each sample in the majority of cases. Dispensations were produced in volumes as small as 1  $\mu\text{l}$  but measures only appear constant in the range of 30  $\mu\text{l}$  and above.

Despite the good reliability in the dispensing of each valve, each one of them has a distinct flow, caused by the valve's manufacturing process and its components. A condition for the valves to have the same flow is the necessity to create a unique piece that replaces some steps in the manufacturing process that can generate differences in the valves.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Imagem retirada de [1]. Válvula do cromatógrafo gasoso de Terry <i>et al.</i> ....	4
Figura 2-2: Imagem retirada de [3]: Diferentes válvulas que utilizam membranas (em amarelo): (a) eletromagnética; (b) eletrostática; (c) piezoelétrica; (d) bimetálica; (e) termopneumática e (f) liga com memória de forma. ....	4
Figura 2-3: Imagem retirada de [6]. Válvula biestável de Bohm <i>et al.</i> .....	5
Figura 2-4: Imagem retirada de [7]. Válvula ativa de ferrofluido de Hartshorne <i>et al.</i> ....	5
Figura 2-5: Imagem retirada de [8]. Válvula de esfera de Pan <i>et al.</i> ....	6
Figura 2-6: Imagem retirada de [10]. Válvula hidrofóbica de Andersson <i>et al.</i> .....	7
Figura 2-7: Imagem retirada de [11]. Stopvalve de L. B. Schneider. ....	7
Figura 2-8: Imagem retirada de [12]. <i>Check valve</i> de esfera de Fu <i>et al.</i> .....	8
Figura 3-1: Reservatório com um orifício a uma altura $h$ . ....	11
Figura 3-2: Fluxo laminar dentro de um tubo delgado de raio $a$ e comprimento $L$ . ....	12
Figura 3-3: Reservatório conectado à uma mangueira com uma constrição no final. ....	14
Figura 3-4: Curvas de histerese de um material ferromagnético. ....	15
Figura 3-5: Campo magnético em um ímã permanente esférico. ....	18
Figura 3-6: (a) Partículas de $Fe_3O_4$ sem surfactante e se aglomerando. (b) Partículas de $Fe_3O_4$ revestidas com surfactante, a aglomeração cessa. ....	20
Figura 3-7: Solenóide de Comprimento $L$ e diâmetro $a$ . ....	22
Figura 3-8: Esfera de neodímio com magnetização $M$ dentro de um solenóide. ....	25
Figura 4-1: Bomba microfluídica de Hatch <i>et al.</i> [26]. ....	26
Figura 4-2: Corte transversal do primeiro protótipo do dispensador. Quando o indutor está ligado a esfera se levanta permitindo a passagem da água. ....	27
Figura 4-3: Válvula montada na ponteira de micropipetadora. ....	28
Figura 4-4: Configuração do ferrofluido na esfera de neodímio, a seta representa a direção do dipolo. ....	29
Figura 4-5: Circuito utilizado para medir a indutância. ....	30
Figura 4-6: Montagem do experimento. ....	32
Figura 4-7: Esquema da montagem eletrônica ....	33
Figura 4-8: Dois cilindros com mesmo volume obedecem a relação (41) entre suas dimensões.....	34
Figura 4-9: Medida da pressão máxima de operação da válvula. ....	35

Figura 5-1: Simulação do experimento mostrando a variação na amplitude de um indutor ideal com indutância de 9,153mH a 520Hz e um real com a mesma indutância e uma resistência interna de 4 $\Omega$ .....	42
Figura 5-2: Movimento dentro da câmara da esfera (a) com uma tensão muito alta, (b) com uma tensão ideal. ....	48
Figura 5-3: Vazão $Q$ , velocidade $v$ na entrada e na saída da válvula com diâmetros $l$ . ....	55

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores típicos de intensidade magnética remanente $B_r$ , coercividade $H_c$ e seu produto máximo de energia $HxB$ , adaptado de [19]. ....	17
Tabela 5.1: Características físicas das bobinas testadas.....	36
Tabela 5.2: Características dos fios de cobre esmaltados. ....	37
Tabela 5.3: Coeficientes angulares do ajuste das curvas dos Gráficos 5.1 e 5.2. ....	40
Tabela 5.4: Corrente necessária nas bobinas para gerar um campo magnético de 3,0 mT em sua borda. ....	40
Tabela 5.5: Simulação da indutância de um indutor ideal de 9,153 mH adicionado de diferentes resistências internas. ....	42
Tabela 5.6: Propriedades medidas nos indutores. ....	43
Tabela 5.7: Primeiras medidas realizadas sobre a válvula com a bobina $b4$ . ....	46
Tabela 5.8: Medidas realizadas com a bobina $b4$ , 9V, válvula V1 . ....	47
Tabela 5.9: Medidas realizadas com a bobina $b4$ , 12V, válvula V1. ....	47
Tabela 5.10: Medidas realizadas com a bobina $b6$ , 9V, válvula V2. ....	49
Tabela 5.11: Medidas realizadas com a bobina $b6$ , 8V, válvula V3. ....	49
Tabela 5.12: Medidas realizadas com a bobina $b6$ , 7V, válvula V4. ....	50
Tabela 5.13: Medidas realizadas com a bobina $b6$ , 6V, válvula V5. ....	50
Tabela 5.14: Características de $b6$ nas tensões testadas. ....	51
Tabela 5.15: Massa despejada em um tempo de 132 ms e diferentes pressões, bobina $b6$ , 8V, válvula V6. ....	51
Tabela 5.16: Testes de vazão com a bobina $b6$ , 8 V, válvula V7. ....	53
Tabela 5.17: Vazão calculada das válvulas com a mesma pressão. ....	54
Tabela 5.18: Diferentes válvulas com a bobina $b6$ a 8 V, 1,5 s. ....	56

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5-1: Campo magnético em função da corrente elétrica aplicada nas bobinas <i>b1</i> , <i>b2</i> , <i>b3</i> , <i>b4</i> e <i>b6</i> .....	38
Gráfico 5-2: Tensão em função da corrente elétrica aplicada nas bobinas <i>b1</i> , <i>b2</i> , <i>b3</i> , e <i>b4</i> e <i>b6</i> .....	38
Gráfico 5-3: Campo magnético em função da corrente elétrica aplicada na bobina <i>b6</i> .....	39
Gráfico 5-4: Tensão em função da corrente elétrica aplicada na bobina <i>b6</i> .....	39
Gráfico 5-5: Tensão aplicada no indutor em função de sua pressão de abertura.....	44
Gráfico 5-6: Fluxo de água (Q) dispensada em diferentes pressões .....	52
Gráfico 5-7: Vazão de diferentes válvulas com a mesma pressão. ....	54

# 1. Introdução

Com o desenvolvimento da microtecnologia para circuitos eletrônicos na década de 50, outros microdispositivos baseados em litografia e fotolitografia surgiram, entre eles o primeiro *Lab-on-a-Chip*, um cromatógrafo gasoso apresentado na década de 70 por S. C. Terry[1].

*Lab-on-a-Chip* ou LOC é, como o próprio nome diz, um laboratório dentro de um *chip*. Estes dispositivos trabalham com amostras e reagentes desde escalas micrométricas até picométricas, baixando os custos de produção e a quantidade de reagentes e amostras, ao mesmo tempo que aumentam a velocidade de análise. No entanto somente no começo da década de 90 os LOC começaram a receber atenção da comunidade científica. Foram desenvolvidas microbombas, sensores de fluxo e o princípio de sistemas de análise de fluidos.

A microfluídica passou a ser uma área de interesse para o desenvolvimento dos LOC. O comportamento dos fluidos em escalas pequenas não é o mesmo que em macroescala, em alguns casos, a turbulência na microfluídica é muito pequena e pode ser desprezada. Todavia a capilaridade e a tensão superficial passam a ser forças dominantes. Deste modo foram estudadas novas maneiras de operar dispositivos muito pequenos.

Entre os aparelhos criados para trabalhar em microescala estão as microbombas, que passaram a ser vendidas comercialmente somente em 2003. Misturadores, válvulas e outros mecanismos também têm uma contribuição significativa no funcionamento dos LOC e somadas todas estas possibilidades de manipulação em micro escala, tornam esses LOC extremamente versáteis para uma infinidade de aplicações, que incluem: manipulação de células, sequenciamento genético, análise de DNA e RNA, separação de proteínas, análises de neurônios e ferramentas para diagnósticos de doenças.

## 1.1. Objetivo

Avanços na tecnologia *Lab-on-a-Chip* requerem simplificações e barateamento das técnicas de montagem e operação, para que se tornem comercialmente viáveis, principalmente para aplicações em larga escala.

O desenvolvimento da tecnologia *Lab-on-a-Chip* dentro da Universidade Federal do Paraná despertou o interesse de estudar áreas complementares a tal tecnologia, no caso, uma maneira de dispensar fluido de amostra dentro de um LOC com precisão suficiente.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um dispositivo fluídico capaz de dispensar volumes de água na faixa de 500µl com exatidão, em seguida caracterizar esse dispositivo com relação a variáveis importantes como vazão e pressão. Esta peça poderá ser utilizada como dosador para outro dispositivo microfluídico em desenvolvimento na UFPR em conjunto com a UTFPR e a Fiocruz.

## 1.2. Organização da Dissertação

A dissertação está dividida em 5 partes principais: uma revisão bibliográfica, a introdução teórica, o procedimento experimental, os resultados das medidas e algumas discussões e finalmente as conclusões do trabalho. No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica de válvulas microfluídicas, incluindo válvulas que utilizam materiais e processos semelhantes à válvula desenvolvida neste trabalho. Em seguida no capítulo 3 há uma introdução teórica dos processos mais importantes envolvidos durante o funcionamento da válvula e também relacionados aos testes realizados. O capítulo 4 explica o processo de fabricação do dispositivo com um pequeno histórico de seu desenvolvimento, além de ilustrar o processo de medição e caracterização dos componentes envolvidos. No capítulo 5 temos os resultados das medidas e a análise dos dados, caracterizando os componentes da válvula. Há também alguns questionamentos sobre os processos envolvidos durante as medidas. Finalmente no capítulo 6 as conclusões obtidas durante as fases de construção, medição e redação.

## 2. Revisão Bibliográfica: Válvulas Microfluídicas

Em 1975 S. C. Terry publica seu trabalho de doutorado sobre um cromatógrafo gasoso miniaturizado em um *chip* de vidro. Este trabalho e sua publicação no *Analytical Chemistry* 74 [1] não chamou muita atenção da comunidade científica, mas era o primeiro sistema miniaturizado para separar uma mistura de gases e realizava o processo em poucos segundos [2].

Poucos estudos seguiram o caso do cromatógrafo gasoso, não havendo grandes desenvolvimentos na área por cerca de 15 anos [3]. Em 1990, Manz *et al* com seu cromatógrafo líquido [4], propôs um novo método baseado no trabalho de Terry para realizar medidas em sensores químicos. Enquanto os TAS ou *Total Analysis Systems* dependem de diversos passos de tratamento da amostra até chegar ao sensor para realizar medidas, um sensor que pode realizar esses passos de maneira autônoma certamente traz benefícios ao processo. A ideia de Manz era miniaturizar as fases de preparação da amostra e seus tratamentos consecutivos até os sensores, de maneira que, seria necessário somente uma máquina para fazer a leitura das medidas. Esta técnica ficou conhecida como *micro total analysis systems* ou  $\mu$ TAS[5][4].

Com a redução da escala dos sensores e processos, a quantidade de reagentes requerida é muito menor, o que permite aumentar o número de medidas sob as mesmas condições levando menos tempo para realizá-las, tornando o  $\mu$ TAS muito bem aceito pela comunidade científica.

Assim como resistores, capacitores e indutores são componentes essenciais na eletrônica e microeletrônica, peças como: bombas, válvulas e misturadores são fundamentais para o funcionamento de dispositivos microfluídicos. Cada componente microfluídico possui uma infinidade de variedades, mas o foco principal deste trabalho está nas microválvulas.

A primeira microválvula foi desenvolvida por Terry *et al.* [1] em 1979 em seu trabalho sobre o cromatógrafo gasoso. A partir de um solenóide com pistão, muito semelhante a um relê, conectado a uma membrana flexível, Terry conseguia controlar a válvula aplicando uma corrente elétrica sobre o solenóide, que modificava a posição da membrana abrindo uma passagem para o gás. Este princípio é utilizado amplamente em válvulas comerciais.

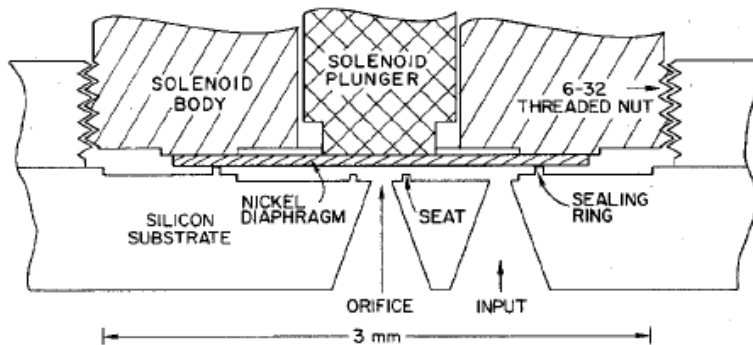


Figura 2-1: Imagem retirada de [1]. Válvula do cromatógrafo gasoso de Terry *et al.*

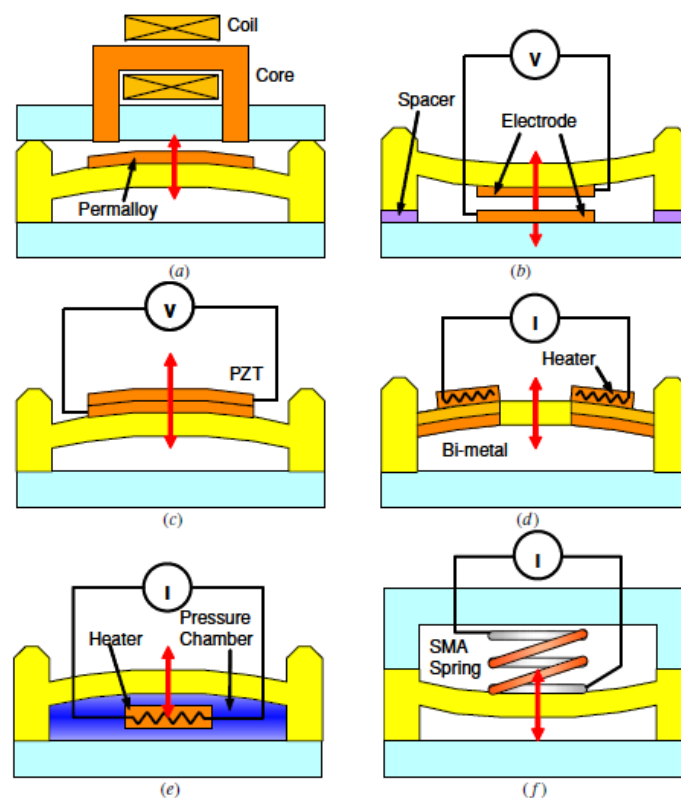


Figura 2-2: Imagem retirada de [3]: Diferentes válvulas que utilizam membranas (em amarelo): (a) eletromagnética; (b) eletrostática; (c) piezoelétrica; (d) bimetálica; (e) termopneumática e (f) liga com memória de forma.

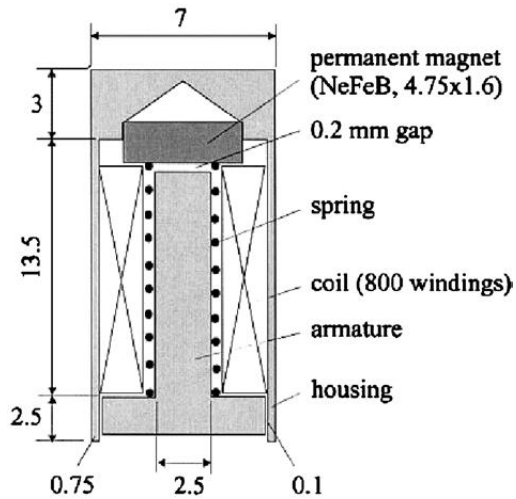


Figura 2-3: Imagem retirada de [6]. Válvula biestável de Bohm *et al.*

Existem duas categorias principais dentro das microválvulas: válvulas ativas e passivas. Válvulas ativas possuem partes mecânicas ou não-mecânicas e são controladas por uma fonte externa, enquanto as passivas não possuem tal fonte e geralmente acompanham o funcionamento de microbombas.

Dentro das válvulas ativas, o design mais comum corresponde a uma

combinação de uma membrana com um material magnético, elétrico, piezoelétrico ou de outros métodos de atuação, como ilustrado na Figura 2-2.

Bohm *et al.* desenvolveu uma válvula magnética que consistia de um ímã de neodímio sobre uma mola esticada, com seu dipolo apontado no mesmo eixo da mola, ilustrada na Figura 2-3, retirada de [6]. Ao aplicar uma corrente em um solenóide de 800 espiras que envolvia a mola, era possível abrir ou fechar uma passagem de 200 $\mu$ m. Quando aplicada a corrente de 500mA por 100ms em um sentido, o ímã era atraído pelo solenóide até vencer a força da mola e interagir com o núcleo de ferro, mantendo a válvula fechada, mesmo sem nenhuma corrente. Aplicado o mesmo pulso no sentido oposto, o ímã era repelido pelo solenóide e somado a força da mola, voltava a seu estado aberto. Esta configuração é chamada de biestável, pois não necessita de alguma fonte entregando energia continuamente para manter um dos estados da válvula, é necessário somente um pulso para a transição entre estados.

Outro exemplo de válvula ativa utiliza ferrofluido como pistão para controlar o fluxo de água (Figura 2-4). Publicado por

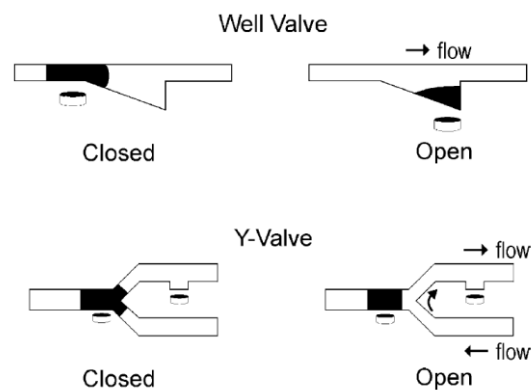


Figura 2-4: Imagem retirada de [7]. Válvula ativa de ferrofluido de Hartshorne *et al.*



Hartshorne *et al.* [7], contava com um ímã que controlava a posição do ferrofluido na válvula, que mudava de estado em um tempo entre 15 s e 30 s. A válvula no formato de poço funcionou em pressões de 8,5 kPa para abrir e 5,0 kPa para fechar, ambas com um campo magnético de 0,28 T. Já a válvula em "Y" operou em 1,5 kPa e acima de 2 kPa observou-se a perda de ferrofluido carregado pelo fluxo de água.

As válvulas passivas geralmente apresentam um comportamento similar a um diodo, permitindo o fluxo somente para um sentido. Um exemplo é uma válvula de esfera, em que para um sentido a esfera permite o fluxo de fluido, porém para o outro sentido a esfera encontra uma constrição que sela a passagem. No caso de Pan *et al.* (Figura 2-5) [8], um tubo cônico com um limitador em seu lado maior e uma esfera de ferro de 0,8 mm dentro desse serve de válvula para uma bomba magnética com funcionamento similar às válvulas de membrana.

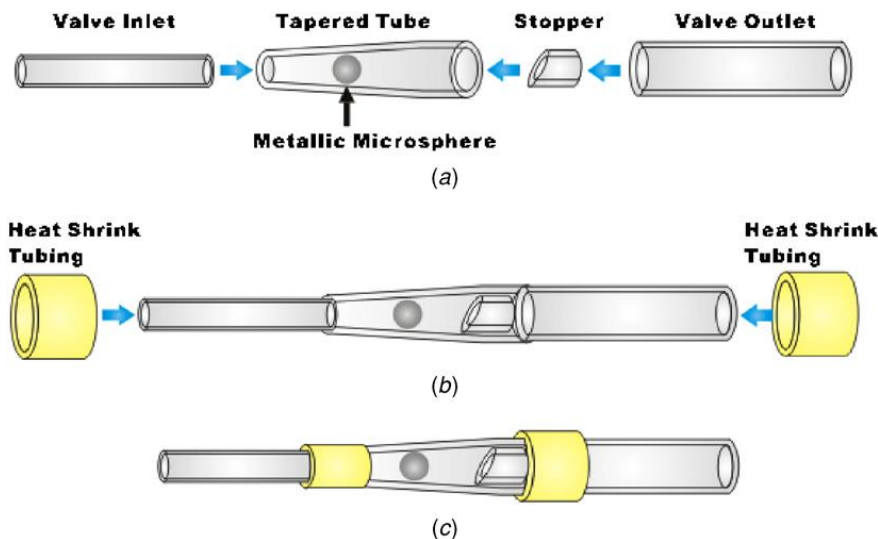


Figura 2-5: Imagem retirada de [8].Válvula de esfera de Pan *et al.*

Em pressões abaixo de 5 kPa a válvula sela completamente a passagem de fluidos. Entre 5 kPa e 30 kPa há um vazamento de menos de  $1 \mu\text{l min}^{-1}$ . Um trabalho semelhante ao de Pan *et al.* [8], é de Yamahata *et al.* [9], que produziu um mecanismo usando jateamento de partículas sobre vidro. Que incluía a bomba e a válvula numa peça única.

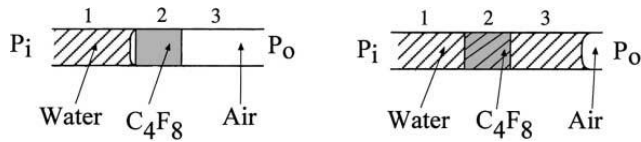


Figura 2-6: Imagem retirada de [10]. Válvula hidrofóbica de Andersson *et al.*

Outro exemplo de válvula passiva é a válvula hidrofóbica de Andersson *et al.* [10], que deposita uma camada de octafluorciclobutano (C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>), utilizando plasma, em uma região específica de um canal. A

região em que foi depositado o C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> é hidrofóbica, enquanto o restante do canal é hidrofílico. Quando a água vinda do lado 1 da Figura 2-6 encontra o material hidrofóbico, o menisco precisa mudar seu ângulo de contato para se adaptar a nova superfície, o que significa um aumento na pressão para passar para o lado 3. Utilizando uma coluna de água os autores determinaram uma pressão de 760 Pa para vencer a barreira de C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, exatamente o calculado na teoria dadas as dimensões do dispositivo, que tem canais com profundidade de 50 μm e largura de 50 a 100 μm.

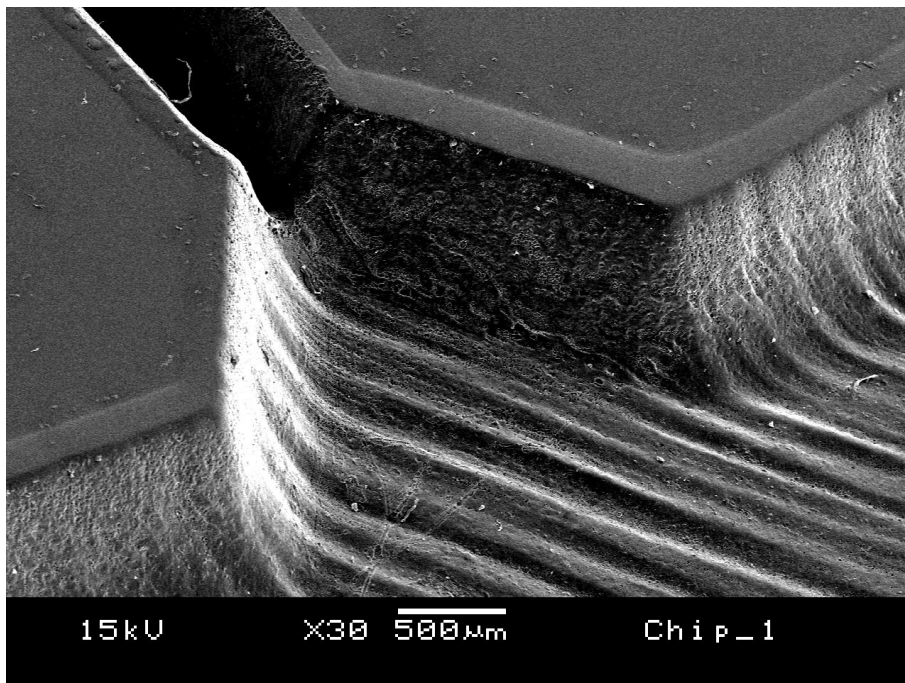


Figura 2-7: Imagem retirada de [11]. Stopvalve de L. B. Schneider.

Um trabalho desenvolvido na UFPR por Leonardo Berlim Schneider em 2010 [11] aproveitou o conceito de modificar o ângulo de contato para obter uma válvula, no caso, uma mudança na geometria cria a barreira de pressão, esta válvula é conhecida como *stopvalve* (Figura 2-7). Quando o menisco caminha por um canal

uniforme ele mantém seu ângulo de contato  $\theta$  constante, de acordo com o material de que é feito o canal. Ao encontrar um aumento na largura do canal o menisco é obrigado a mudar seu ângulo de contato devido à nova geometria e quando vence a barreira de pressão ele retoma o ângulo original  $\theta$ .

O resultado do presente trabalho tem similaridade com a válvula projetada por Fu *et al.* [12], que utiliza uma esfera de ferro de 3 mm controlada por um indutor para alternar os estados da válvula.

A esfera fica assentada acima da passagem de água, selando o fluxo no sentido inverso. Quando há uma pressão mínima de 50 kPa na entrada da válvula, a esfera se levanta e permite a passagem de água, o que a caracteriza como uma *check valve*, com comportamento análogo a um diodo. A válvula foi testada em até 200 kPa de pressão, o indutor consegue fechar a válvula nessa pressão com uma corrente mínima de 300 mA. Já em 50 kPa a corrente mínima no indutor é de 130 mA.

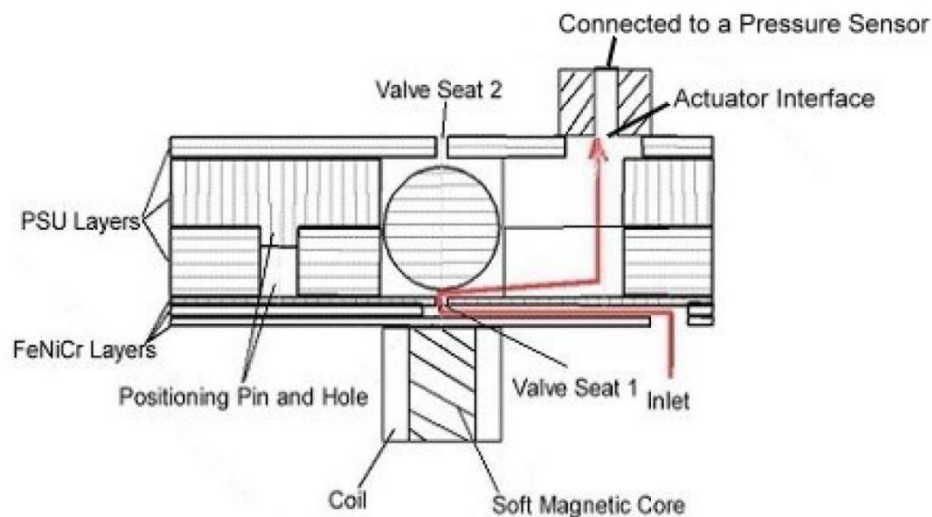


Figura 2-8: Imagem retirada de [12]. *Check valve* de esfera de Fu *et al.*

Algumas das válvulas citadas neste capítulo têm similaridade nos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, embora ainda exista uma grande variedade de microválvulas diferentes e de diversas aplicações.

### 3. Introdução Teórica

Nesta seção são apresentadas as partes mais importantes da teoria envolvida na fabricação, caracterização e funcionamento da válvula, encontrando as justificativas para determinadas escolhas de materiais e métodos. Os principais elementos da válvula são: o ímã esférico de neodímio, o indutor utilizado para controlar a válvula e a geometria da válvula.

Para efeitos de cálculo, as grandezas em negrito são vetores ou campos vetoriais.

#### 3.1. Fluídica

A teoria de fluídica envolvida no funcionamento da válvula será desenvolvida estudando três componentes principais: o reservatório, a mangueira que une o reservatório e a válvula e a válvula em si.

Para estudar fluídica assumimos que a matéria, apesar de ser composta por unidades discretas (átomos, moléculas), possui uma distribuição contínua e avaliamos seu comportamento médio. Essa suposição é conhecida como hipótese do contínuo [13] [14].

O ponto de partida de qualquer sistema dinâmico em fluídica é a equação de Navier-Stokes (1):

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} \quad (1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $\mathbf{v}$  é a velocidade,  $p$  a pressão,  $\mathbf{T}$  o tensor tensão de Cauchy e  $\mathbf{f}$  são forças externas como gravidade ou eletromagnetismo. Como um dos objetos de estudo deste trabalho é água, podemos assumir um fluxo incompressível, uma vez que os efeitos de compressibilidade da água passam a ser notáveis em velocidades na ordem de 1500 m/s e acima. Isso posto, o divergente da velocidade é zero ( $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ ), pois não há variação na densidade do material, vindo da lei de conservação de massa. Recalculando o tensor tensão de Cauchy em (1), encontramos um termo correspondente à viscosidade dinâmica  $\mu$  e adicionando a influência da gravidade temos (2):

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

Considerando então um fluxo constante no tempo, incompressível e não viscoso, podemos reduzir a equação (2) para (3):

$$\nabla \left( \frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + gz \right) = \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{v} \quad (3)$$

O termo dentro do gradiente portanto deve ser constante em linhas de fluxos e linhas de vórtice. Se o fluxo não apresentar vorticidade ( $\nabla \times \mathbf{v} = \mathbf{0}$ ), então a equação (4), conhecida como equação de Bernouli para fluxos incompressíveis, é válida para todo o fluxo.

$$\frac{1}{2} v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = cte \quad (4)$$

Esta equação contém três termos principais: a pressão cinemática, a influência da pressão externa e a pressão gerada pela altura  $z$  da coluna de fluido. A soma destes três termos é constante ao longo de um fluxo constante.

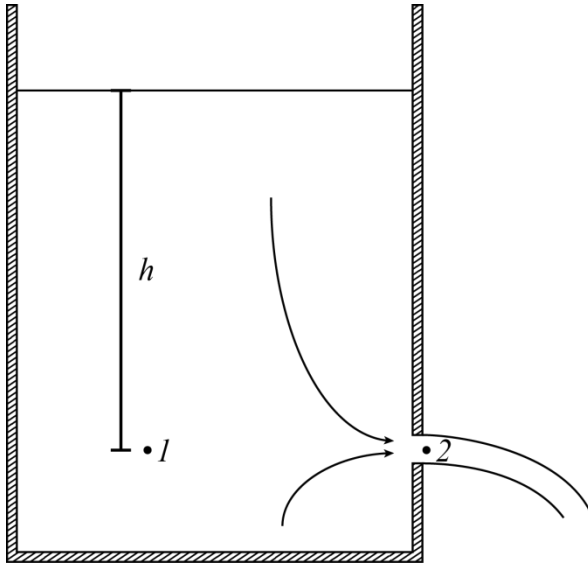


Figura 3-1: Reservatório com um orifício a uma altura  $h$ .

Considerando o caso de um reservatório com uma abertura numa altura  $h$  abaixo da linha da água, como na Figura 3-1, a pressão no ponto 1, na mesma altura da saída da água 2, contém contribuições da pressão atmosférica e da altura da coluna de água. Já no ponto 2, imediatamente após sair do reservatório, há somente a contribuição dos termos cinemáticos e da pressão atmosférica. De acordo com a equação de Bernoulli temos (5), isolando a velocidade encontramos (6).

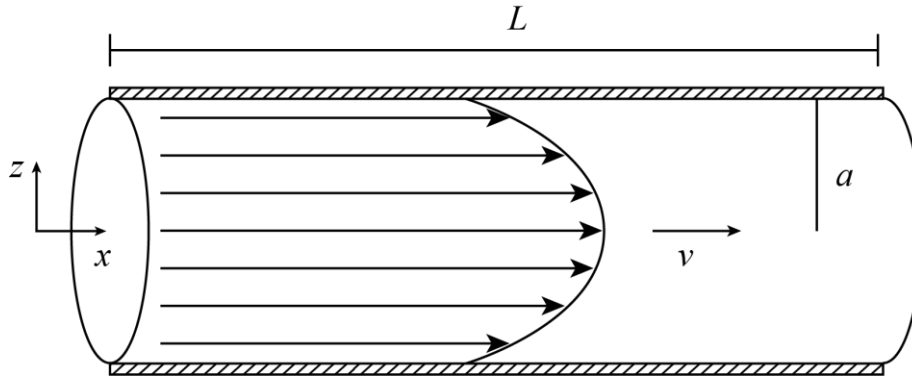
$$\frac{p_{atm}}{\rho} + gh = \frac{1}{2}v^2 + \frac{p_{atm}}{\rho} \quad (5)$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (6)$$

A equação (6) é conhecida como teorema de Torricelli, ela não leva em consideração alguns fatores como a geometria do orifício e viscosidade do fluido, portanto em um caso real há a adição de um coeficiente, chamado de coeficiente de vazão  $C_v$  em (7).

$$v = C_v \sqrt{2gh} \quad (7)$$

Supomos que este fluxo segue por um tubo delgado de raio  $a$  e comprimento  $L$ , como ilustrado na Figura 3-2. Em um tubo suficientemente delgado, a viscosidade do fluido, principalmente em regiões próximas às paredes do tubo, é um fator determinante para o comportamento do escoamento no interior desse.



**Figura 3-2: Fluxo laminar dentro de um tubo delgado de raio  $a$  e comprimento  $L$ .**

Existe um parâmetro adimensional chamado número de Reynolds, também calculado a partir da equação de Navier-Stokes (1), equivalente a uma razão entre a força de inércia e a força de viscosidade, indicando qual a importância de cada um no processo (8) [15][16]:

$$Re = \frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força de viscosidade}} = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (8)$$

Onde  $l$  é o comprimento característico. Diferentes tipos de fluxo podem ser associados ao número de Reynolds, para  $Re > 4000$  a força de inércia é muito maior que a viscosidade, portanto efeitos como a turbulência são dominantes para o comportamento do fluido. Caso  $Re < 2300$ , ocorre um fluxo laminar, ou seja, ele ocorre em camadas paralelas e sem mistura entre elas na escala macroscópica. Quando  $2300 < Re < 4000$ , o fluxo pertence a um estágio intermediário entre o turbulento e o laminar. Considerando água em um tubo com diâmetro de 3 mm e um fluxo com velocidade de 4 cm/s encontramos um valor de  $Re = 168$  portanto seu movimento é laminar.

Em fluxos laminares, a componente não linear da equação de Navier-Stokes (1)  $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ , que representa a turbulência, é igual a zero. O movimento do fluido dentro do tubo delgado, longe de suas bordas de entrada e saída, caracteriza um fluxo de Hagen Poiseuille, onde a solução da equação (2) resulta em (9) que, em coordenadas cilíndricas, torna-se visível um fluxo com formato parabólico como na Figura 3-2. As camadas mais próximas das paredes estão mais lentas que as mais

centrais e fazem um movimento de cisalhamento com as camadas adjacentes, conferindo um formato parabólico para o campo de velocidades.

$$v = \frac{r^2 - a^2}{4\mu} \frac{dp}{dx} \quad (9)$$

Definimos o fluxo volumétrico como (10).

$$Q = A \cdot v \qquad Q = \int_0^a v 2\pi r dr \quad (10)$$

Onde  $A$  é a área da secção transversal atravessada por  $v$ . A queda de pressão ao longo do tubo é constante, substituindo (9) em (10):

$$Q = \frac{\pi a^4 \Delta p}{8\mu L} \quad (11)$$

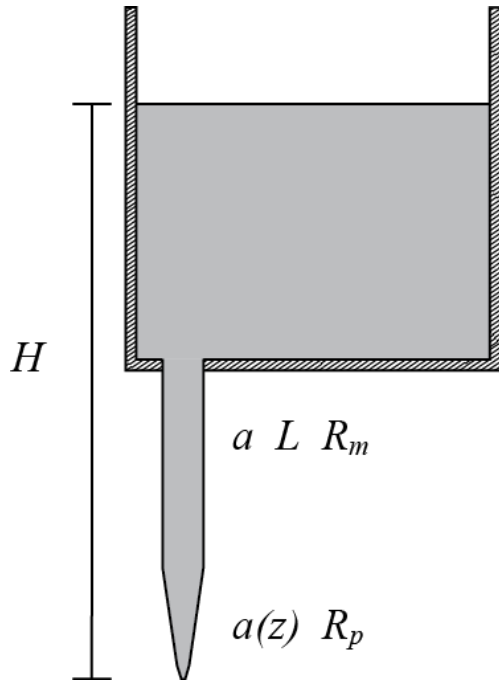
Consideramos que no final desta mangueira há uma constrição com uma geometria diferente, onde o raio  $a$  é uma função de  $x$ ,  $a(x)$ . Não podemos escrever o fluxo volumétrico como na equação (11), mas podemos associar a outra constante chamada de resistência hidráulica  $R_{hyd}$  na equação (12), que é análoga a resistência elétrica na lei de Ohm.

$$\Delta p = R_{hyd} Q \quad (12)$$

Temos portanto três componentes neste sistema: o reservatório, a mangueira de diâmetro  $a$  e comprimento  $L$  e por último a constrição. Mudando a orientação da mangueira, agora apontando para baixo como na Figura 3-3. O fluxo volumétrico na mangueira e no final da constrição é o mesmo, a pressão total então é (13):



$$\Delta p_T = \Delta p_m + \Delta p_p = R_m Q_m + R_p Q_p = (R_m + R_p) Q_p \quad (13)$$



Onde os termos com índice  $m$  são referentes ao tubo, e com índice  $p$  são referentes à constrição e  $\Delta p_T$  é a variação de pressão total entre a linha de água e a extremidade da constrição, com altura  $H$ . Os efeitos da saída do reservatório para o tubo, calculados com a equação de Torricelli (4), serão incluídos na resistência hidráulica do tubo  $R_m$ .

A resistência hidráulica total do sistema é (14):

Figura 3-3: Reservatório conectado à uma mangueira com uma constrição no final.

$$R_m + R_p = \frac{\rho g H}{Q_p} \quad (14)$$

A partir destas equações e conhecendo algumas constantes podemos determinar as pressões em diferentes pontos do sistema, assim como a resistência hidráulica da constrição  $R_p$ .

### 3.2. Ímãs de NdFeB

Para o funcionamento da válvula microfluídica desenvolvida neste trabalho, foi utilizado um ímã permanente de neodímio ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) [17] esférico, que também é conhecido como ímã de terra rara. Para entender suas propriedades temos que começar tratando de materiais magnéticos, mais especificamente de ferromagnetismo.

Materiais ferromagnéticos possuem regiões chamadas domínios magnéticos, cada um desses domínios está completamente magnetizado e seus momentos de dipolo apontam para direções aleatórias em princípio. Em escala macroscópica, a densidade dos momentos de dipolo magnético pode ser observada na grandeza magnetização  $\mathbf{M}$  que corresponde à uma fração do campo total  $\mathbf{B}$  medido segundo a equação (15) [18]:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (15)$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo,  $\mathbf{B}$  é denominado campo de indução magnética e  $\mathbf{H}$  é a intensidade magnética aplicada.

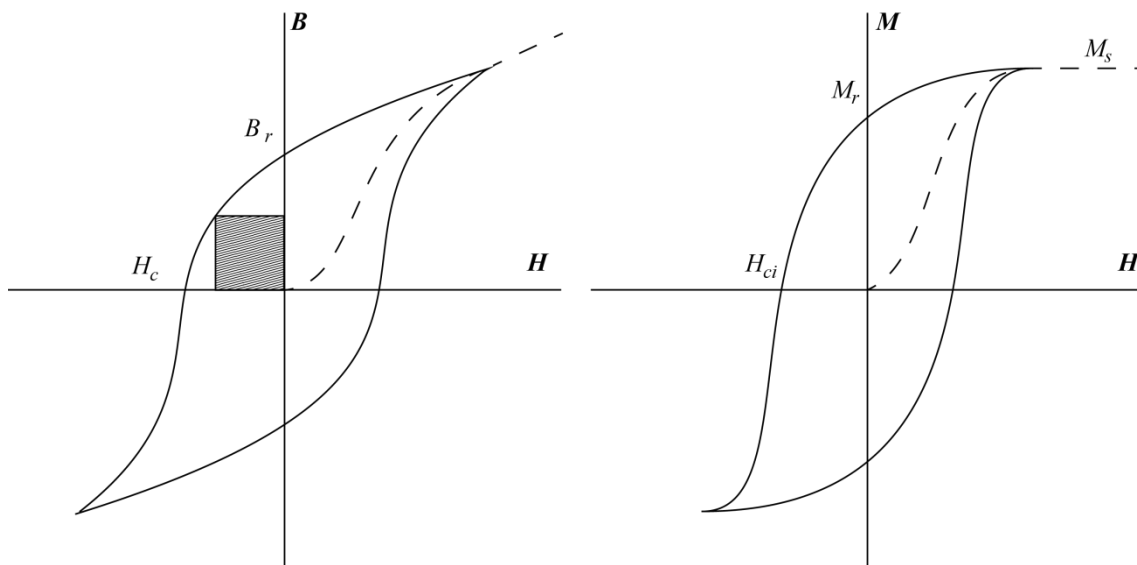


Figura 3-4: Curvas de histerese de um material ferromagnético.

Aplicando um campo magnético externo  $\mathbf{H}$  e considerando um material ferromagnético não magnetizado, seus domínios magnéticos passam a se alinhar no mesmo sentido do campo aplicado e esse começa a se magnetizar, como mostrado na linha tracejada da Figura 3-4. Se aplicado um campo magnético grande o suficiente, ocorre a saturação da magnetização, portanto  $\mathbf{B}$  passa a crescer linearmente com  $\mathbf{H}$ , enquanto  $\mathbf{M}$  permanece constante com o valor  $M_s$  Chamado de magnetização de saturação.

Em seguida, quando a intensidade magnética aplicada sobre o material cai para zero, de acordo com a equação (16), ainda há magnetização no material, o que chamamos de magnetização remanente  $M_r$  e indução remanente  $B_r$ .

$$\mathbf{H} = 0 \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{M} \quad B_r = \mu_0 M_r \quad (16)$$

Ao inverter o sentido do campo magnético aplicado, há um ponto em que a indução medida é zero como na equação (17), este valor corresponde à coercividade do material  $H_c$ . Neste ponto a magnetização  $\mathbf{M}$  é anulada pelo campo de intensidade magnética  $\mathbf{H}$ .

$$\mathbf{B} = 0 \quad \mathbf{H} = -\mu_0 \mathbf{M} \quad H_c = \mu_0 M \quad (17)$$

Aumentando um pouco mais o campo de intensidade magnética, a magnetização do material passa a ser zero, denominamos este ponto como coercividade intrínseca  $H_{ci}$  e o material volta seu estado desmagnetizado, o valor da coercividade intrínseca está relacionado com o campo de indução magnética de acordo com a equação (18).

$$\mathbf{M} = 0 \quad \mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \quad H_{ci} = \frac{B}{\mu_0} \quad (18)$$

Se continuarmos a aumentar o campo magnético aplicado no sentido oposto, aparecerá uma curva simétrica a anterior, a combinação de ambas as curvas é conhecida como curva de histerese, ilustrada na Figura 3-4.

Ímãs permanentes como as ferrites e os de neodímio são conhecidos por terem um alto campo remanente  $B_r$  e uma alta coercividade  $H_c$ , dificultando sua desmagnetização. Na Tabela 3.1 temos valores típicos de coercividade e remanência para ímãs permanentes.

**Tabela 3.1: Valores típicos de intensidade magnética remanente  $B_r$ , coercividade  $H_c$  e seu produto máximo de energia  $H \times B$ , adaptado de [19].**

Material	Composição	$B_r$ (T)	$H_c$ (kA/m)	$B \cdot H$ max (kJ/m <sup>3</sup> )
Aço	Fe-1% C	0,9	4	1,6
Aço 36 Co	36 Co, 3,75 W, 5,75Cr, 0,8C	0,96	18	7,4
Alnico 2	12 Al, 26 Ni, 3 Cu, 63 Fe	0,7	52	13
Alnico 5	8 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, 50 Fe	1,2	57	40
Ba-ferrite	BaO · 6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	19	28
PtCo	77 Pt, 24Co	0,6	340	76
Remalloy	12 Co, 17 Mo, 71 Fe	1	18	8,7
Vicalloy 2	13 V, 52 Co, 35 Fe	1	36	24
Cobalto Sámario	Co <sub>5</sub> Sm	0,9	690	159
Neodímio Ferro Boro	Fe <sub>14</sub> Nd <sub>2</sub> B <sub>1</sub>	1,3	1100	318

O produto máximo  $B \cdot H$ , correspondente à área sombreada na Figura 3-4, é a energia potencial máxima do material, um parâmetro muito usado pela indústria para determinar a qualidade dos ímãs permanentes. O íma de neodímio é certamente o mais energético nesse quesito, superando em mais de 10 vezes o valor do ferrite.

Ao aquecer um ímã permanente, os domínios magnéticos tendem a mudar sua orientação devido à agitação térmica, causando a desmagnetização do ímã. A temperatura em que isto ocorre é conhecida como temperatura de Curie ou ponto de

Curie. Este é um fator que limita o uso dos ímãs de neodímio, pois seu ponto de Curie é de 313 °C, relativamente baixo quando comparado a outros materiais como a liga de cobalto e samário cuja temperatura de Curie é 727 °C. Para aplicações em temperatura ambiente este fator não interfere na magnetização do material.

Um ímã permanente esférico, com um campo uniforme em seu interior, tem seu campo magnético externo como ilustrado na Figura 3-5, similar a um dipolo ideal, cujo campo de indução magnética é dado pela equação (19):

$$\mathbf{B}_d(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} (2\cos\theta\hat{\mathbf{r}} + \sin\theta\hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (19)$$

Também pode ser escrita como (20):

$$\mathbf{B}_d(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3(\mathbf{m} \cdot \hat{\mathbf{r}})\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{m}] \quad (20)$$

Desde seu desenvolvimento na década de 80, os ímãs de neodímio vêm ganhando popularidade pelo seu custo cada vez menor. Os ímãs de ferrite como  $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  podem ser encontrados combinados com plásticos em ímãs de geladeira. Os ferrites ainda representam uma grande fatia do mercado, principalmente por seu custo extremamente baixo, mas comparadas com os ímãs de neodímio, elas têm a remanência e a coercividade muito menor.

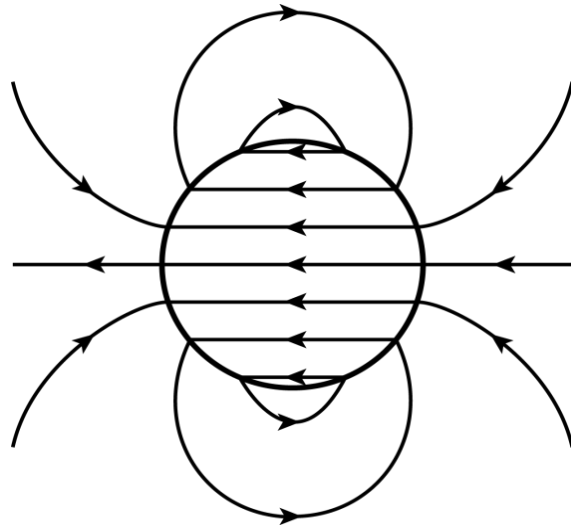


Figura 3-5: Campo magnético em um ímã permanente esférico.

O interesse de que o ímã utilizado neste trabalho tenha uma alta magnetização fica mais claro na seção 3.5, na qual trataremos da interação entre um ímã e um campo magnético gerado por um solenóide.

### 3.3. Ferrofluido

Operando juntamente com o ímã de neodímio, será utilizado ferrofluido com a função de vedar a válvula. Esse material é uma solução coloidal, composto principalmente por nanopartículas de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e algumas vezes misturadas com hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em dimensões padrão de cerca de 10 nm, dispersas em um meio que pode variar dependendo da aplicação desejada. O ferrofluido possui características paramagnéticas, pois as partículas são atraídas por um campo magnético, mas sem este campo externo a agitação térmica impede que os dipolos magnéticos das nanopartículas permaneçam orientados, impedindo uma aglomeração magnética. Os movimentos Brownianos em temperatura ambiente impedem que haja a decantação das nanopartículas, mantendo o colóide estável. Quando aplicado um campo magnético externo  $H$ , os momentos de dipolo magnético se alinham, no entanto a susceptibilidade magnética do material é muitas vezes maior que a de um material paramagnético, por isso, esta classe de materiais é chamada de materiais superparamagnéticos [20].

O primeiro ferrofluido foi desenvolvido pela NASA na década de 60, atualmente serve à diversas máquinas, de vedações de eixos até motores de discos rígidos. Talvez seu uso mais popular seja na forma de tinta para algumas impressoras. Há inclusive um relato onde o ferrofluido é usado para separar diamantes da areia na África do Sul [21].

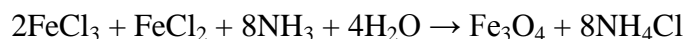
As partículas do colóide estão em um equilíbrio de forças atrativas (van der Waals e dipolo-dipolo) e repulsivas (eletrostática e efeitos estéricos), caso os dipolos magnéticos sejam fortes demais devido às dimensões das nanopartículas, pode haver uma aglomeração magnética. O diâmetro padrão das nanopartículas para evitar a aglomeração magnética pode ser encontrado na equação abaixo:

$$D \lesssim \left( \frac{72k_B T}{\pi\mu_0 M^2} \right)^{1/3} \quad (21)$$

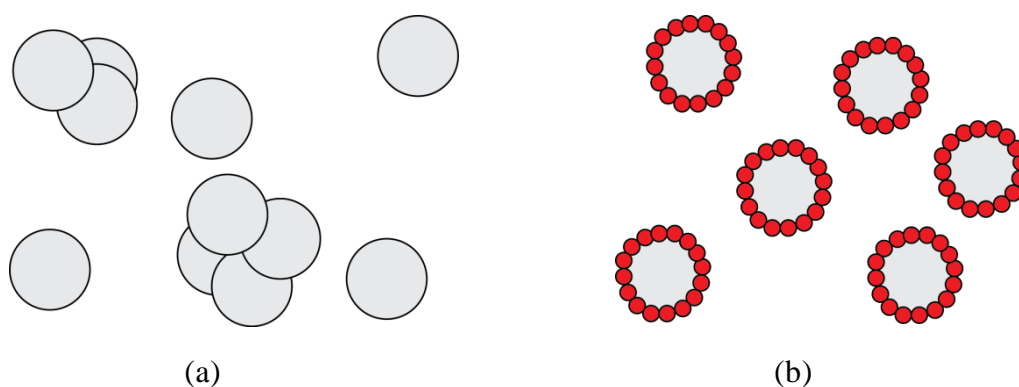
Onde  $k_B$  é a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura,  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vácuo e  $M$  a magnetização. Nesta equação temos componentes que

correspondem à energia térmica e a interação magnética. Inserindo valores típicos para um ferrofluido obtém-se um valor de  $D \lesssim 10nm$  [22].

A produção de nanopartículas de magnetita pode ser obtida por uma reação química entre cloreto de ferro III, cloreto de ferro II, água e amônia de acordo com a seguinte equação química:



Ao adicionar amônia na solução de  $FeCl_2 + FeCl_3$ , ocorre a precipitação e o crescimento das nanopartículas de  $Fe_3O_4$ , a solução permanece em agitação e a uma temperatura controlada até que as nanopartículas atinjam o tamanho desejado. Nesta fase as partículas estão dispersas em água, o que não é interessante para a aplicação desejada neste trabalho, pois as nanopartículas seriam levadas pela água durante a abertura da válvula, outro problema é que as nanopartículas continuam a crescer, gerando partículas maiores com o passar do tempo. É utilizado então um surfactante, que reveste cada nanopartícula e interage com repulsão eletrostática às nanopartículas vizinhas, impedindo assim que essas continuem a se aglomerar.



**Figura 3-6: (a) Partículas de  $Fe_3O_4$  sem surfactante e se aglomerando. (b) Partículas de  $Fe_3O_4$  revestidas com surfactante, a aglomeração cessa.**

De acordo com a escolha do surfactante, é possível manter as partículas na água, transferí-las para o óleo ou até para ligas de metais líquidos como mercúrio ou gálio. O interesse deste trabalho é que as partículas fiquem em um meio que não é

solúvel em água, então são usados surfactantes como ácido oleico e tetrametilamônia que tornam as nanopartículas solúveis em óleo.

Por último é acrescentado o óleo em que as partículas ficarão dispersas, assim após algum tempo e agitação, as partículas passam da água para o óleo. Informações mais detalhadas sobre o processo de fabricação do ferrofluido pode ser encontrado em [20].

### 3.4. Indutores

Para controlar a válvula será utilizado um indutor atuando sobre a esfera de neodímio e o ferrofluido. Portanto, calcularemos como se relaciona o campo de indução magnética de um indutor a partir de suas características físicas.

A partir da lei de Biot-Savart (22), podemos encontrar o valor da indução magnética em um fio condutor com corrente elétrica de acordo com sua geometria.

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{L} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (22)$$

Onde  $I$  é a corrente no fio condutor e  $d\mathbf{L}$  é um elemento de comprimento do fio condutor. Podemos integrar esta equação para uma espira circular de raio  $a$  em um ponto sobre o eixo  $z$  e obtemos (23):

$$\mathbf{B}(z) = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{a^2}{(z^2 + a^2)^{3/2}} \hat{\mathbf{z}} \quad (23)$$

Um indutor consiste em um somatório de diversas espiras, como visto na Figura 3-7. Se integrarmos  $N$  espiras de um indutor com um comprimento  $L$  num ponto  $z_0$  teremos (24) [24]:



$$B_z(z_0) = \frac{\mu_0 NI}{2L} \int_0^L \frac{a^2 dz}{[(z_0 - z)^2 + a^2]^{3/2}} \quad (24)$$

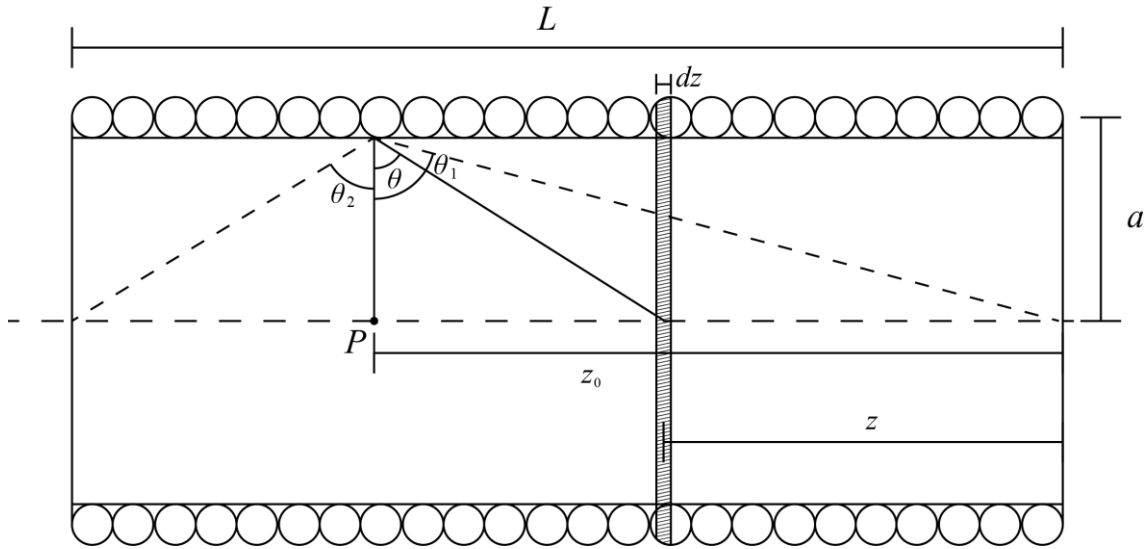


Figura 3-7: Solenóide de Comprimento  $L$  e diâmetro  $a$ .

Fazendo uma mudança de variáveis (25) e considerando o lado direito da Figura 3-7 como a parte negativa da tangente temos (26):

$$z_0 - z = -a \operatorname{tg} \theta \quad \operatorname{tg} \theta_1 = -z_0/a \quad \operatorname{tg} \theta_2 = \frac{(L - z_0)}{a} \quad (25)$$

$$B_z(z_0) = \frac{\mu_0 NI}{2L} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta = \frac{\mu_0 NI}{L} \left[ \frac{\sin \theta_2 - \sin \theta_1}{2} \right] \quad (26)$$

Substituindo os valores de  $\sin \theta_1$  e  $\sin \theta_2$  como funções de  $z_0$  (27):

$$\sin \theta_1 = -\frac{z_0}{\sqrt{a^2 + z_0^2}} \quad e \quad \sin \theta_2 = \frac{(L - z_0)}{\sqrt{a^2 + (L - z_0)^2}} \quad (27)$$

Portanto o campo de indução magnética em um ponto  $z_0$  no eixo  $z$  de um solenóide é (28). Como os indutores utilizados tem núcleo de ar, não há contribuição da magnetização e o campo de intensidade magnética é (29):

$$B_z(z_0) = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left( \frac{(L - z_0)}{\sqrt{a^2 + (L - z_0)^2}} + \frac{z_0}{\sqrt{a^2 + z_0^2}} \right) \quad (28)$$

$$H_z(z_0) = \frac{NI}{2L} \left( \frac{(L - z_0)}{\sqrt{a^2 + (L - z_0)^2}} + \frac{z_0}{\sqrt{a^2 + z_0^2}} \right) \quad (29)$$

Dois pontos de interesse no estudo são as bordas do indutor, a partir da equação (28) podemos determinar uma aproximação do valor de indução magnética. De acordo com as dimensões do indutor e da corrente aplicada chegamos em (30):

$$B_z(0) = B_z(L) = \frac{\mu_0 NI}{2\sqrt{a^2 + L^2}} = CI \quad (30)$$

Uma das medidas realizadas neste trabalho é a do comportamento do campo magnético na borda dos indutores em função da corrente elétrica, chamamos de  $C$  o coeficiente angular que será medido. Outro ponto crucial é o local onde a indução magnética é máxima, derivando (28) e igualando a zero encontramos um ponto crítico (31):

$$\frac{dB_z}{dz_0}(z_0) = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left( \frac{a^2}{(a^2 + z_0^2)^{3/2}} - \frac{a^2}{[a^2 + (L - z_0)^2]^{3/2}} \right) = 0 \quad (31)$$

Resolvendo (31) encontramos  $z_0 = L/2$ , o ponto de máximo então é exatamente no meio do indutor, onde a indução magnética é (32):

$$B_z\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{a^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} = 2B_z(0) \frac{\sqrt{a^2 + L^2}}{\sqrt{a^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} \quad (32)$$

Com os campos magnéticos da esfera e do indutor determinados, podemos ver como ocorre a interação entre eles.

### 3.5. Interação entre Indutor e Ímã

Submetendo um ímã esférico com magnetização  $\mathbf{M}$  a um campo magnético  $\mathbf{B}$ , a energia do sistema e a força sobre o ímã são (33) [25]:

$$U = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B} \quad \mathbf{F} = -\nabla U = \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}) \quad (33)$$

Vamos fazer a seguinte aproximação: considerar o campo gerado pelo indutor como uniforme em  $xy$  e apontando somente no eixo  $z$ , como na Figura 3-8. Inserindo um ímã esférico de raio  $d$  com magnetização uniforme e seu dipolo apontando no eixo  $z$  no interior do solenóide, de acordo com (28), o produto interno  $\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}$  só terá componentes em  $z$  (34):

$$\mathbf{F} = \nabla(m_z B_z) = (m_z \nabla B_z + B_z \nabla m_z) \quad (34)$$

Este resultado é importante pois mostra que a força depende não somente da intensidade magnética aplicada, mas também do momento magnético do ímã e de seus gradientes. Desconsideraremos os efeitos de uma mudança na magnetização da esfera devido ao campo externo, então o gradiente da magnetização é zero. Podemos

aumentar a força sobre a esfera aumentando o gradiente no campo magnético do solenóide ou com um ímã permanente com uma magnetização maior.

Um alto gradiente do campo magnético, pode ser obtido ao reduzir as dimensões  $L$  e  $a$  do indutor. Outra maneira de aumentar o gradiente, é escolher um

fio mais fino, aumentando a quantidade de espiras  $N$  por unidade de comprimento.

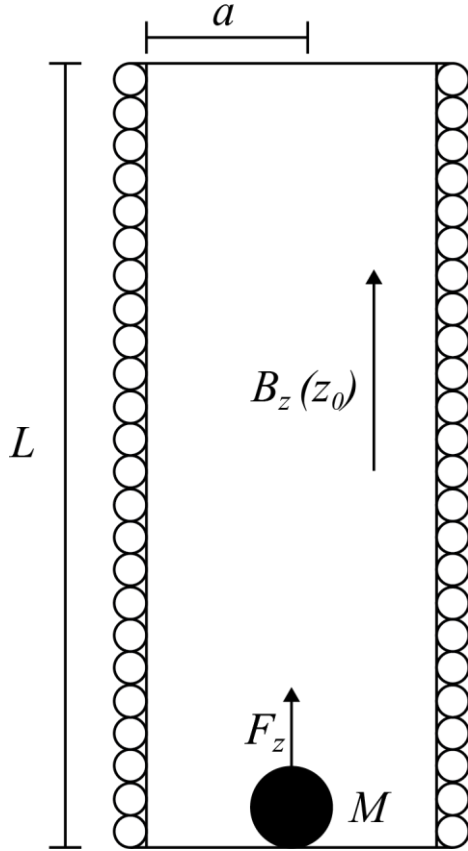


Figura 3-8: Esfera de neodímio com magnetização  $M$  dentro de um solenóide.

Considerando que o dipolo magnético está apontado no eixo  $z$ , os efeitos de torque não existem. A partir do campo magnético gerado pelo dipolo, podemos encontrar o momento de dipolo magnético no eixo  $z$ , a partir do campo gerado por um dipolo magnético (20), calculamos seu momento de dipolo com  $\mathbf{m} = m\hat{z}$  e  $\mathbf{r} = \mathbf{z}$  (35):

$$\mathbf{m} = \frac{\pi d^3}{4\mu_0} B_{ds} \hat{z} \quad (35)$$

Onde  $B_{ds}$  é o campo na superfície do ímã esférico. Diferenciando (28) em relação a  $z$  e retomando a equação (34) obtemos (36), que mostra que a força sobre a esfera sempre vai

apontar para o meio do indutor, em  $z_0 = L/2$ , onde sua força é zero.(33)

$$\mathbf{F} = \frac{B_{ds}\pi d^3 N I a^2}{8L} \left( \frac{1}{(a^2 + z_0^2)^{3/2}} - \frac{1}{[a^2 + (L - z_0)^2]^{3/2}} \right) \hat{z} \quad (36)$$

## 4. Procedimento Experimental

### 4.1. Evolução dos Protótipos

Foram discutidas diversas maneiras de abordar o problema, cujo objetivo era despejar um volume de cerca de 0,5 ml de água em um pequeno *Lab on a Chip* desenvolvido na UFPR, de maneira consistente e que pudesse ser ajustado.

Várias maneiras mecânicas e não mecânicas foram estudadas, uma das idéias iniciais era baseada em uma publicação de Hatch *et al.* [26], de junho de 2001. A

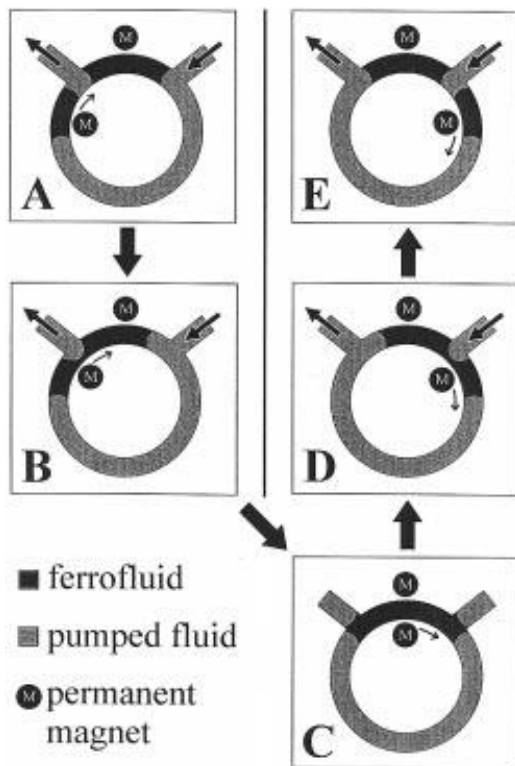


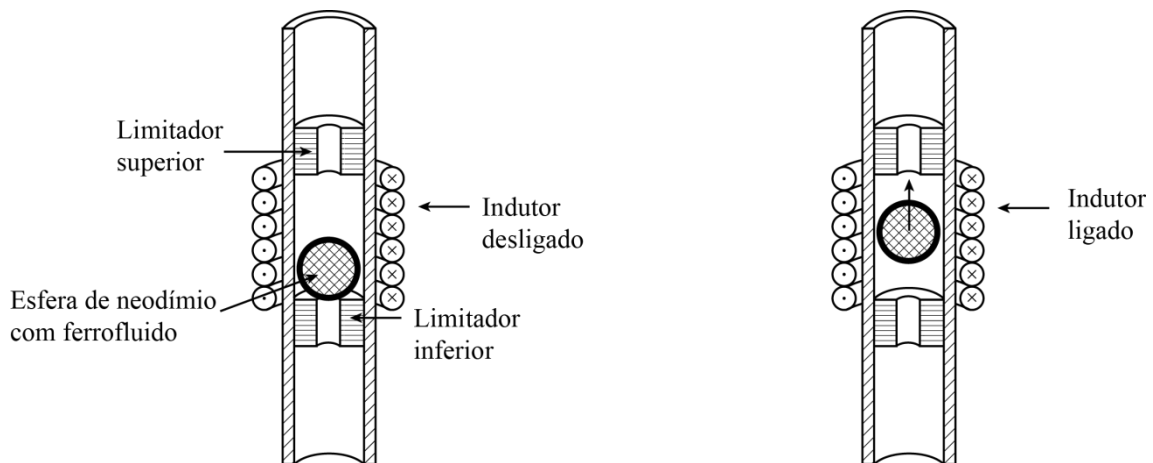
Figura 4-1: Bomba microfluídica de Hatch *et al.*[26].

idéia dos autores era de usar ferrofluido dentro de um pequeno canal circular com duas saídas, utilizando-se de um ímã permanente móvel, deslocar o ferrofluido de maneira a obter um fluxo contínuo de fluido (Figura 4-1). Com um ímã acoplado a um motor, os autores estudaram o comportamento do dispositivo em 4 e 8 rotações por minuto em ambos os sentidos. Rotações mais altas foram descartadas, pois o ferrofluido não conseguia acompanhar o movimento do ímã. O fluxo máximo de escoamento foi de 22,5  $\mu\text{l}/\text{min}$  e 45,8  $\mu\text{l}/\text{min}$ , a pressão máxima de 117 e 135 mm de água numa coluna instalada em cada saída do *chip*, em rotações de 4 e 8 RPM respectivamente.

Este modelo foi testado para

entender como o ferrofluido se comportava, mas para a funcionalidade que desejávamos, o fluxo era muito baixo. Então foi desenvolvido outro protótipo com canais maiores e uma mudança crucial no design, desta vez um ímã de 3 mm estaria dentro do dispositivo para obter uma resposta rápida à aplicação de um campo magnético externo, o ferrofluido envolvia o ímã para a vedação do canal. O protótipo não chegou a ser testado extensivamente, pois foi trocada a idéia de bombear o fluido por simplesmente dispensá-lo. Utilizando-se da gravidade como força motriz, é preciso somente uma válvula para dispensar a quantidade necessária. O novo protótipo, montado no interior de uma mangueira, como ilustrado na Figura 4-2, contém dois limitadores que mantêm uma esfera de neodímio de 3 mm envolvida por ferrofluido enclausurada em uma região específica, por fora um indutor controla a posição da esfera, abrindo ou fechando a válvula.

Os limitadores não possuem um encaixe perfeito com a esfera de neodímio, por esse motivo, é utilizado ferrofluido sobre a esfera. O ferrofluido se molda nas imperfeições tanto da esfera quanto do limitador, vedando a válvula.



**Figura 4-2: Corte transversal do primeiro protótipo do dispensador. Quando o indutor está ligado a esfera se levanta permitindo a passagem da água.**

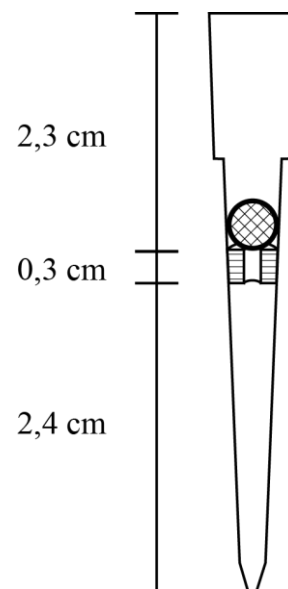
A próxima e última etapa na evolução do protótipo foi a adaptação para a aplicação desejada. Ao invés de desenvolver a válvula no interior de uma mangueira, o sistema foi montado em uma ponteira de micropipetador, tornando-a uma peça descartável e de fácil manuseio. A estrutura cônica da ponteira também favorecia a vedação da válvula, uma tarefa difícil de ajustar no caso da mangueira.

Os indutores utilizados também passaram por aperfeiçoamentos. Primeiramente foram testados indutores retirados de relês, em seguida um indutor enrolado a mão a partir de uma carretilha de máquina de costura, com o diâmetro interno de 7 mm . A carretilha foi escolhida pois se encaixava perfeitamente na ponteira do micropipetador na altura ideal para realizar as medidas. Ao perceber que a carretilha apresentava resultados muito melhores que outros indutores testados, foi encomendada uma carretilha enrolada em uma máquina com um fio mais fino, para obter medidas consistentes e um padrão que pode ser requerido pela a indústria.

#### 4.2. Confecção do Dispositivo

A construção do dispensador começa com uma ponteira para micropipeta da marca Gilson modelo D200, para até 200  $\mu\text{l}$ , em seguida inserimos um limitador, ele consiste em uma peça de mangueira de poliuretano com 3 mm de diâmetro externo e 3 mm de altura colocada a 2,3 cm abaixo da borda superior da ponteira. Em seguida, colocamos uma esfera de neodímio de 3 mm de diâmetro e despejados 4  $\mu\text{l}$  de ferrofluido sobre a esfera. A mangueira que se liga na válvula funciona como um limitador superior. O resultado final fica como na Figura 4-3.

Encontrou-se a posição do limitador através de diversos testes, começando da posição mais profunda, onde a esfera quase não tocava o limitador, e subindo lentamente até que esfera não ficasse presa na estrutura cônica da ponteira se pressionada. Ainda assim, há uma margem de cerca de um milímetro para cima na posição do limitador que não compromete o funcionamento do mesmo. A altura do limitador é a que assenta bem na estrutura da ponteira sem deformá-la. A quantidade

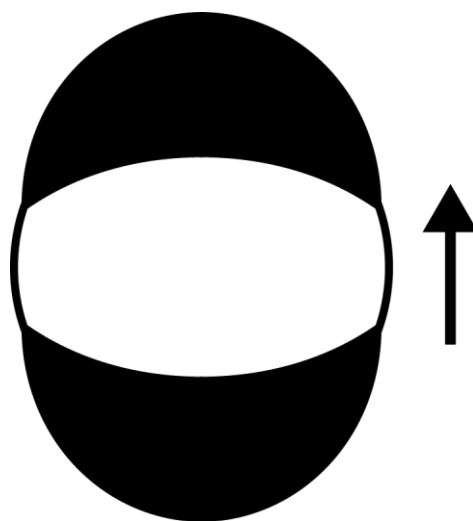


**Figura 4-3: Válvula montada na ponteira de micropipetadora.**

de ferrofluido foi determinada de uma maneira semelhante à posição do limitador, despejando desde 1  $\mu\text{l}$  e subindo em incrementos de 1  $\mu\text{l}$ .

Ao depositar o ferrofluido sobre a esfera, o material tende a se concentrar nas extremidades do dipolo, onde há uma densidade maior de linhas de campo. Como o mecanismo opera no eixo vertical, a vedação ocorre devido ao contato do ferrofluido com o limitador. Em raros casos, ocorreram falhas na vedação devido a um desalinhamento na orientação do dipolo e uma quantidade insuficiente de ferrofluido.

Esta ponteira funciona em conjunto com um indutor que envolve a ponteira na altura da esfera e induz uma força sobre a esfera quando ligado.



**Figura 4-4:** Configuração do ferrofluido na esfera de neodímio, a seta representa a direção do dipolo.

### 4.3. Caracterização do Indutor

Antes de começar os testes sobre a válvula, foram estudados diversos indutores com a finalidade de determinar suas características e manter a consistência dos testes sobre a válvula. Uma das características requisitadas era uma força suficiente para erguer a esfera de neodímio, somada a força para resistir o peso da coluna de água acima da esfera, ao mesmo tempo em que não poderia exceder as correntes máximas suportadas pelos fios esmaltados. O indutor escolhido foi o que obteve a maior eficiência, indutância e impedância e a maior força sobre a esfera de neodímio de acordo com as experiências.



Utilizando uma fonte de tensão, um multímetro e uma sonda *Hall*, foi medida a variação da corrente e do campo magnético na borda dos indutores em função da tensão aplicada.

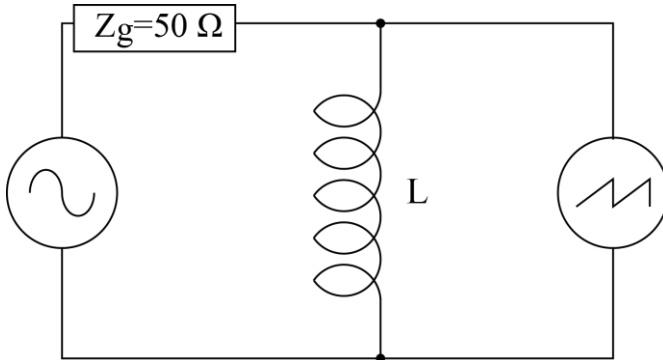


Figura 4-5: Circuito utilizado para medir a indutância.

A indutância é calculada com um gerador de função *Tectronix CFG 253* com uma impedância conhecida e um osciloscópio *HP 54600B*, como na Figura 4-5: Circuito utilizado para medir a indutância. Inicialmente é ajustada a amplitude para 1 V e a frequência para 20 kHz, monitoradas no

osciloscópio. Em seguida adiciona-se o indutor em paralelo com a montagem e abaixa-se a frequência até que a amplitude esteja em 0,5 V. O osciloscópio mede a queda de tensão no indutor e, sabendo a amplitude gerada na fonte foi possível calcular a indutância a partir da razão (37):

$$\left| \frac{V_L}{V_g} \right| = \frac{|Z_L|}{|Z_g + Z_L|} \quad (37)$$

Onde  $V_L$  é a queda de tensão no indutor, medida pelo osciloscópio,  $Z_L$  é a impedância do indutor,  $V_g$  é a tensão aplicada pelo gerador de função e  $Z_g$  é a impedância do gerador de função.

A impedância de um indutor real é a soma de um termo real, que equivale a resistência do fio e um termo imaginário, que se chama reatância indutiva e equivale a indutância multiplicada pela frequência angular (38).

$$Z_L = R_L + iX_L \quad X_L = \omega L \quad (38)$$

No caso do gerador de função, sua impedância é puramente resistiva, sua contribuição portanto é somente  $R_g$ . Substituindo (38) em (37) temos (39):

$$\left| \frac{V_L}{V_g} \right| = \frac{|R_L + iX_L|}{|R_g + R_L + iX_L|} = \sqrt{\frac{R_L^2 + \omega^2 L^2}{(R_g + R_L)^2 + \omega^2 L^2}} \quad (39)$$

Quando a razão entre a tensão no indutor e a do gerador é 1/2 podemos encontrar a indutância em função da frequência ajustada de acordo com (40).

$$\left| \frac{V_L}{V_g} \right| = \frac{1}{2} \quad L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{(R_g^2 + 2R_g R_L - 3R_L^2)}{3}} \quad (40)$$

Conhecendo a resistência interna de cada indutor, é possível calcular sua indutância com base na frequência encontrada no experimento.

Assim temos a resistência do indutor  $R_L$ , a indutância  $L$ , suas dimensões físicas e qual o campo magnético gerado em função da corrente aplicada.

#### 4.4. Caracterização da Válvula

O principal experimento realizado sobre a válvula foi quanto a caracterizar sua vazão em função de três variáveis: a tensão aplicada sobre o indutor que controla a esfera de neodímio, o tempo que essa tensão é aplicada e a pressão da coluna de água acima da válvula. A idéia é determinar como estes fatores alteram a vazão e como otimizar a válvula para melhor eficiência e constância na dispensa de água.

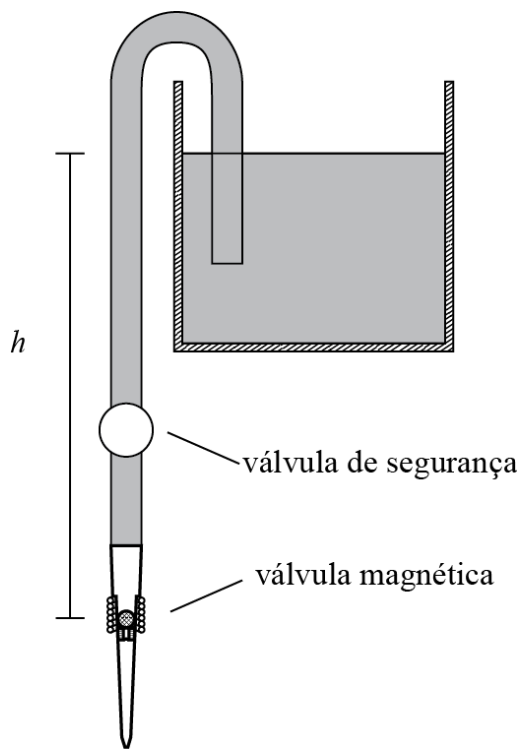


Figura 4-6: Montagem do experimento.

A montagem básica do experimento consiste de um reservatório, um *becker* de 2 litros contendo água destilada, uma mangueira de PVC transparente de 4 mm de diâmetro e uma válvula de segurança. A altura da coluna de água entre o menisco no *becker* maior e a esfera de neodímio dentro da válvula é medida. Uma das pontas da mangueira de PVC é inserida no *becker*, o ar é removido da mangueira, puxando a água consigo até a válvula de segurança, que é fechada nesse instante. Em seguida é inserida a Válvula Magnética e a válvula de segurança é aberta novamente. A mangueira e a válvula são colocados na vertical, apontando para um *becker* menor sobre uma balança eletrônica da marca BEL

engineering, com precisão de 0,1 mg. O indutor é inserido na válvula de maneira que sua borda inferior fique alinhada com a parte superior do limitador dentro da válvula, para os componentes que foram escolhidos, esta posição é alcançada simplesmente inserindo o indutor até o limite, sem forçar demasiadamente.

A montagem do equipamento eletrônico é feita da seguinte maneira: o indutor é ligado na saída de um gerador de pulsos *Philips PM5716*, em paralelo com um dos canais do osciloscópio *HP 54600B*. Um gerador de função *Tectronix CFG 253* é conectado na porta *trigger* do gerador de pulsos e no outro canal do osciloscópio.

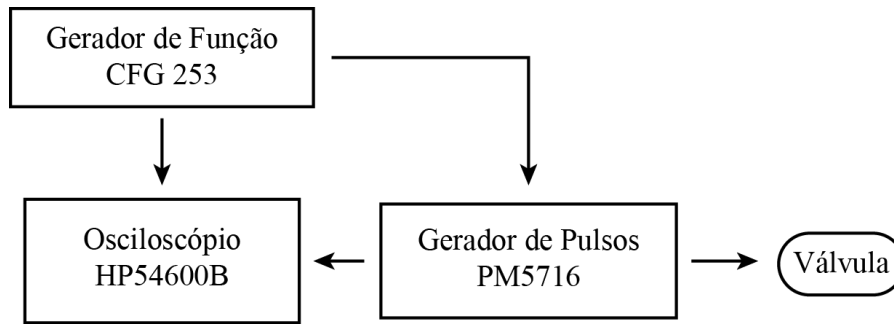


Figura 4-7: Esquema da montagem eletrônica

Desta forma podemos medir o tempo de cada pulso sobre o indutor no osciloscópio, o gerador de função serve para gerar ondas com períodos maiores que 132 ms, o que é uma limitação do gerador de pulsos.

Usando a função *Manual Trigger* e o modo de pulso como pulso único em aproximadamente 100 ms, os tempos de subida e descida são ajustados para o mínimo, afim de obter uma onda quadrada. O botão *Single Shot* é pressionado diversas vezes, inundando lentamente a válvula e a câmara contendo a esfera até que a válvula despeje seu primeiro pulso. Caso a válvula, na primeira dispensa, seja aberta por um tempo maior que 140 ms, ou com uma pressão muito alta, uma parte do ferrofluido é carregada nesta primeira dispensa. As medidas começam ao trocar o becker da balança por um vazio, disparando um pulso com tempo e tensão conhecidos e anotando a massa que foi despejada.

Para as medidas em que o tempo de dispensa é maior que 132ms, é usada a função *External Duration* no gerador de pulsos e quando o pulso termina, retorna-se a posição *Manual Trigger*. O tempo é ajustado no gerador de função também no modo de onda quadrada. Sabendo que o gatilho somente dispara em um dos estados da onda, é preciso ajustar o período para o dobro do tempo de dispensa desejado.

A altura da coluna da água é mantida praticamente constante durante os experimentos. Como as amostras têm um volume muito pequeno, a variação da pressão devido a diminuição da coluna de água no reservatório pode ser negligenciada. Considerando que os dois *beckers* têm raios diferentes, podemos estimar a variação da altura no reservatório em função de uma altura conhecida, no caso o *becker* menor em que é despejada a água da válvula.

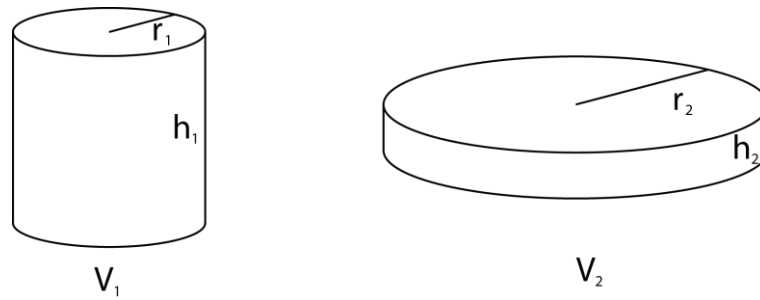


Figura 4-8: Dois cilindros com mesmo volume obedecem a relação (41) entre suas dimensões.

Como o volume que saiu do reservatório é o mesmo que foi para o *becker* sobre a balança, temos (41):

$$V_1 = V_2 \quad \pi r_1^2 h_1 = \pi r_2^2 h_2 \quad h_1 = \frac{r_2^2}{r_1^2} h_2 \quad (41)$$

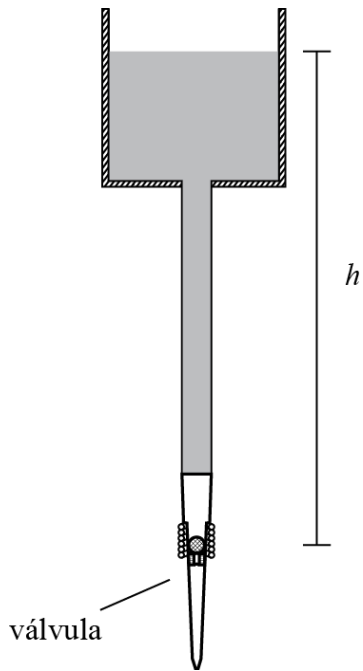
Sabendo que o *becker* reservatório com capacidade de 2 l tem um diâmetro de 12,8 cm, o menor tem 4,5 cm e a precisão da medida da altura da coluna da água está em 1 mm, então:

$$h_1 = \frac{6,4^2}{2,25^2} 0,1 = 8,1 \text{ mm} \quad (42)$$

Portanto a diferença na altura da coluna de água será observada somente quando o *becker* menor estiver com uma coluna de 8,1 mm de água, ou 12,9 ml. Como as maiores amostras do experimento tem cerca de 0,5 ml, a variação da pressão devido ao esvaziamento do reservatório pode ser desprezada, contanto que o reservatório seja devidamente reabastecido periodicamente.

Outra medida importante realizada é sobre a pressão máxima com que a válvula consegue operar. A preparação do experimento é idêntica à montagem da experiência anterior, com exceção do reservatório que é um *becker* menor que pode ser movido facilmente em uma coluna graduada em diferentes alturas  $h$ . A balança não é necessária neste experimento. A partir de uma altura conhecida para a coluna de água, são gerados vários pulsos com a função *Manual Trigger*, aumentando-se

lentamente a tensão, até o momento em que a válvula abre. Esse teste é realizado em diferentes alturas para obter um perfil de seu comportamento.



Para esta medida, podemos determinar as força atuando sobre a esfera de neodímio e compará-la com os campos magnéticos mensurados. Começamos pelo momento em que a esfera está em repouso no fundo da válvula, nesta situação de equilíbrio, sabemos que a força aplicada na esfera equivale ao peso aparente da esfera somado ao peso da coluna de água portanto temos (43) e (43):

$$F_B = A\rho_a g h + V_n \rho_n g - V_n \rho_a g \quad (43)$$

$$F_B = V_n g \rho_n \left[ 1 + \frac{\rho_a}{\rho_n} \left( \frac{3h}{4d} - 1 \right) \right] \quad (44)$$

**Figura 4-9: Medida da pressão máxima de operação da válvula.**

Onde  $A$  é a área da seção transversal da esfera de neodímio,  $\rho_a$  é a densidade da água,  $h$  a altura da coluna de água,  $V_n$ ,  $\rho_n$  e  $d$  são o volume, a densidade e o raio da esfera de neodímio respectivamente.

Com a definição de uma faixa ideal de tensões em que a válvula opera de maneira constante e uma pressão máxima, são realizados os testes com a mesma metodologia do primeiro teste, porém variando a altura do reservatório, para observar a influência da pressão no volume de água despejado.

É verificada a vazão de uma válvula durante um minuto e comparada com a curva gerada em tempos menores. Finalmente, são testadas válvulas diferentes sob as mesmas condições para determinar suas diferenças neste modelo de construção.

## 5. Resultados e Discussões

### 5.1. Indução Magnética, Corrente e Tensão no Indutor

Os indutores testados apresentam as seguintes características físicas, de acordo com a Tabela 5.1:

**Tabela 5.1: Características físicas das bobinas testadas.**

#	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro externo (mm)	Altura (mm)	Número de voltas	Diâmetro do fio (mm)
b1	7	15	8	200	0,28702
b2	7	20	8	256	0,40386
b3	7	21	8	420	0,28702
b4	7	21	8	1000	0,18034
b6	7	21	8	3000	0,1016

Todas as bobinas foram confeccionadas a partir de uma carretilha plástica para máquina de costura, que conferiu as dimensões ideais para o estudo da válvula. A bobina *b6* foi enrolada em uma máquina. A Tabela 5.2 descreve algumas características dos fios utilizados.

Comparando inicialmente as bobinas enroladas a mão. Com um campo magnético de 0,17 mT já é possível erguer uma esfera de neodímio de 3 mm com massa de 109 mg, mas para o funcionamento da válvula é preciso vencer a pressão da coluna de água acima, então definimos o valor para o campo de indução magnética  $B$  na borda do indutor de 3,0 mT como parâmetro ideal para o funcionamento das bobinas.

**Tabela 5.2: Características dos fios de cobre esmaltados.**

Diâmetro (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Resistência (Ω/m)	Corrente Máxima (A)
0,405	0,129	0,133	0,361
0,286	0,0642	0,268	0,182
0,180	0,0254	0,678	0,072
0,101	0,00797	2,163	0,0228

Comparando as bobinas *b1* e *b3* no Gráficos 5.1, vemos que o campo magnético na borda da bobina *b3* é quase o dobro, assim como o número de espiras que é pouco mais que o dobro. Comparando agora *b1* e *b2* é possível notar a influência da espessura do fio, ambos os indutores apresentam uma razão entre corrente e campo magnético muito semelhantes, dado que elas possuem um número de enrolamentos semelhante, porém a corrente em *b3* é muito maior dado que sua resistividade por metro é menor.

O objetivo deste estudo foi verificar se havia necessidade de utilizar um fio mais grosso para que os indutores pudessem suportar uma corrente maior, ao mesmo tempo equilibrar com a possibilidade de que um fio mais fino pode ser enrolado mais vezes, diminuindo sua corrente.

Podemos comparar o coeficiente angular dos Gráficos 5.1 e 5.2 com o previsto pela equação (30) para o campo magnético na borda dos indutores, utilizando suas características físicas, os resultados encontram-se na Tabela 5.3. A resistência interna  $R_L$  foi medida com um multímetro, mas também pode ser obtida a partir dos Gráficos 5.3 e 5.4, como na Tabela 5.3.



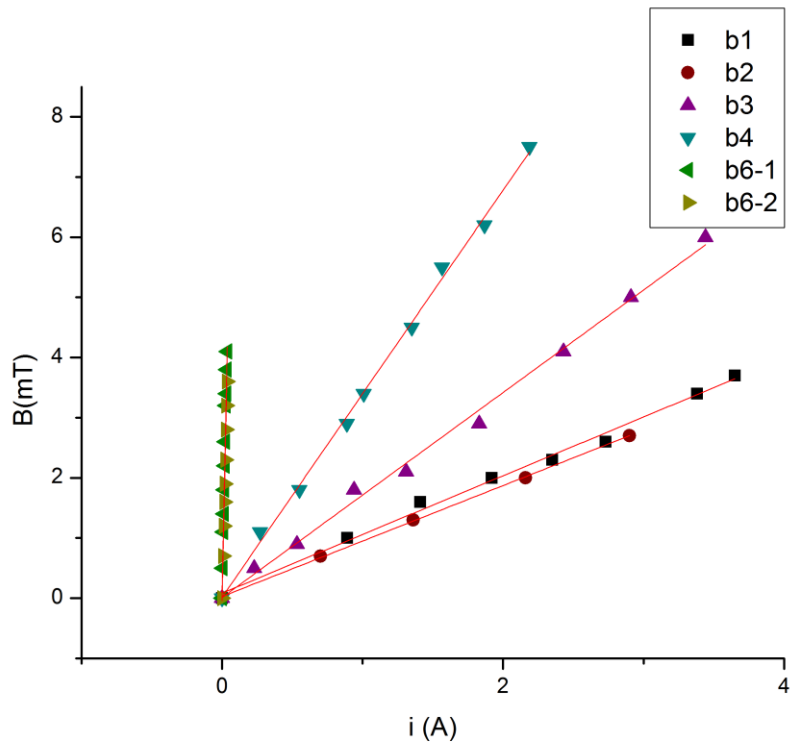


Gráfico 5-1: Campo magnético em função da corrente elétrica aplicada nas bobinas  $b1$ ,  $b2$ ,  $b3$ ,  $b4$  e  $b6$ .

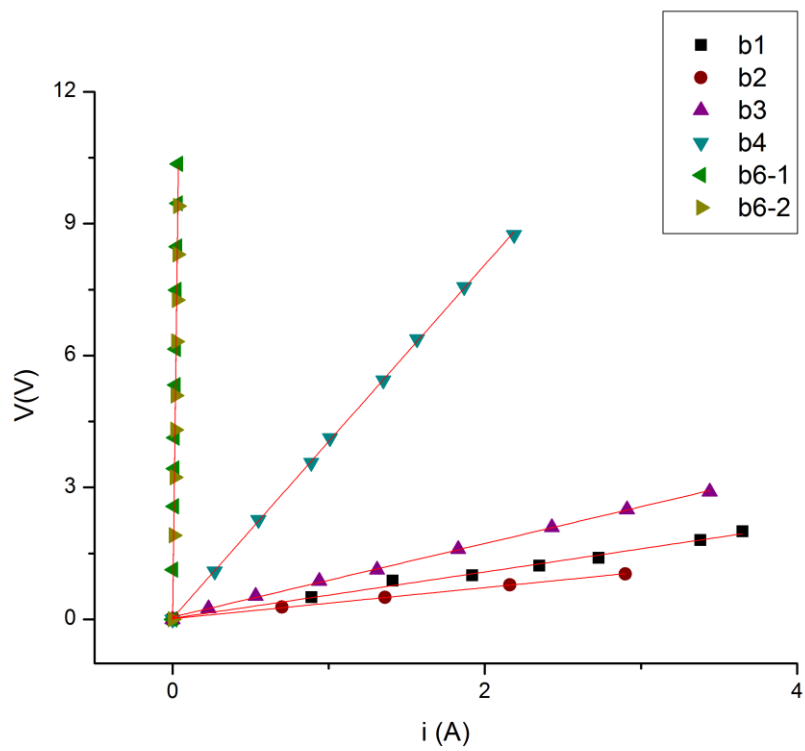


Gráfico 5-2: Tensão em função da corrente elétrica aplicada nas bobinas  $b1$ ,  $b2$ ,  $b3$ ,  $b4$  e  $b6$ .

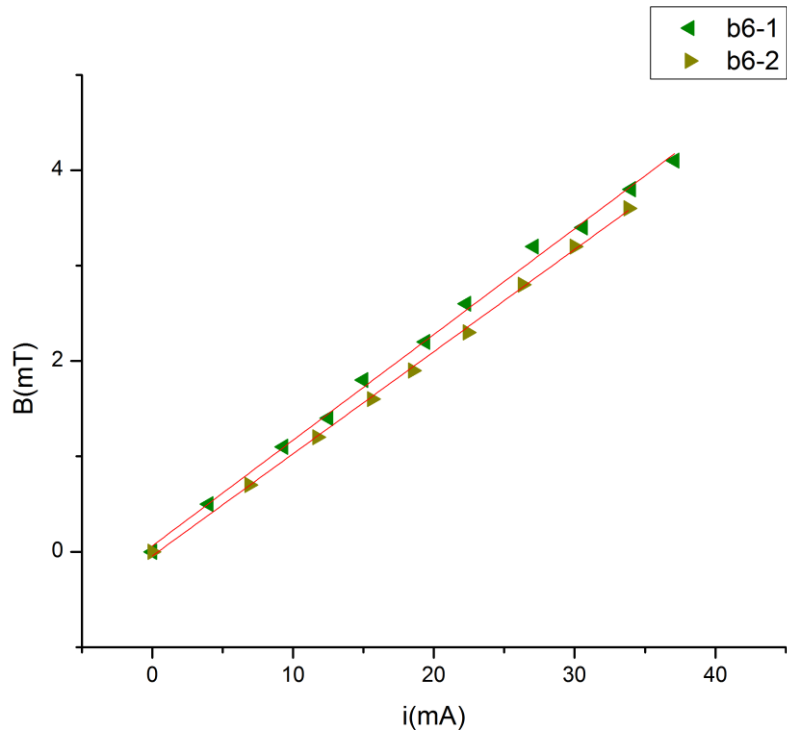


Gráfico 5-3: Campo magnético em função da corrente elétrica aplicada na bobina *b6*.

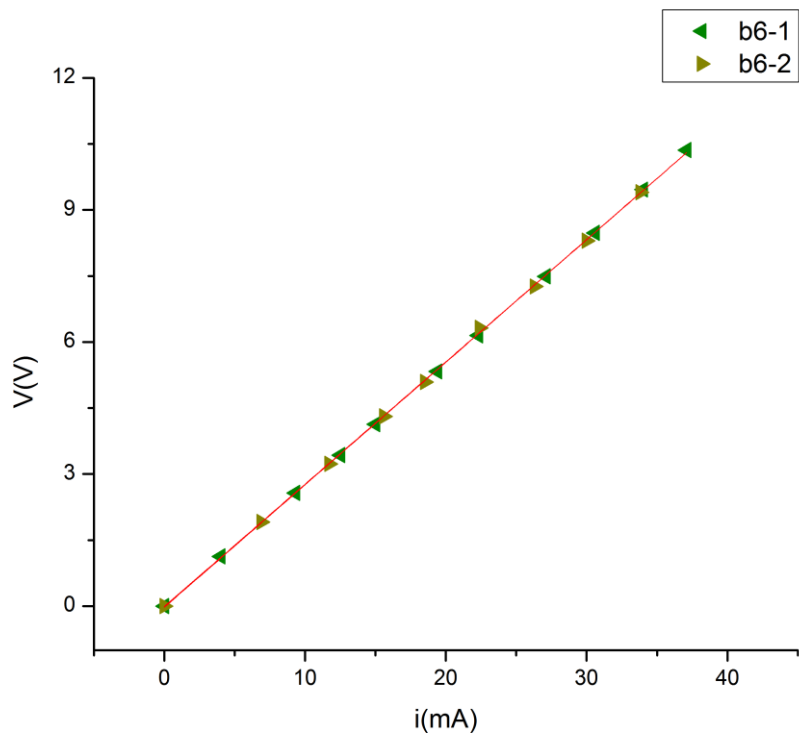


Gráfico 5-4: Tensão em função da corrente elétrica aplicada na bobina *b6*.

**Tabela 5.3: Coeficientes angulares do ajuste das curvas dos Gráficos 5.1 e 5.2.**

#	$C$ (A/mT) Calculado	$C$ (A/mT) Curva	Err %	$R_L$ ( $\Omega$ ) Multiímetro	$R_L$ ( $\Omega$ ) Curva	Err %
<i>b1</i>	14,05	0,98	1339%	3,80	0,53	622%
<i>b2</i>	15,60	0,92	1592%	2,44	0,35	592%
<i>b3</i>	24,83	3,38	634%	7,32	0,84	775%
<i>b4</i>	59,11	3,38	1647%	36,73	4,02	814%
<i>b6</i>	177,32	109,69	61,7%	271	278,13	2,6%

A equação (30) é modificada para incluir a espessura da bobina no cálculo e mesmo assim há uma discrepância enorme entre os valores calculados e medidos para o coeficiente  $C$ , vamos tomar como base para os cálculos posteriores as medidas da curva, que são o resultado direto das medidas, diferentemente das aproximações feitas para o cálculo. O mesmo acontece com a resistência interna e novamente os parâmetros utilizados serão os retirados da curva.

Na Tabela 5.4 temos os valores previstos para a tensão, corrente e potência necessárias para se obter um campo de 3,0 mT na borda dos indutores com base nas informações dos gráficos anteriores.

**Tabela 5.4: Corrente necessária nas bobinas para gerar um campo magnético de 3,0 mT em sua borda.**

#	Diâmetro do fio (mm)	$i$ Max (mA)	$i$ (mA)	V (V)	P (W)	Duty Cycle (%)
<i>b1</i>	0,28702	182	3061	1,622	4,966	5,9
<i>b2</i>	0,40386	361	3261	1,141	3,721	11,0
<i>b3</i>	0,28702	182	1764	1,482	2,616	10,3
<i>b4</i>	0,18034	72	888	3,568	3,167	8,1
<i>b6</i>	0,1016	22,8	27	7,607	0,208	83,3

Comparando a bobina *b4* com a *b6* fica clara a diferença de se utilizar um fio mais fino e uma máquina para enrolar o fio. A bobina *b6* opera em correntes muito

mais baixas que as anteriores, o que também reduz drasticamente a potência utilizada.

O *duty cycle* é calculado com base na corrente máxima de cada indutor. A corrente sobre a bobina *b6* para obter um campo de 3,0mT é ligeiramente maior que a corrente máxima informada pelo fabricante. As operações sobre a válvula requerem um curto tempo de aplicação de tal corrente, reduzindo seu stress durante um uso prolongado. O indutor *b6* pode operar em modo cíclico de forma que em 83,3 % do período ele esteja ligado, de acordo com a Tabela 5.4. As outras amostras porém apresentam uma corrente maior que dez vezes a recomendada e apesar de terem resistido os testes, não se tem garantia de quanto tempo funcionarão normalmente.

Todos os indutores enrolados à mão foram construídos juntos e *b4* já foi criado voltado para a aplicação, ele contém um fio mais fino e mais espiras que as outras bobinas, conferindo-lhe uma impedância e um campo magnético muito superior aos anteriores.

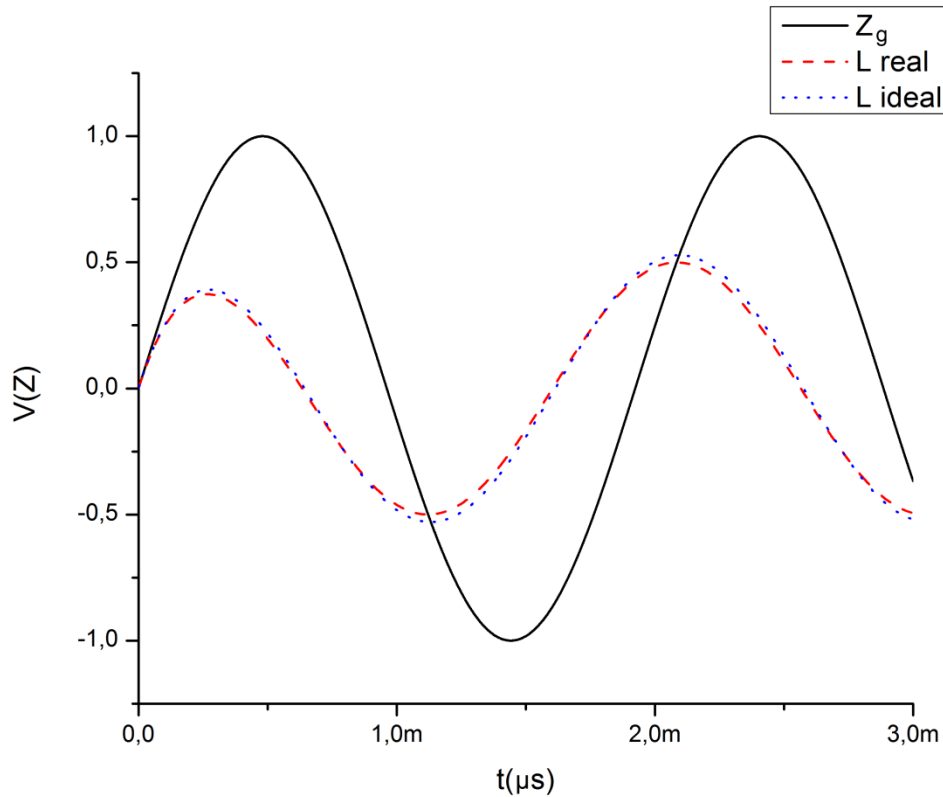
## 5.2. Impedância do Indutor

A impedância do indutor é um fator importante para a caracterização do mesmo, pois mostra como um componente reage à aplicação de uma corrente elétrica, principalmente em correntes alternadas.

Partindo do circuito na Figura 4-5 e da impedância do gerador de função que é  $R_g = 51,8 \Omega$ , é possível fazer a seguinte aproximação para a equação (40):

$$L = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{R_g}{2\pi f}} = \frac{4,760}{f} \quad (45)$$

O resultado (45) é uma boa aproximação para indutores com uma baixa resistência interna, porém o efeito desta pode atenuar o sinal como ilustrado na Figura 5-1, então a resistência interna dos indutores não pode ser desprezada para obter medidas mais precisas.



**Figura 5-1: Simulação do experimento mostrando a variação na amplitude de um indutor ideal com indutância de 9,153mH a 520Hz e um real com a mesma indutância e uma resistência interna de 4 Ω.**

**Tabela 5.5: Simulação da indutância de um indutor ideal de 9,153 mH adicionado de diferentes resistências internas.**

$R_L (\Omega)$	L (mH)
0	9,153
4	9,911
10	11,203
50	21,902
100	36,661

Foram realizadas algumas simulações para determinar o erro causado por não incluir a resistência interna do indutor. Na Tabela 5.5 há alguns valores de indutância em função de diferentes resistências internas. Quando  $R_L$  está perto de zero a diferença entre as indutâncias reais e ideais podem ser desprezadas porém, em  $4\Omega$  como no indutor *b4* há uma diferença de 8,59% entre um indutor real e um ideal. Esta diferença cresce praticamente linearmente, alcançando uma diferença de 100% com uma resistência interna de  $37\Omega$ .

Substituindo a impedância do gerador em (40) temos a equação utilizada para determinar a impedância de cada bobina (46) e a Tabela 5.6 de acordo com a frequência encontrada:

$$L = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{(2683,24 + 103,60R_L - 3R_L^2)}{118,43}} \quad (46)$$

**Tabela 5.6: Propriedades medidas nos indutores.**

#	$R_L$ ( $\Omega$ )	freq (kHz)	L medido (mH)
<i>b1</i>	0,53	9,68	0,497
<i>b2</i>	0,35	8,73	0,549
<i>b3</i>	0,84	2,90	1,668
<i>b4</i>	4,02	0,52	9,915
<i>b6</i>	278,32	-	52,8

A indutância da bobina *b6* não pode ser medida da mesma maneira, pois a impedância do gerador é baixa demais. Isto poderia ser resolvido colocando uma resistência em série com o indutor, porém as frequências obtidas são demasiadamente baixas, invalidando a equação (46) para correntes praticamente nulas. O valor utilizado portanto é o fornecido pelo fabricante, que se mostrou preciso nas medidas de *b1* e *b2* que foram cedidas ao fabricante que preparou a bobina *b6*.

### 5.3. Pressão Máxima da Válvula

Observou-se que quando a válvula opera em pressões altas, ocorrem mais desvios nas medidas, por isso é importante estabelecer uma faixa de pressões em que a força induzida pelo solenóide seja grande o suficiente para levantar a esfera de neodímio sem causar erros.

A partir da altura da coluna de água acima da válvula encontramos a pressão sobre a esfera de neodímio, considerando  $g=9,81 \text{ m/s}^2$  e  $\rho_a=997,2 \text{ kg/m}^3$ , temos o Gráfico 5-5.

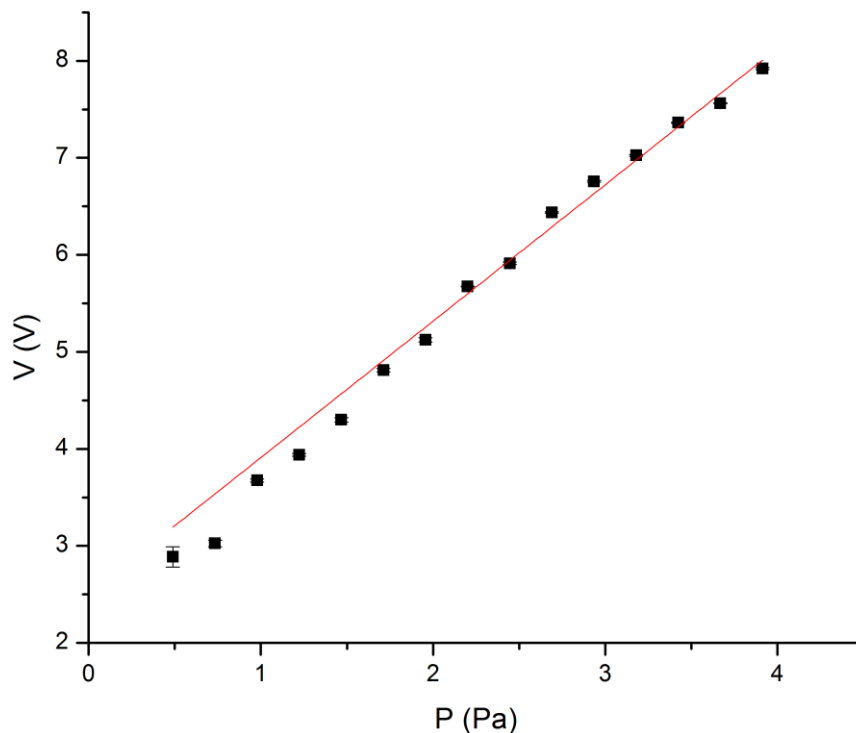


Gráfico 5-5: Tensão aplicada no indutor em função de sua pressão de abertura.

De acordo com o ajuste da reta no Gráfico 5-5, encontramos as pressões máximas de operação para qualquer tensão nesta faixa. quando a tensão aplicada no indutor é de 8 V, a pressão máxima de funcionamento da válvula é de 3,91 kPa, equivalente a uma coluna de água de 399 mm. Definimos a pressão de operação

ideal como metade deste valor, ao redor de 2 kPa, equivalente a uma coluna de 204 mm, onde é possível operar a válvula seguramente com 8 V e valores próximos.

Podemos determinar a força aplicada sobre a esfera a partir da equação (36). Para melhorar a aproximação, trocamos algumas variáveis pelo campo magnético na borda do indutor (30), que foi medido.

$$F(0) = B_{ds}B_z(0) \frac{\pi d^3 L^2}{4\mu_0 a(a^2 + L^2)} \hat{z} \quad (47)$$

Para um campo magnético na borda do indutor de 3 mT e sabendo que o campo medido na superfície do ímã foi de 1,65 T, a força sobre a esfera de acordo com (47) é de 2,5 mN no início de seu movimento.

Supondo que a esfera está localizada em um tubo ao invés de um cone, podemos calcular a força para erguer a esfera. Medimos a massa de 15 esferas de ímãs de neodímio, encontrando uma média de 109 mg, correspondente a uma densidade de  $\rho_n=7708,7 \text{ kg/m}^3$ . A partir da equação (44) e destes dados encontramos a força mínima que a esfera de neodímio sofrerá para diferentes alturas ( $h$ ) na coluna de água (48):

$$F_B = (69,2h + 0,9)mN \quad (48)$$

Para uma coluna de 399 mm, a pressão máxima da válvula operando em 8V, a força é  $F_B = 28,5 \text{ mN}$ , um valor relativamente alto quando comparado com os 2,5 mN induzidos, a contribuição de 0,9 mN corresponde ao peso aparente, e o restante é a componente da pressão aplicada na secção transversal da esfera.

A força para erguer a esfera dentro de um tubo é maior que a calculada a partir do campo magnético, porém a geometria cônica da ponteira facilita a abertura da válvula, pois uma leve perturbação no formato do ferrofluido que envolve a esfera pode abrir uma pequena passagem para a água fluir, criando uma pressão dinâmica e aliviando a pressão da coluna de água, que passa a ser até duas ordens de grandeza menor, neste instante a força do indutor é suficiente para levantar a esfera.



## 5.4. Tensão Ideal do Indutor

Para encontrar uma faixa de tensões ideal para aplicação, foram realizados os testes utilizando a balança. Cada medida representa a média de 20 amostras, é calculado o desvio padrão, a margem de erro, com um intervalo de confiança de 95%, que expressa a confiabilidade das medidas e qual porcentagem a margem de erro representa em relação à média.

A tabela Tabela 5.7 mostra as primeiras medidas realizadas com a bobina *b4*. É importante lembrar que a massa em mg tem o mesmo valor que seu volume em  $\mu\text{l}$ , considerando uma densidade de  $1\text{g/cm}^3$ .

**Tabela 5.7: Primeiras medidas realizadas sobre a válvula com a bobina *b4*.**

Tensão (V)	Tempo (ms)	Massa (mg)	Margem de erro (mg)	%
2,000	1500	429,7	0,7	0,17%
2,000	500	146,8	0,7	0,47%
2,000	140	50,6	0,9	1,79%
2,000	60	25,6	0,5	1,82%
2,563	1500	398,6	0,3	0,08%
2,563	1000	263,5	0,7	0,29%
2,563	500	138,7	0,3	0,20%
2,563	140	44,5	0,1	0,33%
2,563	60	24,1	0,2	0,69%
2,563	28	15,4	0,1	0,60%
2,500	1500	509,5	1,2	0,23%
2,500	1000	340,7	2,9	0,85%
2,500	140	59,7	2,4	4,06%

Mesmo sem uma metodologia definida, apenas três medidas apresentaram uma margem de erro maior que 1% do total da amostra.

Um fator importante neste primeiro estágio foi a determinação da quantidade ideal de ferrofluido, durante os primeiros testes a quantidade de ferrofluido na esfera variava em cada bateria de medidas. Concluimos que com uma dose de 3  $\mu\text{l}$  ou abaixo de ferrofluido, a válvula não era vedada corretamente e vazava continuamente, de 6  $\mu\text{l}$  acima, havia ferrofluido demais portanto não havia fluxo de água ou a válvula não abria corretamente. Definimos então a quantidade de 4  $\mu\text{l}$  como padrão para os experimentos.

**Tabela 5.8: Medidas realizadas com a bobina *b4*, 9V, válvula V1 .**

Tempo (ms)	massa (mg)	Margem de erro (mg)	%
1500	347,4	0,5	0,15%
1000	235,4	0,3	0,13%
500	123,3	0,2	0,14%
132	40,0	0,1	0,24%
60	19,6	0,1	0,54%
32	20,1	0,6	2,90%
20	0,5	0,2	36,78%
12	-	-	-

**Tabela 5.9: Medidas realizadas com a bobina *b4*, 12V, válvula V1.**

Tempo (ms)	massa (mg)	Margem de erro (mg)	%
1500	350,5	4,5	1,29%
1000	238,2	3,6	1,49%
500	125,2	0,4	0,29%
132	41,1	0,2	0,49%
60	24,0	0,1	0,60%
32	20,4	0,2	0,77%
20	15,6	0,1	0,93%
12	9,2	0,2	2,38%

Com a metodologia bem definida e utilizando a bobina *b4*, são realizados os testes primeiramente a 9 V (Tabela 5.8), que possui uma corrente de 33 mA, 50% a mais que a corrente máxima indicada para o fio, um campo magnético de 3,7 mT, acima dos 3 mT que foram tomados como mínimo e em seguida a 12 V(Tabela 5.9), a uma corrente de cerca de 54 mA, mais que o dobro da corrente máxima indicada para o fio e um campo de 6,0 mT.

No intervalo de 1,5 s até 60 ms, os resultados das medidas em 9 V mostram uma baixa margem de erro, a 32 ms a precisão cai, mas a margem de erro ainda representa uma pequena parcela da média. Em 20 ms os dados foram tão discrepantes que o desvio padrão teve o mesmo valor que a média. Para o teste em 12 ms, o tempo de aplicação do campo magnético era tão curto que não conseguia abrir a válvula.

Para o caso em que a tensão aplicada sobre o indutor era de 12 V, o desvio padrão é maior nas medidas com tempos maiores de 132 ms, porém é possível despejar quantidades menores de água mais precisamente, chegando a 9,2  $\mu\text{l}$  com um tempo de 12 ms.

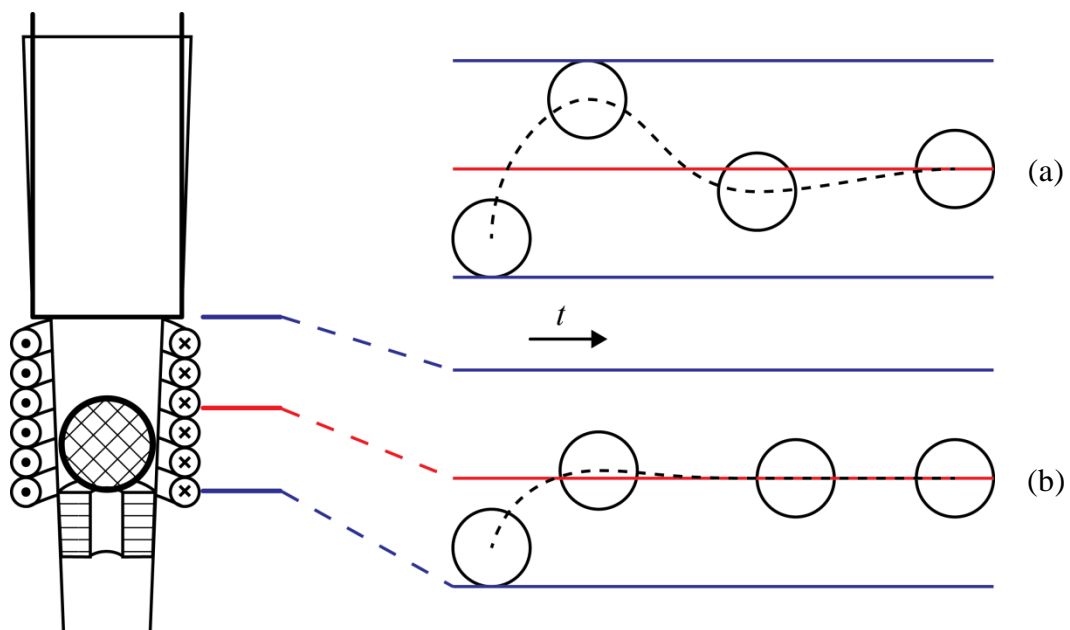


Figura 5-2: Movimento dentro da câmara da esfera (a) com uma tensão muito alta, (b) com uma tensão ideal.

Este aumento no erro em tempos maiores de 132 ms pode ser associado a uma força de indução magnética sobre a esfera grande demais, causando um

*overshoot*, de forma que em seu ápice, a esfera pode interagir com a extremidade superior de sua câmara ou modificar o fluxo simplesmente pelo seu movimento com uma alta amplitude no interior da câmara, de acordo com a Figura 5-2.

Como a pressão nos testes anteriores estava perto de 200 mm, muito próxima da esperada, não havia necessidade de realizar testes com tensões mais altas. Foram realizados testes em mais quatro tensões: 9 V, 8 V, 7 V e 6 V para encontrar a mais consistente, desta vez cada bateria de dados contém 30 amostras e a altura fixada em 222 mm e cada tensão testada utilizou uma válvula diferente. As Tabelas 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 mostram as médias obtidas.

**Tabela 5.10: Medidas realizadas com a bobina b6, 9V, válvula V2.**

Tempo (ms)	média (mg)	margem de erro (mg)	%
1500	398,09	1,31	0,33%
1000	266,40	0,17	0,07%
500	140,08	0,44	0,31%
132	51,62	0,45	0,87%
60	29,91	0,26	0,87%
32	29,66	0,22	0,75%
20	14,20	0,31	2,21%
12	3,20	0,08	2,49%

**Tabela 5.11: Medidas realizadas com a bobina b6, 8V, válvula V3.**

Tempo (ms)	média (mg)	margem de erro (mg)	%
1500	475,63	0,75	0,16%
1000	324,12	0,83	0,26%
500	151,62	0,55	0,37%
132	49,04	0,11	0,22%
60	31,29	0,23	0,73%
32	22,38	0,39	1,73%
20	4,89	0,32	6,51%
12	-	-	-

**Tabela 5.12: Medidas realizadas com a bobina b6, 7V, válvula V4.**

Tempo (ms)	massa (mg)	margem de erro (mg)	%
1500	413,65	1,54	0,37%
1000	291,54	3,14	1,08%
500	155,42	0,61	0,39%
132	51,78	0,20	0,38%
60	30,83	0,86	2,80%
32	16,43	0,42	2,55%
20	-	-	-
12	-	-	-

**Tabela 5.13: Medidas realizadas com a bobina b6, 6V, válvula V5.**

Tempo (ms)	massa (mg)	margem de erro (mg)	%
1500	429,28	1,24	0,29%
1000	288,42	0,55	0,19%
500	146,08	1,09	0,75%
132	45,77	1,79	3,92%
60	-	-	-
32	-	-	-
20	-	-	-
12	-	-	-

Cada teste foi realizado com uma válvula diferente, e fica claro que a influência da válvula é maior que a da tensão aplicada, pois em 1500 ms, a massa despejada em ordem crescente é: 398,1 mg a 9 V, 413,7 mg a 7 V, 429,3 mg a 6V e 475,6 mg a 8 V. As correntes, campos magnéticos e potência sobre o indutor nos experimentos podem ser encontradas na

**Tabela 5.14: Características de *b6* nas tensões testadas.**

V (V)	i (mA)	B (mT)	P (mW)
6	21,65	2,461	129,89
7	25,24	2,86	170,7
8	28,84	3,258	230,69
9	32,43	3,657	291,87

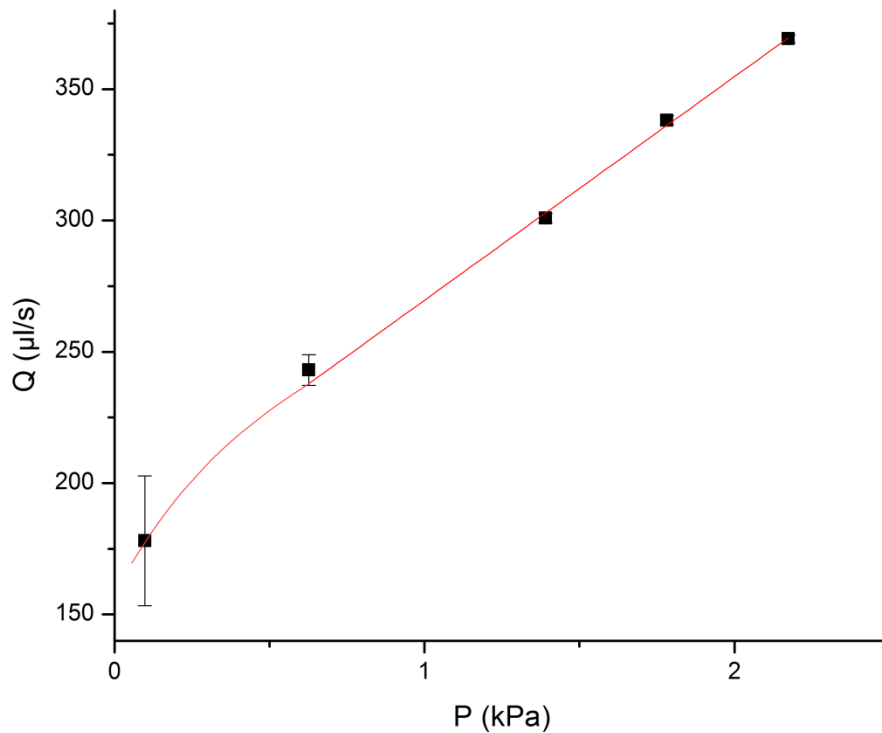
A tensão escolhida como padrão para os testes foi de 8 V, que apresentou uma precisão boa em até 60 ms e uma corrente apenas 25% acima do limite imposto pelo fabricante. Caso seja necessário dispensar em tempos maiores que 500 ms, é possível utilizar a tensão de 6 V sem comprometer a precisão e com uma corrente elétrica dentro dos limites aceitáveis para que opere por tempo indeterminado.

### 5.5. Dispensa em Diferentes Pressões

A válvula foi testada em cinco pressões diferentes, desta vez sem trocar a válvula entre cada bateria de medidas. O tempo definido para o teste foi de 132 ms, o máximo possível para o gerador de pulsos utilizado.

**Tabela 5.15: Massa despejada em um tempo de 132 ms e diferentes pressões, bobina *b6*, 8V, válvula V6.**

Pressão (kPa)	Altura da coluna (mm)	massa (mg)	margem de erro (mg)	%
2,174	222	48,59	0,19	0,40%
1,782	182	44,51	0,23	0,52%
1,391	142	39,60	0,23	0,59%
0,627	64	32,00	0,76	2,39%
0,098	10	23,44	3,25	13,87%



**Gráfico 5-6: Fluxo de água (Q) dispensada em diferentes pressões**

É notável o aumento da margem de erro em pressões mais baixas, mas as medidas de 1,391 kPa e acima tem uma margem de erro baixa, o que significa que e uma coluna de 140 mm para cima obtém-se uma dispensa homogênea.

O ponto com a menor pressão foi removido para o ajuste da reta, pois apresenta um comportamento diferente dos demais e uma incerteza muito grande. A partir do ajuste da reta é possível obter a resistência hidráulica da mangueira somada a da ponteira, de acordo com a equação (14) temos.

$$R_m + R_p = 11,75 \text{ GPa} \cdot \text{s} / \text{m}^3 \quad (49)$$

A contribuição da viscosidade calculada pela lei de Hagen-Poiseuille para a mangueira de 250 mm de comprimento que liga o reservatório à valvula, fica com o valor de  $R_m = 167,88 \text{ kPa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$ , uma contribuição muito menor que a resistência

total, portanto a geometria e a resistência da válvula são os fatores mais importantes na determinação do fluxo.

## 5.6. Vazão da Válvula

Para verificar a taxa de vazão por minuto, foi repetido o experimento com a altura de 222 mm e 8 V, com uma única válvula.

**Tabela 5.16: Testes de vazão com a bobina *b6*, 8 V, válvula *V7*.**

t (s)	Massa (mg)	Margem de erro (mg)	%
60	17262,82	6,23	0,04%
1,5	454,14	0,97	0,21%
1	305,37	1,40	0,46%
0,5	155,28	1,30	0,84%
0,132	47,52	0,47	0,99%

Para esta válvula, a projeção do ajuste da curva da vazão em função do tempo gera um valor de 17,865 g/min, uma diferença de 3,49% em relação ao valor medido, portanto é possível estimar a taxa de vazão por minuto a partir de algumas amostras em tempos menores.

A estimativa da vazão foi calculada a partir dos pontos de 1,5 s, 1 s, 0,5 s, e 0,132 s. Os pontos com tempos menores apresentam um comportamento ligeiramente diferente para projetar em tempos maiores, além de possuírem um erro maior.

A Tabela 5.17 mostra a vazão estimada das outras válvulas experimentadas, todas com a mesma pressão pela coluna de água de 222 mm. Os dados foram obtidos através do Gráfico 5-7.



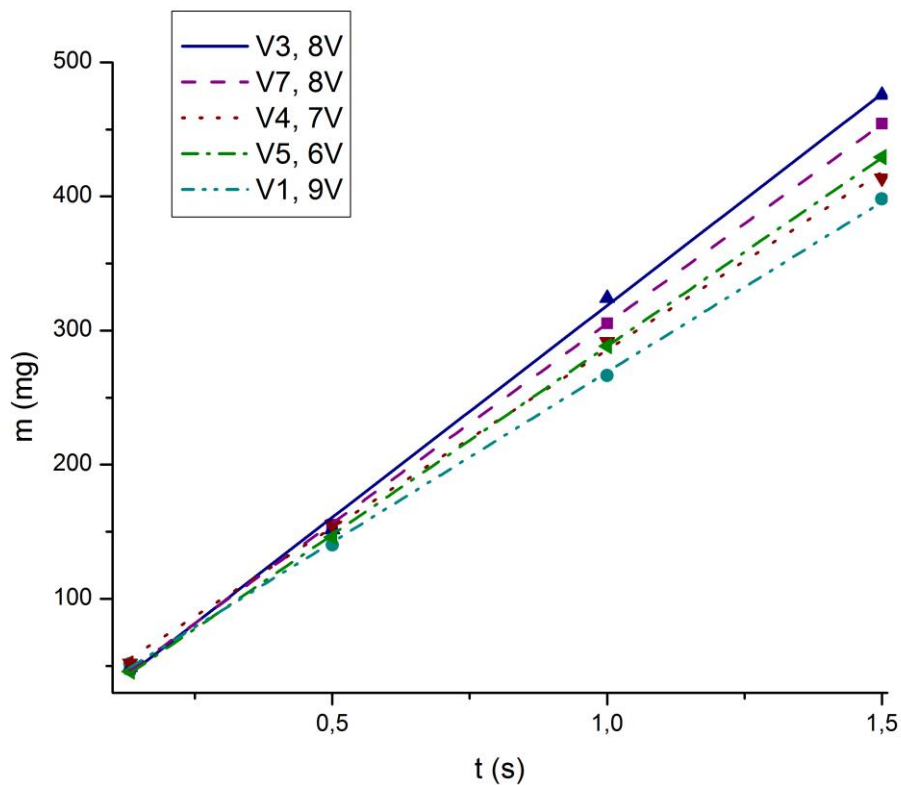


Gráfico 5-7: Vazão de diferentes válvulas com a mesma pressão.

Tabela 5.17: Vazão calculada das válvulas com a mesma pressão.

Válvula	Tensão (V)	Volume (ml/min)
V2	9	15,187
V3	8	18,907
V4	7	15,875
V5	6	16,823
V7	8	17,820
V7 medido	8	17,212

Fica claro que a vazão não depende somente da tensão aplicada, uma vez que mesmo com a mesma tensão existe uma grande variação da taxa de vazão. Novamente as diferenças na vazão encontradas podem ser atribuídas à resistência hidráulica da válvula.

## 5.7. Número de Reynolds

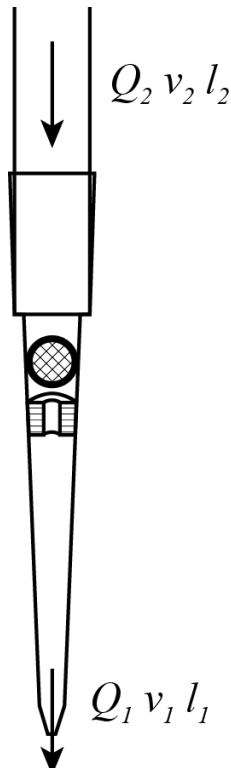


Figura 5-3: Vazão  $Q$ , velocidade  $v$  na entrada e na saída da válvula com diâmetros  $l$ .

Devido à diferença nas dimensões dos canais, há uma grande diferença na velocidade do fluido. A partir da equação (10), podemos determinar a velocidade do fluido na saída da ponteira, considerando o diâmetro  $l_2$  de 3 mm para o diâmetro da mangueira e um fluxo  $Q$  de 350  $\mu\text{l/s}$ , próximo do maior fluxo encontrado nos testes, obtemos (50).

$$v_2 = \frac{Q_2}{A_2} = \frac{4Q}{\pi l_2^2} = 49,51 \text{ mm/s} \quad (50)$$

A velocidade na saída da ponteira é  $v_1 = 1,78 \text{ m/s}$ , considerando um diâmetro  $l_1$  de 500  $\mu\text{m}$ . Utilizando-se da equação (8) e considerando uma viscosidade dinâmica  $\mu$  de  $8,9 \cdot 10^{-4}$  para a água, o número de Reynolds pode ser estimado a partir de suas dimensões  $l_1$  e  $l_2$  e do fluxo obtido nos testes, resultando em (51):

$$Re_1 = \frac{\rho v_1 l_1}{\mu} = 999 \quad Re_2 = \frac{\rho v_2 l_2}{\mu} = 166 \quad (51)$$

Ambas as situações estão abaixo de 2300, o que configura um fluxo laminar. Este resultado reforça o encontrado numa secção anterior, indicando que a componente da dinâmica do fluido é mais relevante que a viscosidade para determinação dos fluxos.

## 5.8.Reprodutibilidade da Válvula

O experimento foi repetido com mais quatro válvulas para o tempo de 1,5 s com uma tensão de 8V e altura de 222 mm.

**Tabela 5.18: Diferentes válvulas com a bobina *b6* a 8 V, 1,5 s.**

Válvula	massa (mg)	margem de erro (mg)	%
V3	475,63	0,75	0,16%
V7	454,14	0,97	0,21%
V8	472,54	0,38	0,08%
V9	371,16	1,65	0,45%
V10	441,88	0,91	0,21%
V11	445,28	0,99	0,22%

Neste caso vemos a influência direta da válvula, uma vez que todos os parâmetros são idênticos. Todas as medidas apresentam uma margem de erro baixa, o que indica que apesar da vazão de cada uma ser diferente, elas produzem uma dispensa precisa.

Neste estágio do trabalho, para obter uma dispensa precisa, cada válvula então necessita passar por uma fase de calibração antes de ser utilizada.

Observamos alguns fatores que podem influenciar nesta diferença: o corte feito na mangueira de poliuretano, que funciona como limitador para a esfera de neodímio, pode não ser uniforme, ou estar em um pequeno ângulo, alterando a vazão, a ponta da ponteira possui dimensões diferentes, e sua influência chegou a ser observada a olho nú.

## 6. Conclusões

Foram muitos os obstáculos para obter um protótipo e encontrar os parâmetros que permitissem o funcionamento do dispositivo. O resultado é uma válvula que apresenta uma dispersão consistente onde a margem de erro, para um intervalo de confiança de 95%, tem um valor abaixo de 1% da média da amostra. A robustez do dispositivo é uma característica marcante, sendo que muitas válvulas em diferentes configurações foram testadas e funcionaram. Então, gradualmente os parâmetros foram ajustados para otimizar o funcionamento

As características do indutor como impedância, indutância e a faixa de correntes favorável para a aplicação são determinadas para o indutor utilizado, mas devido à dependência do gradiente do campo magnético gerado para a determinação da força sobre a esfera, a geometria delgada, um raio  $a$  pequeno e um fio fino que permita um maior número de enrolamentos são os fatores mais significativos para o funcionamento do indutor.

A escolha da esfera de um ímã permanente de neodímio também pode ser encontrada na força induzida na esfera, uma vez que um campo remanente alto na esfera corresponde a um momento de dipolo magnético igualmente alto. Para erguer a esfera dentro de uma mangueira com uma coluna de água acima, vimos que é necessária uma força muito maior que a obtida pelo dispositivo, por isso a estrutura cônica da ponteira é fundamental para o funcionamento da válvula.

Aplicar uma corrente elétrica alta demais no indutor, no caso da bobina  $b6$  para pressão de cerca de 2 kPa, uma tensão de 12 V e acima, por um tempo longo causa desvios na medida. Em tensões baixas demais também encontramos erros, portanto é importante definir qual o intervalo de tempo da dispersão para a escolha da tensão aplicada. No caso do presente trabalho, utilizando-se da bobina  $b6$ , uma tensão de 6 V provou ser suficiente para dispensar na escala de tempo de 1 s e acima, enquanto 8 V permitiu uma dispersão a partir de 32 ms e acima.

É interessante observar que, em condições ideais para o funcionamento da válvula, a tensão aplicada no indutor não altera a vazão da válvula, mas modifica o alcance de tempos de funcionamento desta.

Para a pressão de cerca de 2kPa usada nos experimentos, a faixa de tensões de 6 a 8 V apresentou uma potência de 130 mW a 230 mW e correntes entre 21 mA e 28 mA, dentro ou próximo das especificações previstas para o diâmetro do fio utilizado. A vazão da válvula teve o valor máximo de 18,907 ml/min para a válvula V3 nesta pressão. Embora haja bastante diferença entre a vazão das válvulas, todas ficaram numa mesma faixa, o que pode ser observado na Tabela 5-17.

As medidas em diferentes pressões mostraram um comportamento linear para a vazão da válvula, exeto em pressões extremamente baixas. Pudemos calcular a resistência hidráulica para a válvula V6 que fica numa ordem de grandeza um milhão de vezes maior que a influência da viscosidade no tubo. Por esse motivo a influência do coeficiente de vazão  $C_v$  na saída do reservatório e da mangueira podem ser desprezados frente à resistência oferecida pela válvula.

A maior dificuldade do trabalho é de produzir uma válvula idêntica a outra, principalmente no momento de realizar o corte do limitador de poliuretano e sua colocação na ponteira. Eliminando a etapa de cortar e inserir o limitador, qualquer variação no fluxo da válvula será devida à qualidade da ponteira, do ímã ou do ferrofluido, não de qualquer manipulação prévia. Para resolver este problema, uma das opções é desenvolver uma válvula em que o limitador esteja imbutido na ponteira durante o processo de fabricação da ponteira, que é uma das sugestões para trabalhos futuros.

A válvula dispensadora magnética vedada com ferrofluido é uma solução interessante para a dispensa de materiais que não se misturem com o óleo do ferrofluido e não sejam atraídos pelo ímã. O fato de ser uma peça fácil de produzir, com um funcionamento simples e um baixo custo torna a peça vantajosa quando. O indutor que opera em conjunto com a válvula precisa somente de uma fonte que o alimente na tensão correta e gere um pulso com o tempo desejado, operações simples que reduzem o custo do atuador da válvula.

## 7. Anexo: Pedido de Patente

 <b>INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL</b> PROTOCOLO GERAL 04/12/2012 15:09 DEPR 015120003342 BR 10 2012 030865 7	<b>&lt; Uso exclusivo do INPI &gt;</b>  <i>215</i>
Espaço reservado ao protocolo	Espaço para etiqueta

### DEPÓSITO DE PEDIDO DE PATENTE OU DE CERTIFICADO DE ADIÇÃO

**Ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial:**

O requerente solicita a concessão de um privilégio na natureza e nas condições abaixo indicadas

**1. Depositante (71):**

- 1.1 Nome: Universidade Federal do Paraná  
1.2 Qualificação: Autarquia Federal  
1.3 CNPJ/CPF: 75095679-49  
1.4 Endereço Completo: Rua XV de Novembro, 695 Curitiba- PR  
1.5 CEP: 80020-310      1.6 Telefone: 41 3310-2699      1.7 Fax: 41 3310-2760  
1.8 E-mail: inovacao@ufpr.br

continua em folha anexa

**2. Natureza:**       Invenção       Modelo de Utilidade       Certificado de Adição

Escreva, obrigatoriamente, e por extenso, a Natureza desejada: Patente de Invenção

**3. Título da Invenção ou Modelo de Utilidade ou Certificado de Adição(54):**

VÁLVULA DE RETENÇÃO FERROFLUÍDICA PARA DISPENSA DE FLUIDOS

continua em folha anexa

**4. Pedido de Divisão:** do pedido N° \_\_\_\_\_ Data de Depósito: \_\_\_\_\_**5. Prioridade:**       interna       unionista

O depositante reivindica a(s) seguinte(s):

Pais ou organização de origem	Número de depósito	Data do depósito

**6. Inventor (72):**

Assinale aqui se o(s) mesmo(s) requer(em) a não divulgação de seu(s) nome(s)

- 6.1 Nome: Wido Herwig Schreiner  
6.2 Qualificação: Doutor      6.3 CPF: \_\_\_\_\_  
6.4 Endereço completo: Rua Eugênio Caetano do Amaral, 65 Curitiba/PR  
6.5 CEP: 82520-230      6.6 Telefone: 41 3264-4583      6.7 Fax: \_\_\_\_\_  
6.8 E-Mail: wido@fisica.ufpr.br

continua em folha anexa

## Referências Bibliográficas

- [1] S. C. Terry, J H Jerman, J B Angell, "A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer", *IEEE Trans. Electron Devices* 26 (1979) 1880–1886
- [2] D. R. Reyes, D. Iossifidis, P Auroux, A Manz, "Micro Total Analysis Systems. 1. Introduction, Theory, and Technology ", *Anal. Chem.* 74 (2002) 2623-2636
- [3] K. W. Oh, C. H. Ahn, "A review of microvalves", *J. Micromech. Microeng.* 16 (2006) R13–R39.
- [4] A. Manz, Y. Miyahara, J. Miura, Y. Watanabe, H. Miyagi, K. Sato, "Design of an Open-tubular Column Liquid Chromatograph Using Silicon Chip Technology", *Sensors and Actuators, B 1* (1990) 249-255
- [5] A. Manz, N. Graber, H. M. Widmer, "Miniaturized Total Chemical Analysis Systems: a Novel Concept for Chemical Sensing", *Sensors and Actuators B 1* (1990) 244-248.
- [6] S. Bohm, G. J. Burger, M. T. Korthorst, F. Roseboom, "A micromachined silicon valve driven by a miniature bi-stable electro-magnetic actuator", *Sensors and Actuators A 80* (2000) 77–83.
- [7] H. Hartshorne, C. J. Backhouse, W. E. Lee, "Ferrofluid-based microchip pump and valve", *Sensors and Actuators B 99* (2004) 592–600.
- [8] T. Pan, S. J. McDonald, E. M. Kai1, B. Ziaie1, "A magnetically driven PDMS micropump with ball check-valves", *J. Micromech. Microeng.* 15 (2005) 1021–1026
- [9] C. Yamahata, F. Lacharme, Y. Burri, M. A. M. Gijs, "A ball valve micropump in glass fabricated by powder blasting", *Sensors and Actuators B 110* (2005) 1-7
- [10] H. Andersson, W van der Wijngaart, P. Griss, F. Niklaus, G. Stemme, "Hydrophobic valves of plasma deposited octafluorocyclobutane in DRIE channels", *Sensors and Actuators B 75* (2001) 136-141.
- [11] L. B. Schneider, " Desenvolvimento de um chip microfluídico para diagnósticos em saúde pública: prova de conceito", *Dissertação de mestrado defendida em 2010 na UFPR.*
- [12] C. Fu, R. Truckenmueller, Z. Rummler, W. K. Schomburg, "Magnetically Driven Micro Ball Valve Fabricated by Multilayer Adhesive Film Bonding", *Dissertação de mestrado defendida em 2003 na Universidade de Karlsruhe.*
- [13] P. K. Kundu, I. M. Cohen, "Fluid Mechanics", 4<sup>a</sup> ed. Elsevier (2008)
- [14] D. F. Young, B. R. Munson, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch, "A Brief Introduction to Fluid Mechanics", 5<sup>a</sup> ed, John Wiley & Sons, Inc. (2011)

- [15] P. Gravesen, J. Branebjerg, O. S. Jensen, "Microfluidics-a review", *J. Micromech. Microeng.* 3 (1993) 168-182.
- [16] H. Bruus, "Theoretical Microfluidics", Oxford University Press (2008)
- [17] J. M. D. Coey, "Rare-Earth Iron Permanent Magnets", Oxford Science Publications (1996)
- [18] Editores: E. T. Lacheisserie, D. Gignoux, M. Schlenker, "Magnetism: Materials and applications", Kluwer Academic Publishers (2002).
- [19] R. E. Hummel, "Understanding Materials Science: History, Properties, Applications-Second Edition", Editora Springer (2004).
- [20] P. Berger, N. B. Adelman, K. J. Beckman, D. J. Campbell, A. B. Ellis, G. C. Lisensky, "Preparation and Properties of an Aqueous Ferrofluid", *J. Chem. Ed.* 76 (1999) 943-948
- [21] F. Odgen, "The Last Book You'll Ever Read", MacFarlane, Walter and Ross: Toronto, 1993; p 206
- [22] C. Scherer, A. M. Figueiredo Neto, "Ferrofluids: Properties and Applications", *Brazilian J. Phys.* 35 (2005) 718-727
- [23] J. D. Jackson, "Classical Electrodynamics", 3<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc. (1999)
- [24] J. R. Reitz, F. J. Milford, R. W. Chisty, "Fundamentos da Teoria Eletromagnética", Editora Campus (1982).
- [25] J. D. Griffiths, "Introduction to Electrodynamics", 3<sup>a</sup> ed. Prentice Hall (1998).
- [26] A. Hatch, A. E. Kamholz, G. Holman, P. Yager, K. F. Böhringer, "A Ferrofluidic Magnetic Micropump", *J. of Microelectromechanical Systems* 10 (2001) 215-221.