



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



ROGÉRIO ESPÍNDOLA SILVEIRA

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR *VOICE COIL*

Canoas, Dezembro de 2009



ROGÉRIO ESPÍNDOLA SILVEIRA

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM MOTOR *VOICE COIL*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Departamento:

Engenharia Elétrica

Área de Concentração

Área de Tecnologia e Computação

Professor Orientador:

Dra.Eng. Eletr. Marília Amaral da Silveira – CREA-RS: 50.909-D

Canoas

2009



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome do Autor: Rogério Espíndola Silveira

Matrícula: 021014905-1

Título: Estudo e desenvolvimento de um motor *voice coil*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Professor Orientador:

Dra. Eng. Eletr. Marília Amaral da Silveira

CREA-RS: 50.909-D

Banca Avaliadora:

MSc. Eng. Eletr. Luis Fernando Espinosa Cocian

CREA-RS: 088866-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

MSc. Eng. Eletr. Dalton Luis Rech Vidor

CREA-RS: 079005-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Assinaturas:

Autor

Rogério Espíndola Silveira

Orientador

Prof. Marília Amaral da Silveira

Avaliador

Prof. Luis Fernando Espinosa
Cocian

Avaliador

Prof. Dalton Luis Rech Vidor

Relatório Aprovado em:



DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Solange e Lourdes,
pelo exemplo de dedicação e perseverança.

Andréia, Vinícius, Eduardo, Caroline
e Amanda, tudo que faço é pensando em vocês.



AGRADECIMENTOS

À professora Marília Amaral da Silveira, pelo estímulo e dedicação de sua orientação, sempre enriquecendo o trabalho com sua sabedoria e paciência, dignos de um verdadeiro mestre.

Ao professor Dalton Luis Rech Vidor, por sua co-orientação, com oportunas e valiosas contribuições, imprescindíveis ao sucesso do trabalho.

À professora Miriam Noemi Cáceres Villamayor, por seu valioso apoio no momento da definição da escolha do trabalho, por sua amizade e incentivo durante todo o curso.

A todos os professores que tive durante estes longos anos de faculdade, meu sincero agradecimento, pois muito me ensinaram, sempre com respeito e dedicação.

A todos os funcionários do laboratório, que sempre apoiaram na realização de nossas tarefas.

Aos colegas e amigos Clairton, Diego Fraga, Molina e os gêmeos Evandro e Évertom, por termos caminhado juntos até o final, com apoio e incentivo essenciais em todos os momentos.

Ao grande amigo Rogério Dias, por sua amizade, incentivo e companheirismo, solidário sempre.

Aos familiares e amigos, pelo otimismo transmitido em todos os momentos.



"Que ninguém faça ilusões de que a simples ausência de guerra, ainda que sendo tão desejada, seja sinônimo de uma paz verdadeira. Não há verdadeira paz se não vier acompanhada de equidade, verdade, justiça e solidariedade."

Papa João Paulo II



RESUMO

SILVEIRA, Rogério Espíndola. **Estudo e Desenvolvimento de um Motor Voice Coil**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2009.

Este trabalho apresenta a análise e o projeto de um motor linear do tipo *voice coil*. O dispositivo foi projetado com base nas aplicações conhecidas, como leitores de disco rígido. O dispositivo em estudo possui uma parte estacionária, uma parte móvel que proporciona um movimento linear, e um módulo de comando. A parte estacionária do motor é formada pelo núcleo de material ferromagnético macio de aço 1020 e ímãs permanentes de NdFeB colocados na face interna do núcleo. A parte móvel é formada por uma bobina de fio de cobre e o suporte para seu deslocamento. O módulo de comando fornece a corrente no sentido adequado para o acionamento do carro. O motor linear foi desenhado, modelado, simulado e construído. As simulações do comportamento do fluxo magnético foram realizadas através de um programa que utiliza o método de elementos finitos. As simulações possibilitaram obter os valores teóricos da força linear que atuam sobre a bobina. Os resultados encontrados, conforme os métodos utilizados apresentaram diferença de 16,2%, justificáveis por diferentes critérios adotados em cada análise.

Palavras chave: Motor linear *voice coil*, simulação eletromagnética, ímãs permanentes de NdFeB.



ABSTRACT

SILVEIRA, Rogério Espíndola. **Study and Development of a Voice Coil Motor**. Work of Conclusion of Course in Electrical Engineering - Electrical Engineering Department. Lutheran University of Brazil. Canoas, RS. 2009.

This work presents the analysis and design of a voice coil linear motor. The device was designed, based on known applications, as magnetic heads in hard disk drives. The device under study, has a stator, a mover that allows linear movement, and a driver system. The stator of the motor is made by soft ferromagnetic material, 1020 steel and NdFeB permanent magnets placed on the inner surface of the yoke. The mover is built of a coil formed by copper wire and a suspension system. The driver system gives current in the correct way in order to produce linear force. The linear motor was designed, modeled, simulated and built. The simulations of the behaviour of the magnetic flux were made by means of a computational program that employs the finite element method. The simulations allowed to obtain the theoretical values of the linear force produced on the coil. The results, according to the methods used were different from 16.2%, justified by different criteria used in each analysis.

Keywords: voice coil linear motor, electromagnetic simulation, NdFeB permanent magnet



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Vista frontal do motor linear.	2
Figura 2.1 - Campo magnético num solenóide percorrido pela corrente I	5
Figura 2.2 - Processo de fabricação do imã permanente: (a) Sinterizado e (b) Compactado [4]	6
Figura 2.3 - Curvas de desmagnetização de um imã permanente [4].	7
Figura 2.4 - Curva de desmagnetização dos imãs permanentes de NeFeB [4].	8
Figura 2.5 - Circuito magnético contendo um imã permanente e um entreferro [4].	9
Figura 2.6 - (a) Circuito magnético contendo um imã permanente e uma bobina (b) localização da reta de carga do circuito magnético em função da corrente I [4].	12
Figura 2.7 - Condutor imerso num campo magnético \vec{B} , percorrido por uma corrente \vec{I} [2].	12
Figura 2.8 - Demonstração da regra da mão direita [2].	13
Figura 2.9 - Motor voice coil desenvolvido na UFRGS [6].	14
Figura 2.10 - Máquina galvanométrica de três eixos desenvolvida na UFSC [5].	15
Figura 2.11 - Vista em perspectiva e lateral do motor linear [1].	15
Figura 2.12 - Vista frontal do motor linear [1].	16
Figura 2.13 - Imagem do motor linear.	17
Figura 2.14 - Bobina do motor linear com as interações das grandezas elétricas.	18
Figura 2.15 - Medidas do protótipo do motor linear.	18
Figura 2.16 - Circuito equivalente do motor linear.	19
Figura 3.1 - Medidas do material ferromagnético, do entreferro e do imã permanente.	21
Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente.	21
Figura 3.3 - Curva de desmagnetização de imãs permanentes de NeFeB,	23
Figura 3.4 - Circuito magnético com nós e linhas.	26
Figura 3.5 - Definição da região de fronteira.	26
Figura 3.6 - Malha de visualização de intensidade de campo magnético.	27
Figura 3.7 - Densidade média de fluxo sem corrente na bobina.	27
Figura 3.8 - Medidas da bobina para cálculo da resistência.	28
Figura 3.9 - Circuito eletrônico de comando da bobina.	29
Figura 4.1 - Simulação de força para excitação da bobina com 1A.	32
Figura 4.2 - Visualização da densidade média de fluxo sem corrente na bobina.	37
Figura 4.3 - Mapeamento por cores da densidade de fluxo sem corrente na bobina.	37
Figura 4.4 - Pontos com maior densidade de fluxo magnético em destaque.	38
Figura 4.5 - Gráfico da densidade média sem corrente.	38
Figura 4.6 - Simulação de força para excitação da bobina com 0,25 A.	39
Figura 4.7 - Simulação de força para excitação da bobina com 2,5 A.	39
Figura 4.8 - Gráfico com relação entre corrente e força desenvolvidas.	40
Figura 4.9 - Gráfico da densidade média com corrente.	40
Figura 4.10 - Pontos de medição de tensão para visualização da densidade de campo magnético.	41
Figura 4.11 - Medição de tensão no ponto 1.	42
Figura 4.12 - Medição de tensão no ponto 2.	42
Figura 4.13 - Medição de tensão no ponto 3.	43
Figura 4.14 - Medição de tensão no ponto 4.	43
Figura 4.15 - Medição de tensão no ponto 5.	44
Figura 4.16 - Medição de tensão no ponto 6.	44
Figura 4.17 - Medição de tensão no ponto 7.	45
Figura 4.18 - Medição de tensão no ponto 8.	45
Figura 4.19 - Medição de tensão no ponto 9.	46



Figura 4.20 - Medição de tensão no ponto 10.	46
Figura 4.21 - Medição de tensão no ponto 11.	47
Figura 4.22 - Medição de tensão no ponto 12.	47
Figura 4.23 - Medição de tensão no ponto 13.	48
Figura 4.24 - Medição de tensão no ponto 14.	48
Figura 4.25 - Medição de tensão no ponto 15.	49
Figura 4.26 - Medição de tensão no ponto 16.	49
Figura 4.27 - Medição de tensão no ponto 17.	50
Figura 4.28 - Medição de tensão no ponto 18.	50
Figura 4.29 - Medição de tensão no ponto 19.	51
Figura 4.30 - Medição de tensão no ponto 20.	51
Figura 4.31 - Medição de tensão no ponto 21.	52
Figura 4.32 - Medição de tensão no ponto 22.	52



LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dimensões e características finais do motor linear.	24
Tabela 3.2 - Componentes eletrônicos e função de controle.	30
Tabela 4.1 - Comparação entre simulação cálculo numérico.	31



LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- \vec{B} - Vetor densidade de fluxo magnético [T]
- $(BH)_{\max}$ - Máximo produto energético de um ímã permanente [J/m³]
- B_m - Densidade de fluxo no ímã permanente [T]
- \vec{B}_r - Vetor densidade de fluxo remanente ou remanência [T]
- $B_x \hat{i}$ - Componente x do vetor da densidade de fluxo magnético produzido por \hat{i}
- $B_y \vec{j}$ - Componente y do vetor da densidade de fluxo magnético produzido por \vec{j}
- $B_z \vec{k}$ - Componente z do vetor da densidade de fluxo magnético produzido por \vec{k}
- C_f - Coeficiente de espraiamento do fluxo magnético no entreferro
- \vec{F} - Vetor força eletromagnética linear total (vetor força de Lorentz)[N]
- \vec{H} - Vetor intensidade de campo magnético [A/m]
- H_c - Força coercitiva [A/m]
- H_{ci} - Coercitividade intrínseca [A/m]
- H_{fe} - Intensidade de campo magnético no ferro [A/m]
- H_g - Intensidade de campo magnético no entreferro [A/m]
- H_m - Intensidade de campo magnético do ímã permanente [A/m]
- I - Corrente elétrica [A]
- \vec{J} - Vetor de densidade de corrente na bobina [A/m²]
- L_f - Fator de dispersão de fluxo magnético



- \vec{M} - Vetor intensidade de magnetização ou magnetização [A/m]
- \vec{M}_r - Vetor magnetização residual ou remanente [A/m]
- N - Número de espiras de um enrolamento
- S - Superfície que envolve inteiramente um corpo sobre o qual forças estão atuando [m²]
- $d\vec{S}$ - Vetor normal à superfície s
- $d\vec{\ell}$ - Vetor unitário de comprimento na direção da corrente
- $d\ell_m$ - Caminho médio do fluxo magnético no imã permanente
- dv - Velocidade média da carga elétrica
- l, ℓ - Comprimento total de um circuito magnético. Comprimento de um condutor metálico [m]
- $\vec{\ell}$ - Vetor cujo módulo é o comprimento ativo do condutor e cujos sentido e direção são paralelos a $q\vec{v}$ [m]
- l_{fe} - Comprimento médio da região em ferro [m]
- l_g - Comprimento do entreferro [m]
- l_m - Comprimento axial do imã permanente [m]
- q - Carga elétrica [C]
- s - Área de uma região onde está estabelecida uma densidade de fluxo magnético \vec{B} [m²]
- μ - Permeabilidade magnética de um determinado material [H/m]
- μ_0 - Permeabilidade magnética no vácuo [H/m]
- μ_m - Permeabilidade magnética dos imãs permanentes [H/m]
- μ_r - Permeabilidade magnética relativa
- ρ - Densidade de carga [C/m³]
- σ - Condutividade elétrica no condutor [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]



ϕ - Fluxo magnético [Wb]

ϕ_d - Fluxo magnético disperso [Wb]

ϕ_{Fe} - Fluxo magnético no ferro de um circuito magnético [Wb]

ϕ_g - Fluxo magnético no entreferro [Wb]

ϕ_m - Fluxo magnético produzido pelo imã permanente [Wb]

\mathfrak{R}_{fe1} - Relutância 1 do núcleo da armadura do atuador linear [Ae/Wb]

\mathfrak{R}_{fe2} - Relutância 2 do núcleo da armadura do atuador linear [Ae/Wb]

\mathfrak{R}_{fe3} - Relutância 3 do núcleo da armadura do atuador linear [Ae/Wb]

\mathfrak{R}_{fe4} - Relutância 4 do núcleo da armadura do atuador linear [Ae/Wb]

\mathfrak{R}_{ar} - Relutância do ar [Ae/Wb]

$\mathfrak{R}g$ - Relutância do ar [Ae/Wb]



LISTA DE SIGLAS

DASDS	- <i>Direct Access Storage Devices</i>
AlNiCo	- Alumínio Níquel Cobalto
NeFeB	- Neodímio Ferro Boro
MEF	- Método dos Elementos Finitos
SmCo	- Samário Cobalto
LMEAE	- Laboratório de Máquinas Elétricas
UFRGS	- Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
FEMM	- <i>Finite Element Method Magnetics</i>
AWG	- <i>American Wire Gauge</i>
vcm	- Voice coil motor
Voice coil	- Bobina de voz
PEAD	- Polietileno de alta densidade



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Visão Geral do Trabalho.....	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1	Magnetismo e Circuitos Magnéticos.....	4
2.2	Materiais Ferromagnéticos.....	5
2.3	Força de Lorentz.....	12
2.4	Motores Lineares Voice Coil.....	14
2.5	Apresentação do Motor Voice Coil e Princípio de Funcionamento.....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1	Descrição Geral do Sistema.....	20
3.2	Modelos.....	20
3.3	Método dos Elementos Finitos (MEF) e Simulações.....	25
3.4	Simulações.....	26
3.5	Sistema de Comando.....	28
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	31
4.1	Simulações.....	31
4.2	Resultado Prático.....	41
4.3	Comparações dos Resultados das Simulações, Modelos e o Sistema Real.....	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
5.1	Conclusões.....	54
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	55
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	56
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DOS IMÃS PERMANENTES DE NEODÍMIO-FERRO-BORO	57
	ANEXO B – DATA SHEET TIP 147.....	58
	ANEXO C - DATA SHEET IRF840A.....	59
	ANEXO D - DATA SHEET IR2111(S).....	60
	ANEXO E - DATA SHEET SN74LS73A.....	61
	ANEXO F - DATA SHEET MS MV7.....	62
	ANEXO F - DATA SHEET KA7805.....	63



1 INTRODUÇÃO

Várias aplicações na indústria exigem movimentos lineares com vários graus de confiabilidade. Nos motores lineares o movimento pode ser obtido diretamente através de um único dispositivo de tração, denominado de carro, que desenvolve movimento por ação eletromagnética. Nos últimos anos, tem-se verificado um grande número de pesquisas em torno dos motores lineares para uso em periféricos para computadores e para aplicações na indústria, como, por exemplo, em máquinas de controle numérico.

Os Motores *Voice Coil* (*bobina de voz*), são assim chamados devido ao seu funcionamento ser correspondente ao funcionamento dos alto-falantes. Uma bobina é excitada por corrente e um ímã permanente interage com o campo dessa bobina, deslocando-a, produzindo assim o movimento desta. A partir disso, um “*Voice Coil*” pode produzir também movimentos lineares de maior curso ou em arco, como os atuadores utilizados para mover cabeça de leitura de winchester, por exemplo. O motor *voice coil* possui um deslocamento linear, sendo apropriado quando há a necessidade de controle de velocidade e frenagem, evitando variações bruscas, que geram movimentos indesejáveis num sistema de deslocamento.

Neste trabalho foram utilizadas teorias que definem o comportamento e as características dos componentes de um sistema assim estruturado. Cada componente tem sua característica eletromagnética, e o conjunto destas nos proporcionam equipamentos com alta eficiência.

Um motor *voice coil* possui uma bobina montada em torno de uma estrutura móvel e ímãs permanentes estacionários, conforme mostra a figura 1.1. A força de atuação sobre a bobina é calculada pelo produto entre o número de espiras, comprimento ativo e corrente na bobina e a densidade de fluxo na bobina produzida pelos ímãs permanentes.

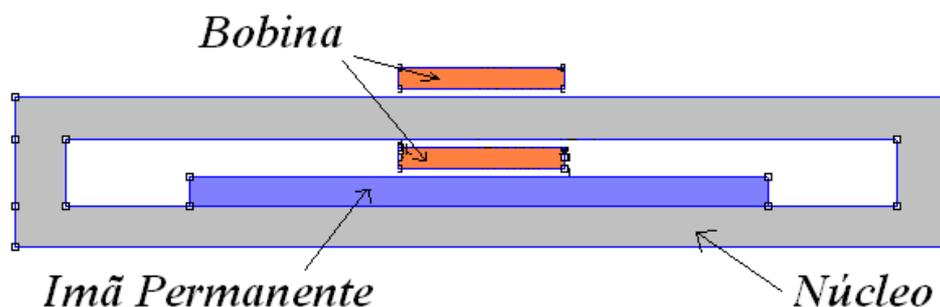


Figura 1.1 - Vista frontal do motor linear.

O princípio de funcionamento baseia-se na circulação de corrente pela bobina que está imersa em um campo magnético, criando uma força (Força de Lorentz) que irá atuar sobre ela. Este é o princípio da Lei de Lorentz.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Projetar, simular, construir e testar um motor linear *voice coil*. Demonstrar de forma teórica e prática o efeito da força de Lorentz, através de cálculos teóricos e da montagem deste um protótipo, para visualização do deslocamento do carro quando submetido à força eletromagnética.

1.1.2 Objetivos Específicos

Projetar um protótipo de um motor linear *voice coil*, que tenha ímãs permanentes de NdFeB como fonte de excitação do campo e que desenvolva força proporcional à corrente na bobina.

Simular o comportamento do fluxo magnético no circuito magnético do motor *voice coil* e da força desenvolvida sobre a bobina, em função da corrente na mesma, através do programa computacional FEMM, que utiliza o método dos elementos finitos

Construir o motor em estudo e analisar suas características de operação.

Projetar, construir e testar um sistema de controle do motor para permitir acionar as bobinas com corrente no valor e no sentido adequado à produção de força.



Demonstrar ao final do trabalho, de forma teórica e prática, o efeito da força de Lorentz em um motor *voice coil*.

Disponibilizar o protótipo para futuras pesquisas e projetos relacionados ao atuador linear *voice coil*.

1.2 Visão Geral do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No capítulo 2, referencial teórico, é feita uma revisão dos principais conceitos referentes ao eletromagnetismo aplicados a este trabalho. Campo e fluxo magnéticos produzidos por um ímã permanente, densidade de fluxo magnético, materiais ferromagnéticos, ligas ferromagnéticas e curvas de desmagnetização de ímãs permanentes estão relacionados neste capítulo. O capítulo 2 também apresenta a força de Lorentz, estudos acadêmicos com o emprego de motores *voice coil* e apresenta o motor *voice coil* deste trabalho e seu princípio de funcionamento.

No capítulo 3, materiais e métodos, há uma descrição geral de sistemas *voice coil*. Modelos e cálculos matemáticos definem a base teórica do trabalho e o circuito equivalente. São apresentadas as características eletromagnéticas dos materiais utilizados no protótipo, a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) como meio de proporcionar simulações e a descrição do sistema de comando empregado para fornecimento da corrente necessária para a bobina.

Com o capítulo 4, apresentação e discussão dos resultados, estão apresentados os resultados das simulações efetuadas, a metodologia utilizada, análises estatísticas e a comparação entre simulações, cálculos teóricos e resultado prático.

O capítulo 5 contém as conclusões e apresenta sugestões para o desenvolvimento futuro do trabalho realizado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica para desenvolvimento de um motor *voice coil*. Os estudos já existentes [1][4] sobre magnetismo e circuitos magnéticos, suas grandezas e características dos circuitos magnéticos. A utilização de ímãs permanentes modernos de alto produto energético tem propiciado o surgimento de dispositivos eletromagnéticos com novas características construtivas e de funcionamento [4]. O emprego de ímãs permanentes de NeFeB possibilitou o desenvolvimento do motor *voice coil* em estudo. Alguns estudos neste campo de atuação auxiliam no presente trabalho.

2.1 Magnetismo e Circuitos Magnéticos

Um campo magnético pode ser produzido por um ímã permanente, ou por um condutor percorrido por corrente elétrica [4]. Quando um condutor elétrico em forma de solenóide é percorrido por corrente elétrica, haverá o aparecimento de campo magnético, cujas linhas de força estarão concentradas, principalmente, em seu interior, conforme mostra a figura 2.1 [4]. Se uma barra de material ferro magnético (núcleo) é colocada no interior do solenóide, as linhas de fluxo magnético ficarão concentradas nesta barra, porque o caminho oferecido por ela possui alta permeabilidade magnética [4]. O símbolo \vec{B} representa o vetor densidade de fluxo magnético e expressa a relação entre o fluxo magnético ϕ através de uma determinada região e o elemento área, $d\vec{S}$, perpendicular a \vec{B} [4].

Assim:

$$\phi = \iint_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

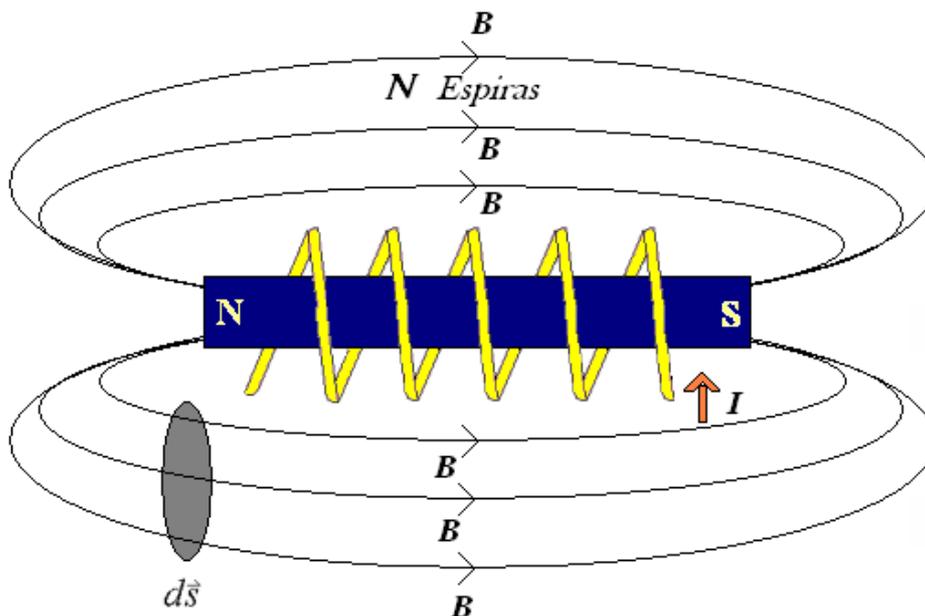


Figura 2.1 - Campo magnético num solenoide percorrido pela corrente I .

2.2 Materiais Ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos são classificados em duas categorias principais: materiais magneticamente macios (*soft magnetic materials*) e materiais magneticamente duros (*hard magnetic materials*) [4]. Os primeiros são materiais sensíveis a campos magnéticos externos, têm alta permeabilidade magnética, permitindo que neles se estabeleça um fluxo magnético de forma concentrada, sendo utilizados na construção de máquinas elétricas; além de terem por função alojar os condutores do circuito da armadura e de campo, providenciam um caminho de baixa relutância magnética para o fluxo magnético, pois possuem a menos da saturação, elevada permeabilidade magnética e baixa coercividade. Os materiais magnetizantes duros são utilizados para a fabricação de ímãs permanentes [4].

Entre os principais materiais utilizados para a produção de ímãs permanentes têm-se as ferrites, ligas contendo terras raras, ligas contendo alumínio-níquel-cobalto (AlNiCo), ligas ferro-cobalto, ferro-cromo, ferro-tungstênio e ferro-carbono [4]. As ferrites são as mais importantes para a produção de ímãs permanentes, em termos comerciais, pois são consideradas baratas e possuem alta

coercividade [4]. As ferrites são pertencentes ao grupo de materiais que possuem óxido férrico (Fe_2O_3) [4]. São também denominadas de cerâmicas [4].

O termo terras raras é utilizado para classificar elementos químicos tais como o Samário, o Prússio, o Neodímio, dentre outros. A primeira referência ao desenvolvimento de ligas de NeFeB foi feita em junho de 1983 por uma empresa japonesa, quando foi anunciado o desenvolvimento de um ímã permanente com um $(BH)_{\text{max}}$ de 278,52 kJ/m³ (35MGOe) [4].

A produção de materiais para confecção de ímãs permanentes pode ser feita através de fundição ou da metalurgia do pó [4]. O processo de fundição baseia-se na fusão de um metal à elevada temperatura e posteriormente moldado em chapas ou lingotes. O uso do processo de metalurgia do pó permite a obtenção de ímãs de alto produto energético [4].

Os ímãs permanentes obtidos através da metalurgia do pó podem ser do tipo compactado ou sinterizado, conforme o método de fabricação empregado. A figura 2.2 apresenta o algoritmo geral de fabricação de ímãs permanentes pela metalurgia do pó. Em (a) é apresentado o processo de fabricação do ímã permanente sinterizado e, em (b) o ímã permanente compactado [4].

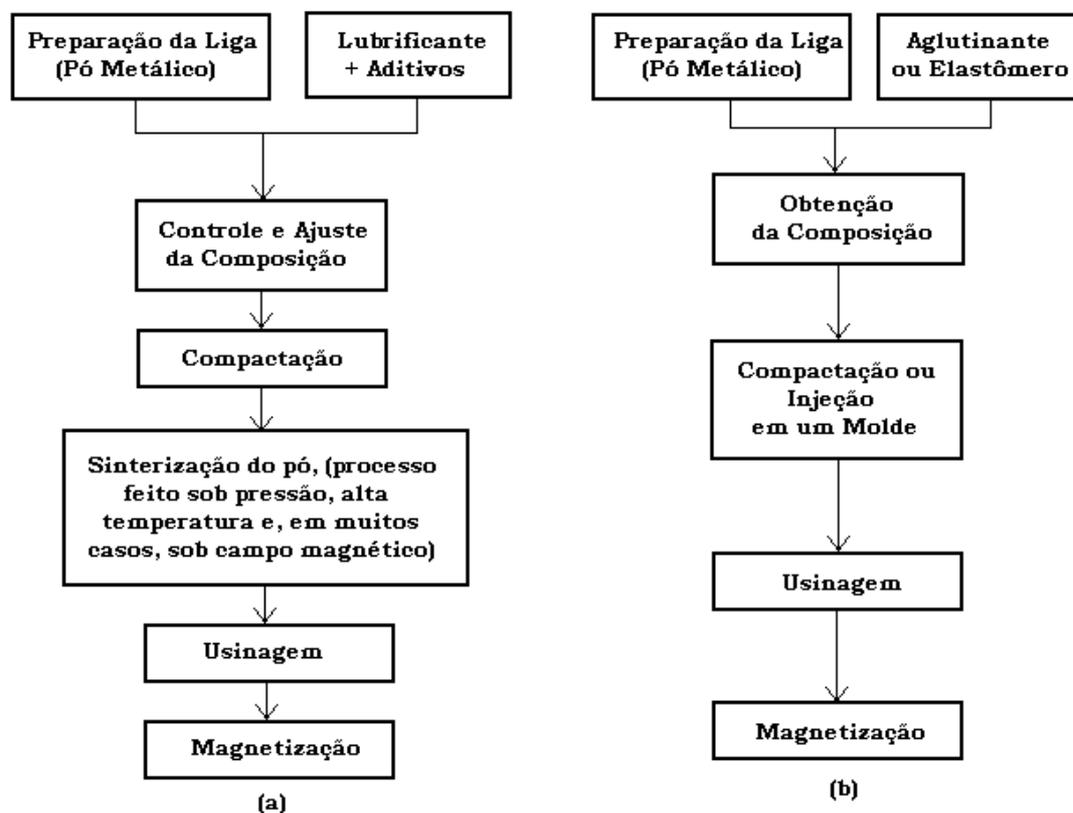


Figura 2.2 - Processo de fabricação do ímã permanente: (a) Sinterizado e (b) Compactado [4]

O processo de fabricação do ímã permanente de NeFeB sinterizado envolve as seguintes etapas: preparação da liga, pré-moagem, moagem, controle e ajuste da composição, alinhamento das partículas, compressão, sinterização, tratamento por calor, usinagem e magnetização [4]. Em relação ao SmCo, o NeFeB apresenta melhores características magnéticas e mecânicas e é também menos quebradiço. Verifica-se que os ímãs de SmCo possuem temperatura máxima de utilização superior às dos ímãs de NeFeB [4].

A análise de um circuito magnético contendo ímãs permanentes prende-se ao segundo quadrante da curva de histerese, definida como curva de desmagnetização normal, apresentada na figura 2.3 [4].

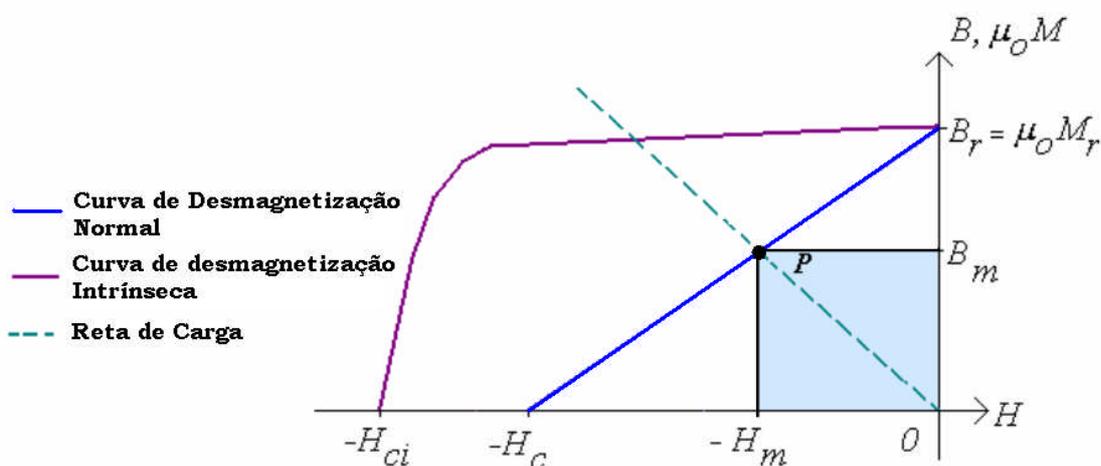


Figura 2.3 - Curvas de desmagnetização de um ímã permanente [4].

Em materiais permanentemente magnetizados, os vetores \vec{B} e \vec{M} variam com o vetor \vec{H} , conforme pode ser visto pelas curvas, apresentadas na figura 2.3., e estão relacionadas pela equação $\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H})$ [4]. Para um ímã permanente, durante o processo de magnetização, o valor do campo aplicado, \vec{H} , é tão elevado, que existe uma diferença significativa entre suas características normais e intrínsecas [4]. A curva de desmagnetização intrínseca é usada para determinar os efeitos de condições externas desmagnetizantes sobre o ímã permanente, e a curva normal, para a determinação da densidade de fluxo nos entreferros de um circuito magnético do qual faça parte um ímã permanente [4]. Quanto maior for o valor do campo externo aplicado, mais divergentes serão as curvas de desmagnetização intrínseca, corresponde à coercitividade intrínseca, H_{ci} . [4] As curvas de desmagnetização de um ímã permanente estão apresentadas na figura 2.3 [4].

Em ímãs permanentes como o NeFeB, a permeabilidade relativa aproxima-se da unidade. Nestes casos, a maior parte da curva de desmagnetização intrínseca possui uma inclinação muito pequena, podendo, por simplificação, ser considerada constante com a variação de \vec{H} na região de operação do ímã permanente [4].

A figura 2.4 apresenta a curva de desmagnetização do ímã permanente de NeFeB .

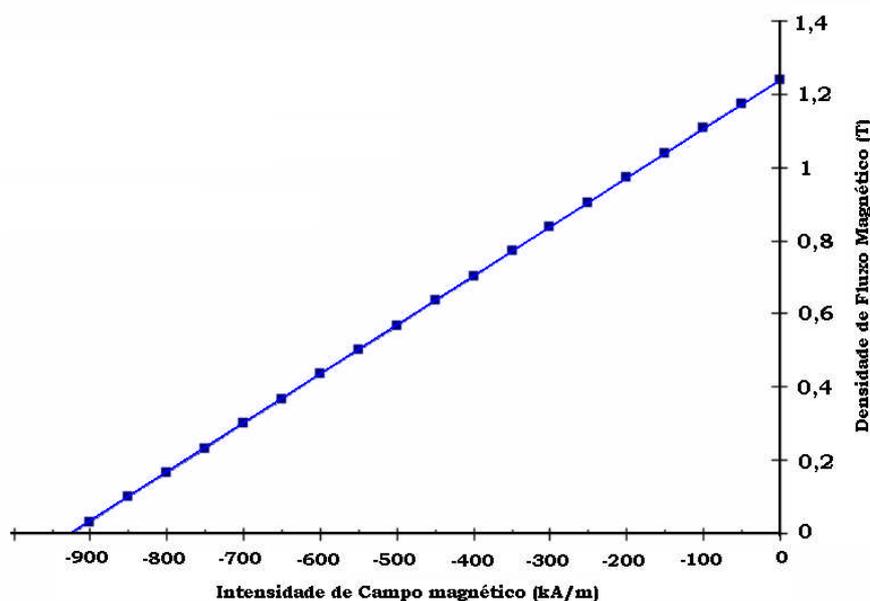


Figura 2.4 - Curva de desmagnetização dos ímãs permanentes de NeFeB [4].

Na curva normal de um ímã permanente, como aquela da figura 2.3, existe um par de coordenadas entre a remanência, B_r , e a coercividade, H_c , cujo produto entre B e H será máximo, possuindo a dimensão de Joule por metro cúbico [4]. O par de coordenadas (B, H) onde ocorre o máximo produto BH , abreviando por $(BH)_{max}$, é denominado de ponto de máximo produto energético [4]. O produto máximo fornece uma indicação da qualidade do ímã permanente [4]. O ponto de operação de uma ímã permanente inserido em um circuito magnético estará localizado no segundo quadrante do ciclo de histerese, entre a retentividade e a coercitividade, sendo representado pelo ponto P na reta que une os pontos de coordenadas $(0, 0)$ e (B, H) no gráfico da figura 2.3 [4].

O circuito apresentado na figura 2.5 contém um ímã permanente, um núcleo de ferro e um entreferro. Como o circuito não possui bobinas com corrente,

a integral de linha de \vec{H} ao longo da linha que corresponde ao caminho médio do fluxo magnético através do circuito magnético de comprimento l , corresponde a [4]:

$$\oint \vec{H} d\ell = N_b \cdot I = 0 \quad (2.1)$$

onde N_b corresponde ao número de espiras de uma determinada bobina e I , à corrente elétrica nessa bobina hipotética [4]. O fluxo produzido pelo imã permanente, ϕ_m , é calculado pela soma do fluxo magnético no entreferro, ϕ_g , e o fluxo magnético disperso, ϕ_d , ou seja, $\phi_m = \phi_g + \phi_d$ [4]. Se a contribuição de cada uma das regiões for considerada, a saber, as regiões do imã permanente, do entreferro e do ferro, a equação (2.2) pode ser desenvolvida em sua forma escalar como [4]:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \int_{l_m} H_m dl_m + \int_{l_{Fe}} H_{Fe} dl_{Fe} + \int_{l_g} H_g dl_g = 0 \quad (2.2)$$

onde l_{Fe} é o comprimento médio da região em ferro e l_g e l_m estão definidos pela figura 2.5 [4]. Se o ferro for considerado ideal com a alta permeabilidade, a equação anterior resulta em [4]:

$$\int_{l_m} H_m dl_m + \int_{l_g} H_g dl_g = 0 \quad (2.3)$$

Se a intensidade de campo magnético for considerada constante em cada região do circuito, a equação (2.3) pode ser resolvida, de forma que a solução seja igual a [4]:

$$H_m l_m + H_g l_g = 0 \quad (2.4)$$

Resolvendo a equação anterior, tem-se:

$$-H_m l_m = H_g l_g \quad (2.5)$$

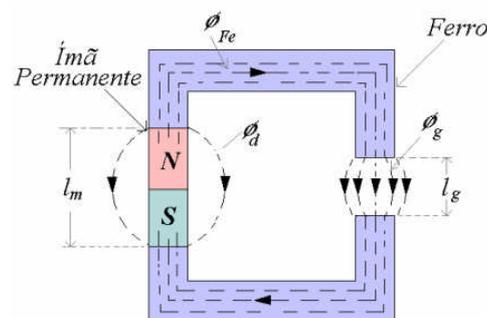


Figura 2.5 - Circuito magnético contendo um ímã permanente e um entreferro [4].

Conforme verificado, H_m e H_g têm sinais opostos, e o campo H_g tem uma ação desmagnetizante sobre imã permanente. No entreferro, a intensidade de campo magnético é calculada por [4]:

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} \quad (2.6)$$

Logo,

$$\frac{B_g}{H_m} = -\mu_0 \left(\frac{\ell_m}{\ell_g} \right) \quad (2.7)$$

Se o fluxo disperso for desprezado, ou seja, se o valor do fluxo magnético no entreferro, ϕ_g , é igual ao valor do fluxo magnético no imã permanente, ϕ_m , tem-se que $B_m \cdot s_m = B_g \cdot s_g$ [4]. Desta forma, a equação (2.7) transforma-se em [4]:

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 \left(\frac{\ell_m}{\ell_g} \right) \left(\frac{s_g}{s_m} \right) \quad (2.8)$$

A equação acima é a equação da reta de carga do imã permanente [4]. O ponto onde a reta de carga corta a curva normal fornece o ponto de operação do imã permanente, ou seja, o par de coordenadas $(-H_m, B_m)$ do gráfico apresentado na figura 2.4 [4]. Através deste ponto, é possível obter-se o valor da densidade de fluxo no entreferro [4]. Os fatores de fluxo disperso e de espraiamento de fluxo no entreferro foram até agora ignorados, pois se considerou o circuito magneticamente ideal [4].

Na região do entreferro o fluxo magnético sofre um espraiamento, resultando em uma área transversal maior considerada para o cálculo da densidade de fluxo no entreferro [4]. O grau de espraiamento do fluxo no entreferro depende da geometria das extremidades do circuito em ferro, da área do ferro e do comprimento do entreferro [4]. A área do entreferro é estimada em função do coeficiente de espraiamento do fluxo no entreferro, C_f , que relaciona s_g e s_m , tal que $C_f = \frac{s_g}{s_m}$ [4]. Este coeficiente é de difícil determinação [4], assim como o fator de dispersão de fluxo [4], L_f , que relaciona o fluxo total com o fluxo que cruza o entreferro, ou seja,

$$L_f = \frac{\phi_g + \phi_d}{\phi_g} = \frac{\phi_m}{\phi_g} = \frac{s_m B_m}{s_g B_g} \quad (2.9)$$

Substituindo-se a equação (2.9) na equação (2.7), tem-se

$$\frac{B_m}{L_f H_m} \left(\frac{s_m}{s_g} \right) = - \left(\frac{\ell_m}{\ell_g} \right) \mu_0 \quad (2.10)$$

ou,

$$\frac{B_m}{H_m} = - \left(\frac{\ell_m}{\ell_g} \right) \left(\frac{s_m}{s_g} \right) \mu_0 L_f = - \left(\frac{\ell_m}{\ell_g} \right) \mu_0 L_f C_f \quad (2.11)$$

Se um circuito magnético, similar ao apresentado na figura 2.6, for composto por um imã permanente e por uma ou mais bobinas percorridas por corrente, o ponto de operação do imã permanente dependerá, além das características geométricas do circuito magnético, da força magnetomotriz produzida pelas bobinas. Como há um enrolamento percorrido por corrente no circuito magnético da figura 2.6(a), a equação (2.1) transforma-se em:

$$\vec{H} \cdot d\ell = Nb \cdot I = H_m \ell_m + H_g \ell_g \quad (2.12)$$

Considerando que $B_g = \frac{B_m}{L_f C_f}$, após algumas operações, obtém-se:

$$B_m = \left(\frac{N_b I}{\ell_m} - H_m \right) \left(\frac{\ell_m}{\ell_g} \right) \mu_0 L_f C_f \quad (2.13)$$

A equação anterior representa a reta de carga de um imã permanente inserido em um circuito que contém um ou mais enrolamentos percorridos por corrente. A força magnetomotriz da bobina define a posição da reta de carga em relação ao eixo de H , através de $\frac{N_b \cdot I}{\ell_m}$, conforme mostra a figura 2.6 [4].

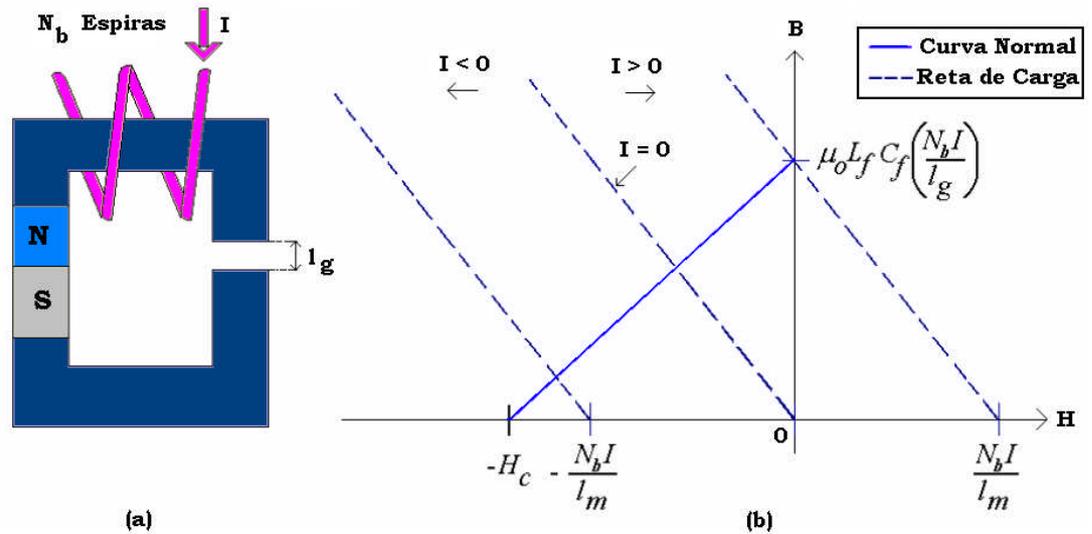


Figura 2.6 - (a) Circuito magnético contendo um ímã permanente e uma bobina
 (b) localização da reta de carga do circuito magnético em função da corrente I [4].

2.3 Força de Lorentz

O princípio fundamental de funcionamento do motor *voice coil* baseia-se na Força de Lorentz [2]. Uma força mecânica, de origem eletromagnética, será produzida entre um condutor de comprimento $\vec{\ell}$ percorrido por uma corrente I , e um campo magnético, no qual este condutor está imerso, conforme apresentado na figura 2.7 [2].

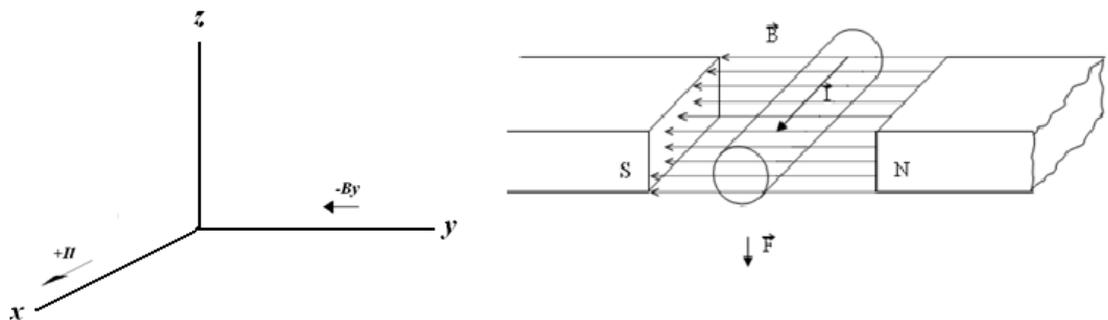


Figura 2.7 - Condutor imerso num campo magnético \vec{B} , percorrido por uma corrente \vec{I} [2].

$$\vec{F} = I \vec{\ell} \times \vec{B} \quad (2.14)$$

Onde,

“ \rightarrow ” significa grandeza vetorial

ℓ = comprimento ativo do condutor [m]

\vec{I} = corrente elétrica [A]

\vec{B} = densidade de fluxo magnético na região do condutor [T]

\vec{F} = força de Lorentz = força mecânica [N]

Considerando $|\vec{F}|$ como módulo da força de Lorentz, temos:

$$|\vec{F}| = BIL\sin\theta$$

Onde,

θ = ângulo entre $\vec{I}\ell$ e \vec{B}

$$\vec{B} = B_x\hat{i} + B_y\hat{j} + B_z\hat{k}$$

Para definição do sentido da força mecânica, por convenção, são utilizadas as regras da mão direita e esquerda. A figura 2.8 apresenta a regra da mão direita, utilizada para a determinação do sentido da força que atua sobre o condutor [2]:

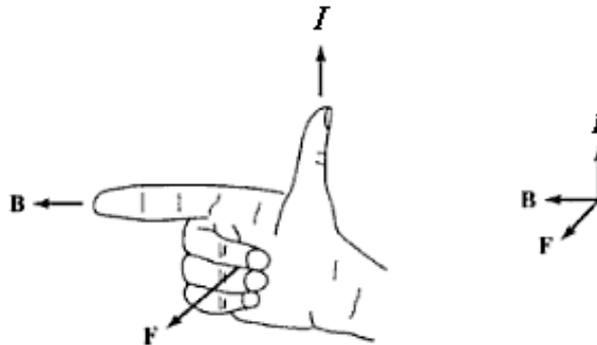


Figura 2.8 - Demonstração da regra da mão direita [2].

Onde,

Dedo médio = sentido do vetor força

Dedo indicador = sentido do vetor densidade de fluxo magnético

Dedo polegar = sentido da corrente

2.4 Motores Lineares Voice Coil

O motor *voice-coil* (vcm) é usado no cabeçote de leitura na unidade de disco ou Dispositivo de Armazenagem de Acesso Direto (DASDs – *Direct Access Storage Devices*), os quais são usados para armazenar e recuperar informação digital [1]. O nome motor *voice-coil* foi adotado porque os inventores utilizaram a idéia desse motor do princípio de funcionamento dos alto-falantes [1]. Isto consiste numa bobina móvel num núcleo e um imã que provém o campo magnético na lacuna [1]. Quando a corrente circula na bobina, a bobina experimenta uma força (Força de Lorentz), resultando um movimento [1]. A direção deste movimento é determinada pela direção da corrente que circula nesta bobina [1]. Existem dois tipos de motores *voice-coil*. Um é chamado de *vcm* linear desde que tenha um movimento em linha reta [1]. O outro é chamado *vcm* rotacional desde que seja feito em arco [1]. Neste capítulo, foram desenvolvidas fórmulas matemáticas necessárias ou equações para auxiliar no conhecimento da operação do vcm. Foram também estudadas várias estruturas magnéticas usadas no projeto vcm e desenvolvidas ferramentas necessárias para analisar e desenhar estruturas magnéticas para vcm.

Entre os trabalhos em evidência no meio acadêmico, convém ressaltar o trabalho realizado pelo LMEAE (Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), figura 2.9, que desenvolve um motor *voice coil* [6].

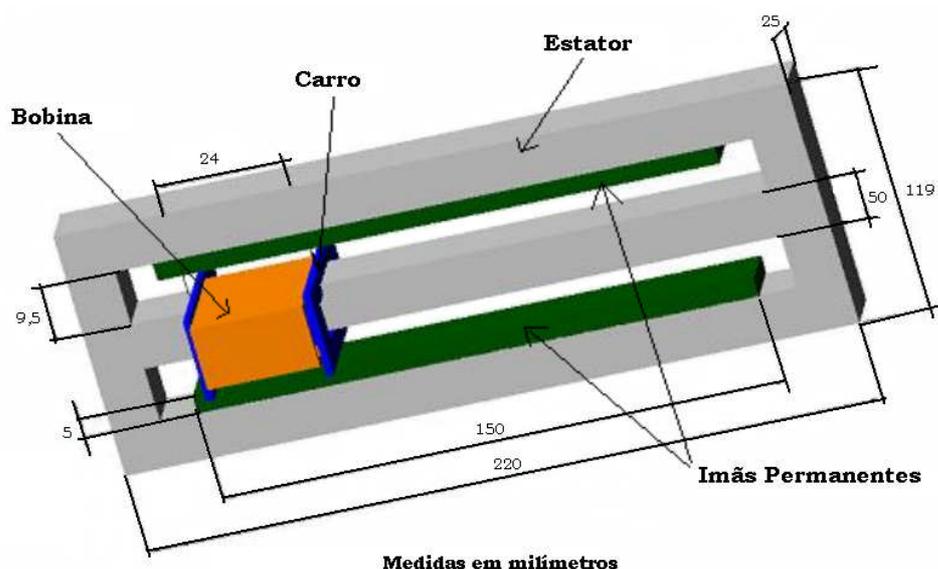


Figura 2.9 - Motor voice coil desenvolvido na UFRGS [6].

Trabalho relacionado na área também é realizado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em convênio com a empresa Automatisa de Florianópolis, que desenvolvem uma máquina galvanométrica de três eixos, utilizada para sistemas de posicionamento de corte laser, figura 2.10 [5].

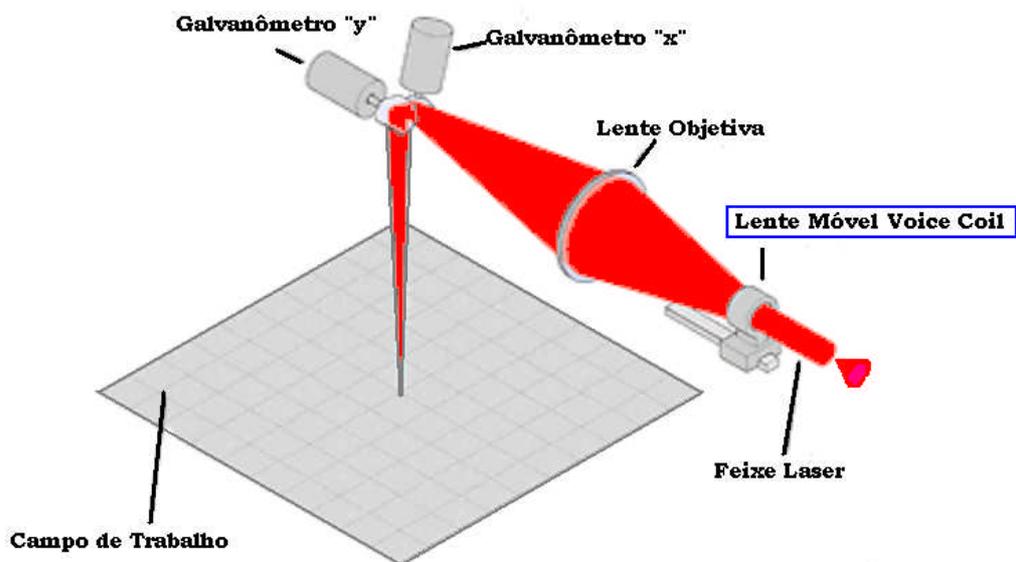


Figura 2.10 - Máquina galvanométrica de três eixos desenvolvida na UFSC [5].

Outro estudo desenvolvido nesta área é apresentado no livro “*Electromechanical Motion Devices*” de Hi-Dong Chai, desenvolvido com fins teóricos. Este trabalho é a base de desenvolvimento do motor linear deste trabalho, com suas geometrias e características eletromagnéticas. As figuras 2.11 e 2.12 apresentam as características construtivas do motor, com suas geometrias e sem as medidas [1]:

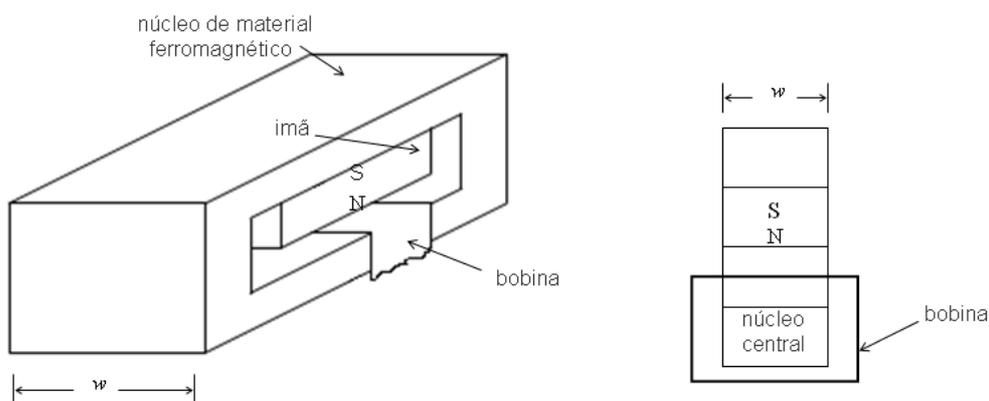


Figura 2.11 - Vista em perspectiva e lateral do motor linear [1].

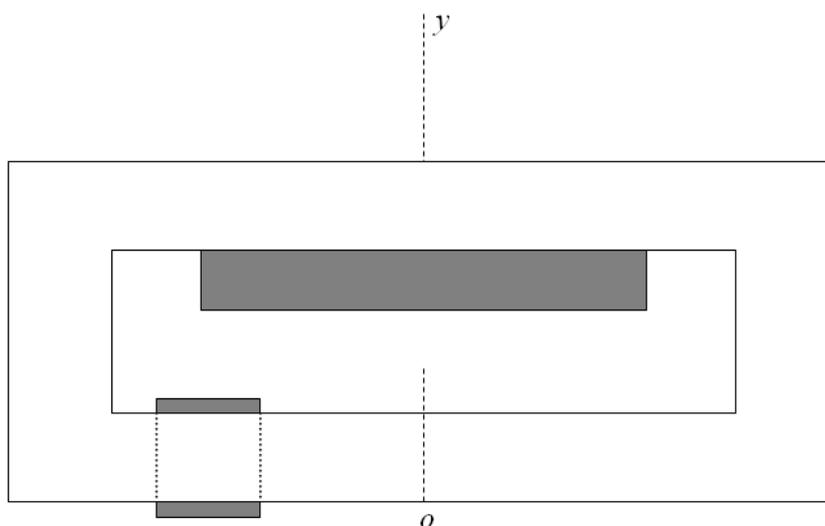


Figura 2.12 - Vista frontal do motor linear [1].

2.5 Apresentação do Motor Voice Coil e Princípio de Funcionamento

Um motor *voice coil* possui uma bobina montada numa estrutura móvel e ímãs permanentes estacionários junto ao núcleo. A força que atua sobre a bobina é calculada pelo produto vetorial entre o número de espiras e o comprimento ativo da bobina, a corrente na bobina e o vetor densidade de fluxo magnético na qual essa bobina está imersa e que é produzida pelos ímãs permanentes, de acordo com a seguinte expressão:

$$\vec{F} = N \cdot \vec{I} \cdot \ell \times \vec{B} \quad (2.15)$$

Onde,

\vec{B} = densidade de fluxo magnético na região do condutor [T]

\vec{F} = força que atua sobre a bobina [N]

N = número de espiras

ℓ = comprimento ativo da bobina [m]

O princípio de funcionamento baseia-se na circulação de corrente pela bobina, criando uma força (força de Lorentz) que irá atuar sobre a mesma. É o princípio da Lei de Lorentz.

Motores lineares são dispositivos eletromagnéticos que produzem movimento sobre um trilho, sendo também utilizados como atuadores. Quando utilizados como atuadores, desenvolvem movimento ao longo de uma pequena trajetória, e possuem aplicação, principalmente, em máquinas de controle numérico e em periféricos para microcomputadores.

Na figura 2.13 apresenta-se o motor *voice coil* em estudo. Trata-se de um dispositivo constituído de um estator formado por uma base de aço, sobre a face interna inferior estão montados os ímãs permanentes de NdFeB. A bobina, apresentada na figura 2.14, envolvendo a placa de aço superior está suportada por um dispositivo deslizante sobre um trilho, constituindo a parte móvel, com o formato de um carro. Esse carro tem uma estrutura de PEAD (polietileno de alta densidade) isolante que suporta o trilho do carro.

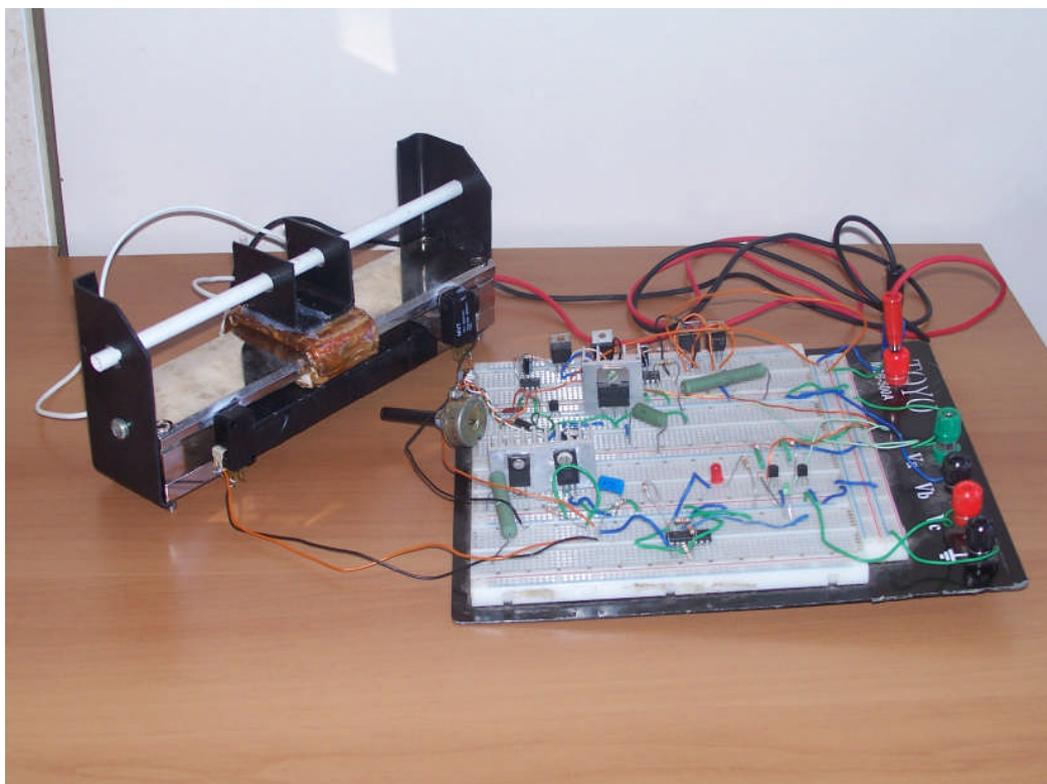


Figura 2.13 - Imagem do motor linear.

As medidas do protótipo possibilitaram a criação do circuito equivalente do motor linear, apresentado na figura 2.16:

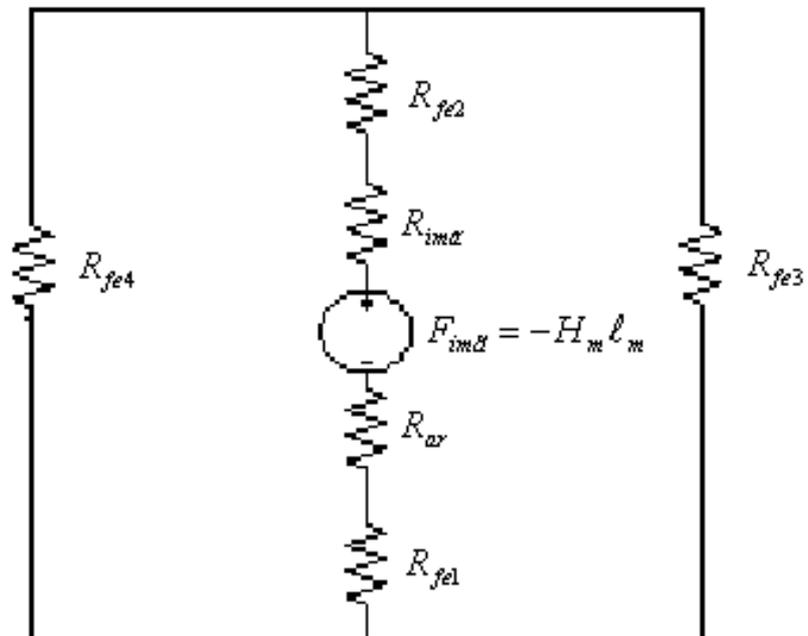


Figura 2.16 - Circuito equivalente do motor linear.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A força que atua sobre o carro do atuador linear depende da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro. O comportamento da distribuição do fluxo magnético no entreferro é determinado pelo ponto de operação dos ímãs permanentes e pela reação da armadura produzida pelo condutor percorrido por corrente. Esta distribuição pode ser determinada usando um modelo numérico. O método de análise, que será apresentado, está baseado em um modelo bi-dimensional, que descreve o comportamento da densidade de fluxo magnético no entreferro em função do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes e o comportamento da corrente que percorre a bobina.

3.1 Descrição Geral do Sistema

Os motores *voice-coil* (vcm) são mais frequentemente citados como sistemas atuadores usados para armazenar e recuperar informação digital em sistemas computacionais, conforme citado na introdução, capítulo 1, deste trabalho. Suas aplicações, algumas mencionadas no capítulo 2, levam ao desenvolvimento de equipamentos com alta precisão. O motor *voice coil* linear apresenta características de movimentação em linha reta, baseada no sentido da corrente que percorre a bobina do motor.

3.2 Modelos

O projeto do motor *voice coil* foi desenvolvido a partir da definição da sensibilidade desejada de 3,0 N/A, com uma corrente nominal de 1,0 A. Através da força e da corrente definidas, foram dimensionados o comprimento ativo da bobina, o número de espiras e a área da seção reta do condutor. A figura 3.1 mostra um

desenho com as dimensões da bobina Na porção ativa da bobina a densidade de fluxo magnético deverá ter um valor igual a:

$$|\vec{B}| = \frac{F}{NI\ell} = \frac{3,0}{200 \cdot 1,0 \cdot 0,050} = 0,3T$$

O comprimento do entreferro foi dimensionado de maneira tal a comportar a bobina e permitir que a mesma pudesse deslocar-se sem que haja atrito com as faces do núcleo de material ferromagnético. Para atender essas condições, o entreferro foi dimensionado em 9,0 mm. O circuito elétrico equivalente, que está apresentado na figura 3.2, foi definido com base a figura 3.1. A permeabilidade do material do núcleo da armadura foi considerada idealmente infinita [$\mu=\infty$], simplificando o circuito equivalente da figura 2.16.

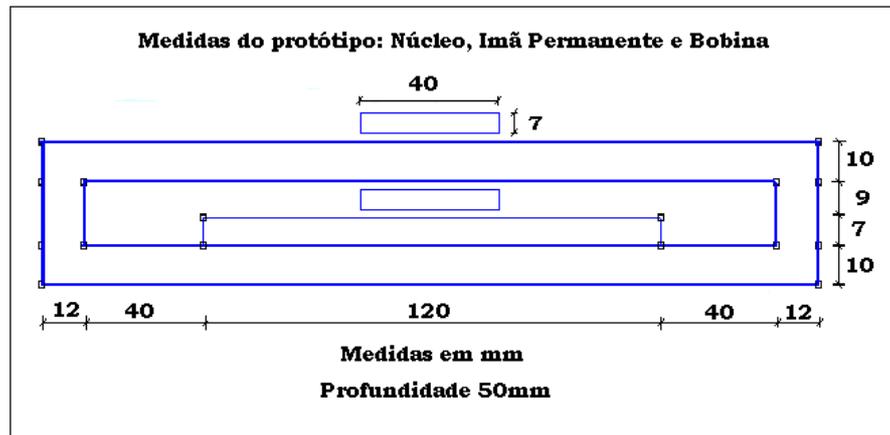


Figura 3.1 - Medidas do material ferromagnético, do entreferro e do ímã permanente.

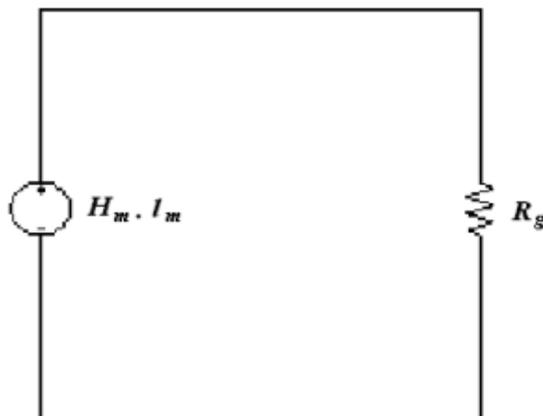


Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente.



O comprimento do ímã permanente foi dimensionado com base na curva normal do ímã permanente e na reta de carga do ímã permanente no circuito magnético, utilizando a equações (2.11) e considerando, L_f (coeficiente de dispersão) igual a 1,2 [4] e o coeficiente de espraçamento do fluxo magnético igual a 1,1 [4]. Assim:

$$B_m = -\mu_0 H_m \left(\frac{\ell_m}{\ell_g} \right) L_f C_f$$

$$B_m = -4\pi 10^{-7} H_m \left(\frac{\ell_m}{9} \right) 1,2 \times 1,1$$

Foram escolhidos valores diferentes para o comprimento do ímã permanente. Para cada um deles, foi levantada a reta de carga do ímã permanente e verificado se o ponto de operação produziria o valor de densidade média de fluxo magnético desejada na região do entreferro onde está localizada a bobina. O comprimento igual a 7 mm produziu a seguinte condição:

$$B_m = -4\pi 10^{-7} \times \left(\frac{7}{9} \right) \times 1,2 \times 1,1 H_m$$

$$B_m = -1,29 \times 10^{-6} H_m$$

A equação anterior é a equação da reta de carga do ímã permanente no circuito do motor voice coil. Para obter-se o gráfico dessa reta, são escolhidos dois valores de H_m e calculados os valores respectivos de densidade de fluxo magnético. Assim:

$$H_m = 0 \Rightarrow B_m = 0$$

$$H_m = -400 \text{ kA/m} = -1,29 \times 10^{-7} \times (-400 \times 10^3) = 0,52 \text{ T}$$

O ponto onde a reta de carga intercepta a curva a curva de desmagnetização define o ponto de operação do ímã permanente, sendo igual a $B_m = 0,59 \text{ T}$ e $H_m = -480 \text{ kA/m}$.

Substituindo na equação da Lei de Lorentz, $\vec{F} = I \vec{\ell} \times \vec{B}$, adotando a corrente de 1A e 200 espiras, que proporciona um tamanho de bobina compatível com o protótipo, temos:

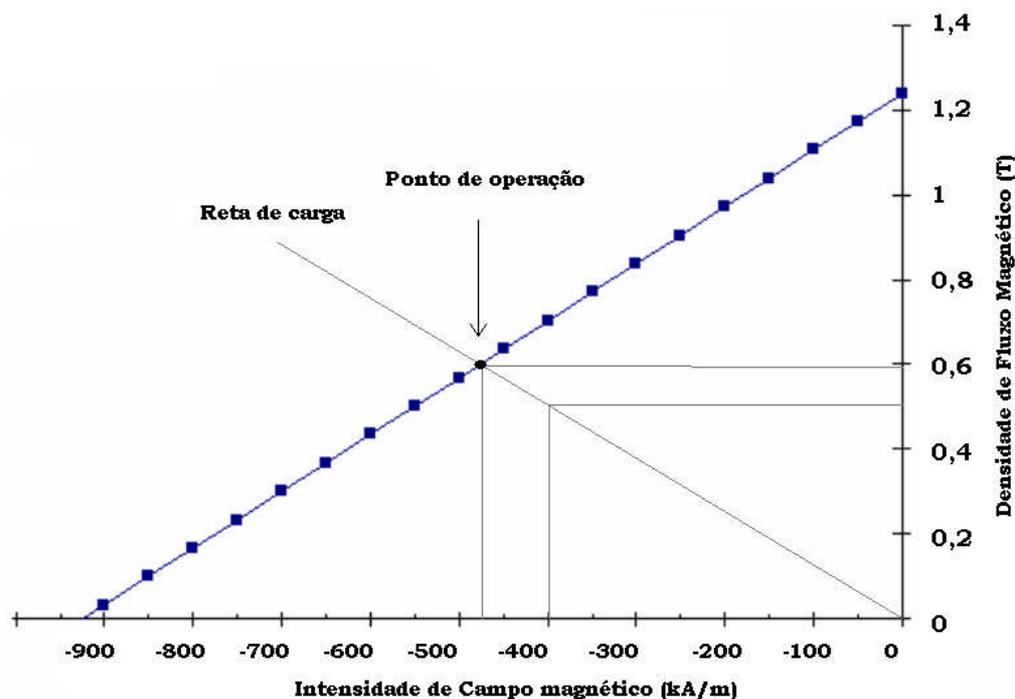


Figura 3.3 - Curva de desmagnetização de ímãs permanentes de NeFeB, com a definição de densidade de fluxo magnético.

O valor médio de densidade de fluxo magnético no entreferro foi calculado por:

$$B_g = \frac{B_m}{L_f C_f} = \frac{0,59}{1,2 \times 1,1} = 0,45T$$

Embora o valor médio de densidade de fluxo magnético no entreferro tenha resultado em um valor superior a 0,3T, adotou-se o ímã permanente de comprimento axial igual a 7mm, porque, nos cálculos, considerou-se a permeabilidade magnética do aço como sendo infinita. Nesta situação, a queda de potencial magnético no aço foi tratada como desprezível. Na prática, esta queda não pode ser desprezada, porque o comprimento do aço é considerável, em relação às dimensões do circuito. Portanto, estimou-se que o valor médio de densidade do fluxo magnético seria inferior a 0,45T. As simulações realizadas posteriormente, evidenciaram que a densidade de fluxo magnético no entreferro teria valor inferior àquele definido pela reta de carga do ímã permanente.

As demais dimensões foram calculadas com base no comprimento máximo da trajetória que deve ser desenvolvida pela bobina. A partir das dimensões do motor *voice coil*, foram feitas simulações eletromagnéticas, com o objetivo de obter o

valor de força teórico e determinar o comportamento do fluxo magnético no circuito do motor. Essas simulações permitiram que fossem feitos pequenos ajustes nas dimensões do circuito magnético para a produção dos valores de força requeridos. A tabela 3.1 mostra as dimensões finais do motor voice coil.

Tabela 3.1 - Dimensões e características finais do motor linear.

Item	Características
Núcleo da armadura (2 peças)	50mm x 240mm x 10 mm Aço 1020 (ABNT)
Núcleo da armadura (2 peças)	50mm x 12mm x 16 mm Aço 1020 (ABNT)
Número de enrolamentos	1
Número de espiras do enrolamento	200
Resistência da espira	0,5768 Ω
Material da bobina	Cobre recozido
Sistema de suspensão	2 suportes e 1 trilho (PEAD)
Número de ímãs permanentes	8
Dimensão do ímã permanente	50mm x 15mm x 7 mm
Material dos ímãs permanentes	NdFeB sinterizado
Entreferro	16 mm
Espaço livre em ar	9 mm
Espaço da bobina no entreferro	5 mm
Área total da superfície dos ímãs	8250 mm ²
Área total do aço de base dos ímãs	10000 mm ²

A altura de entreferro livre para deslocamento da bobina, em 9mm, foi o fator determinante para a definição do fio da bobina. Estipulando-se em 5 mm a altura do enrolamento da bobina, havendo espaço livre sem atrito para movimentação do motor, definido que o fio 18 AWG, com diâmetro de 0,911mm sem o isolamento, poderia formar 5 camadas de fios, cada uma com 40 espiras, sem ultrapassar o limite de 5mm.

Definidas as dimensões, demonstradas na figura 3.1, foram identificados todos os materiais necessários para o projeto do motor:

- Núcleo de ferro 1020;



- Bobina com 200 espiras, fio 18 AWG;
- 8 ímãs permanentes, NeFeB, tamanho 50mmx15mmx7 mm;
- Suporte para correr a bobina sem encostar-se ao núcleo.

3.3 Método dos Elementos Finitos (MEF) e Simulações

A análise numérica eletromagnética de um modelo virtual requer um conhecimento das propriedades físicas dos materiais utilizados no modelo real, como suas curvas de magnetização, como condutividade elétrica, permeabilidade magnética relativa, condutividade térmica e capacidade térmica, estas duas últimas não utilizadas neste trabalho.

O princípio do método dos elementos finitos consiste da divisão do domínio em estudo em pequenos subdomínios, denominados elementos finitos.

Assim, através da obtenção da equação de cada nó, será possível determinar, por exemplo, os valores das componentes do vetor de densidade de fluxo magnético em cada nó.

Como condições iniciais há a necessidade de um conhecimento aproximado da forma da distribuição dos campos eletromagnéticos através do dispositivo. Uma vez definido o tipo de análise em termos de dimensão, a próxima etapa corresponde à construção da malha que representa o dispositivo em estudo.

Um modelo será então gerado a partir de nós e elementos, que formarão uma malha. Um elemento resulta da união de nós. Uma malha é composta por todos os elementos do modelo, ou seja, por todos os elementos finitos. Em modelos onde haja mais de uma região, a interface entre dois materiais deve coincidir com a fronteira dos elementos. Por fim, são definidas as fontes de excitação do campo e as condições de fronteira.

O motor *voice coil* linear foi analisado numericamente através do Método dos Elementos Finitos, utilizando o pacote computacional FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), versão 4.2. Através do FEMM, foi possível simular o comportamento do fluxo magnético no circuito do motor, em função da corrente na bobina.

3.4 Simulações

O circuito magnético do motor foi desenhado, através de nós e linhas, conforme apresentado na figura 3.4.

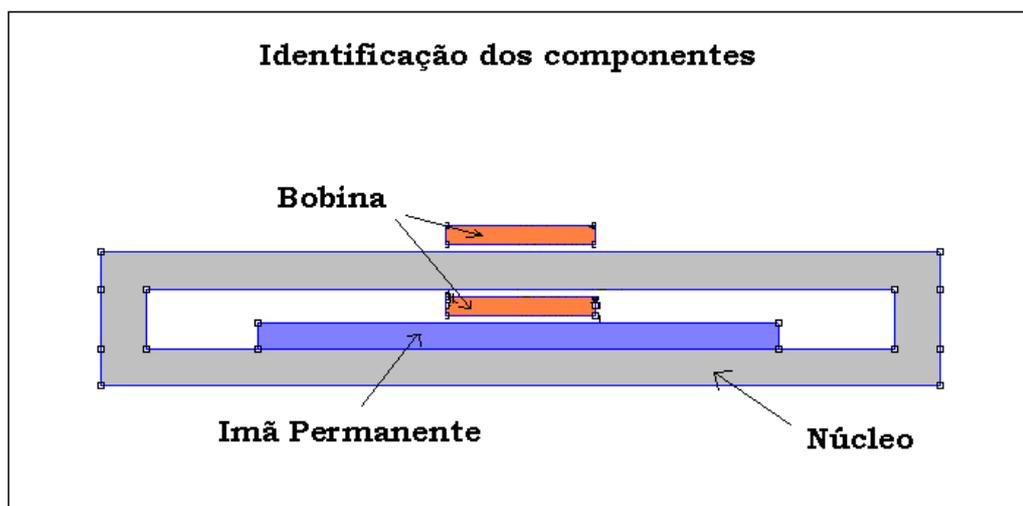


Figura 3.4 - Circuito magnético com nós e linhas.

Os materiais e suas propriedades elétricas e magnéticas foram definidos. Após, foram definidas as condições de fronteira, figura 3.5. O campo na região de fronteira foi considerado igual a zero.

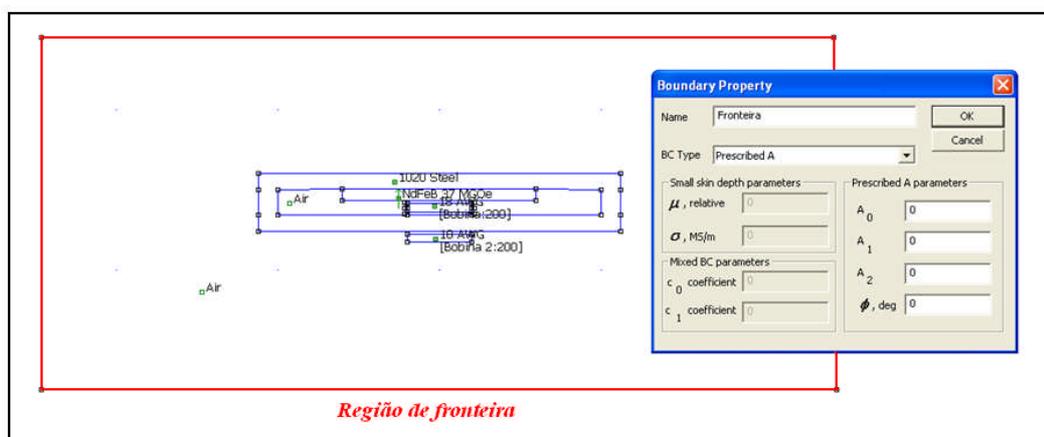


Figura 3.5 - Definição da região de fronteira.

A malha foi criada, definindo a região com campo magnético, que definirá a atuação das forças do sistema, apresentado na figura 3.6.

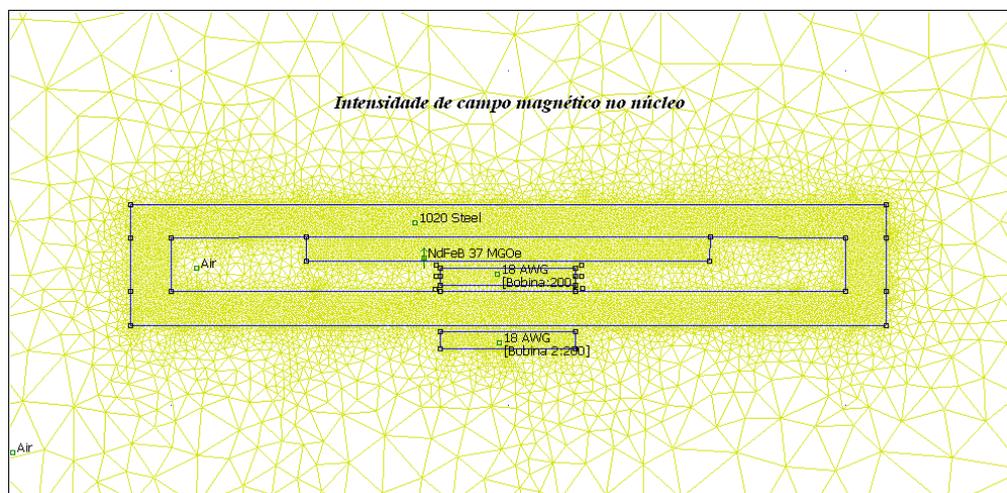


Figura 3.6 - Malha de visualização de intensidade de campo magnético.

O modelo foi processado. Um dos resultados da análise é o mapeamento das linhas do vetor densidade de fluxo magnético no circuito do motor, figura 3.7.

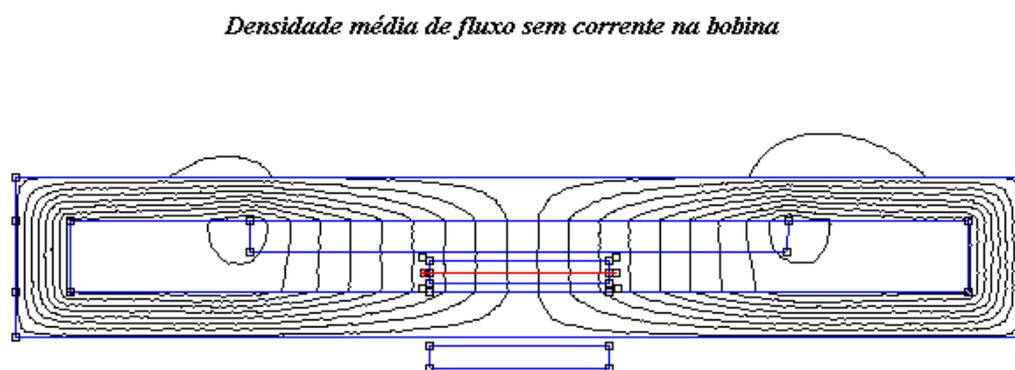


Figura 3.7 - Densidade média de fluxo sem corrente na bobina.

3.5 Sistema de Comando

Para definição dos componentes do sistema de comando, apresentando uma corrente nominal de 1 A, com variações para mais e para menos, para testes visuais de velocidade em relação à corrente, foi desenvolvido um sistema de comando que fornecesse uma tensão necessária de acordo com as características e as medidas dos materiais empregados na construção da bobina, apresentada na figura 3.8 .

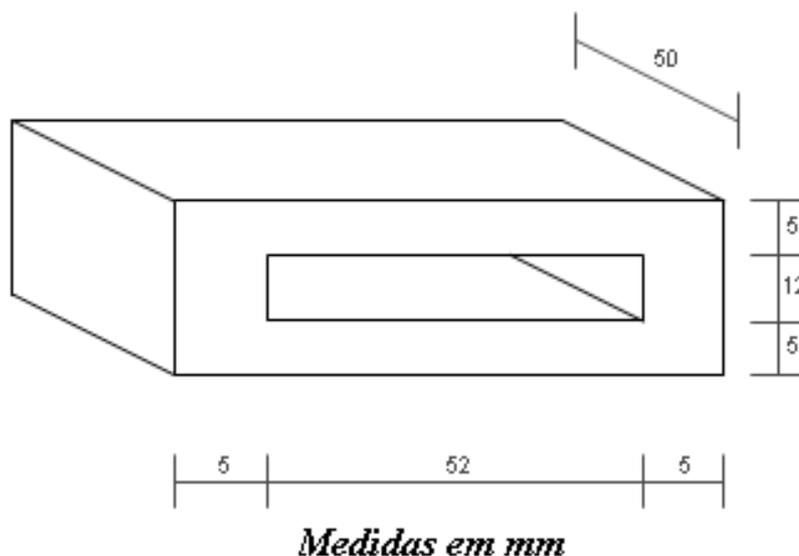


Figura 3.8 - Medidas da bobina para cálculo da resistência.

$$S = 0,823\text{mm}^2$$

$$\rho_{\text{cobre}} = 0,0172$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

$$l = [2 \times (2,5\text{mm} + 12\text{mm})] + [2 \times (2,5 + 52\text{mm})]$$

$$l = 138\text{mm}$$

$$l = 200_{\text{esp}} \times 138\text{mm} = 27,6\text{m}$$

então,

$$R = \frac{0,0172 \times 27,6\text{m}}{0,823\text{mm}^2} = 0,5768\Omega$$

Desta forma, a fonte do circuito deve ser de baixa tensão, com limitação de corrente, para fornecer suprimento suficiente para a bobina sem danificá-la.

Para a obtenção de uma fonte de alimentação que permita a inversão do sentido da corrente na bobina, de forma rápida o suficiente para não gerar uma dissipação alta de potência e que não permita um fechamento simultâneo das chaves inversoras e, ainda, com limitação de corrente, foi desenvolvido um circuito eletrônico como sistema de comando, apresentado na figura 3.9. Com tensão de alimentação entre 15 e 25 VDC, o circuito fornece a bobina corrente de até 3,5 A, valor este acima da corrente nominal estipulada para a bobina do motor linear de 1,0 A.

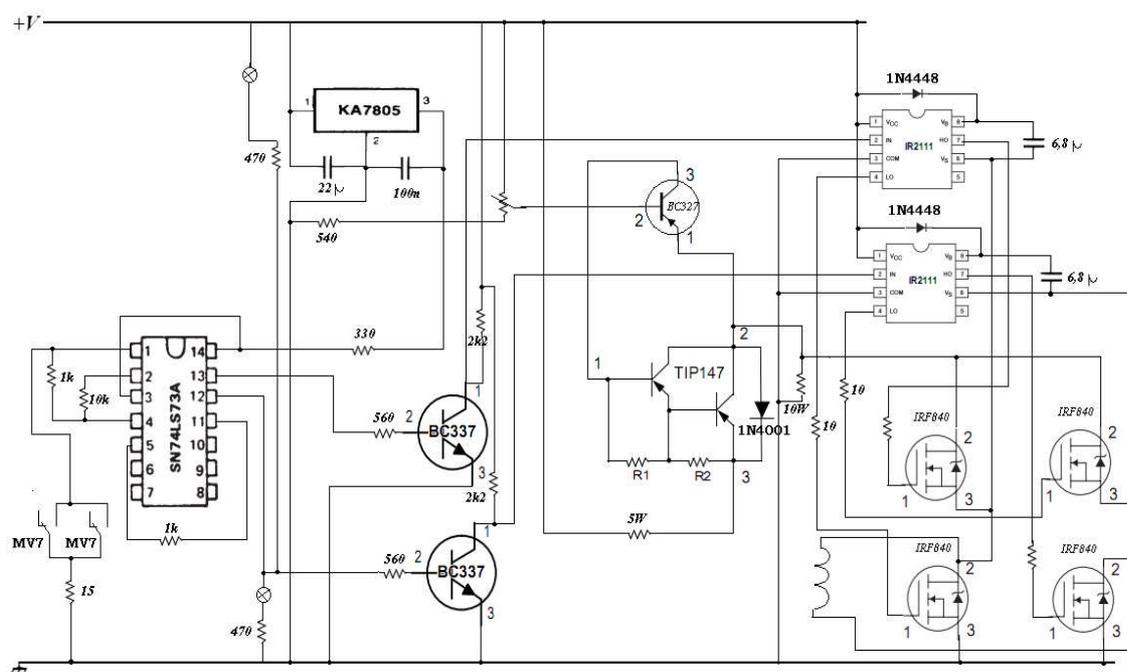


Figura 3.9 - Circuito eletrônico de comando da bobina.

Detalhando o sistema de comando, estão apresentados na tabela (3.2) os principais componentes do circuito eletrônico e suas funções de controle:



Tabela 3.2 - Componentes eletrônicos e função de controle.

Componente	Função
TIP 147 – PNP Darlington	Opera como controlador de corrente.
IR2111 – <i>Gate driver</i> de meia-ponte	Recebe os pulsos de controle e gera dois outros pulsos, LO e HO. Tem como característica um tempo de retardo que evita o fechamento simultâneo de todas as chaves do sistema. Fornece na saída tensão alta e corrente baixa, conforme a necessidade do IRF840A.
74LS73AN – Flip-Flop JK	Recebendo os pulsos das chaves de fim de curso, cria a lógica de funcionamento do sistema.
KA7805 – Regulador de tensão	Mantém um pulso de 5V para o Flip-Flop JK
IRF840A -	Fazem o chaveamento do sistema.
MV7 – Chaves final de curso	Enviam pulso ao 74LS73AN, iniciando o processo de inversão de sentido de corrente na bobina.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O objetivo das simulações no trabalho foi desenvolver por programa específico de computador (Cap.3.4) as condições mais próximas possíveis da atuação do motor *voice coil*. As simulações estão apresentadas na mesma sequência do andamento do trabalho, para que a linha de pensamento do leitor seja a mesma do projetista.

4.1 Simulações

Antes de demonstrar as simulações no programa FEMM, o cálculo teórico, baseado na Lei de Lorentz (Cap.2.3) e no estudo de materiais ferromagnéticos (Cap.2.2) será demonstrado na tabela 4.1, comparando o valor teórico da força eletromagnética com o valor no simulador.

Tabela 4.1 - Comparação entre simulação cálculo numérico.

Calculado	Métodos Numéricos
Corrente no condutor de 1 A: $\vec{F} = 3,0 \text{ N}$	Corrente no condutor de 1 A: $\vec{F} = 3,58 \text{ N}$

Comparando as soluções pelos dois métodos anteriores foram encontrados valores próximos. As simulações pelo programa FEMM, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) (Cap.3.3), demonstradas de forma detalhada nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3, apresentam resultado aproximado de 16% com o cálculo teórico.

Com as dimensões e o formato do protótipo apresentados nas figuras 3.1, foi encontrado um valor de força, \vec{F} , com uma corrente na bobina de 1A,

satisfazendo a necessidade de projeto de $\vec{F} = 3N$, apresentado pela figura 4.2. A força é calculada pelo Tensor de Força de Maxwell [4].

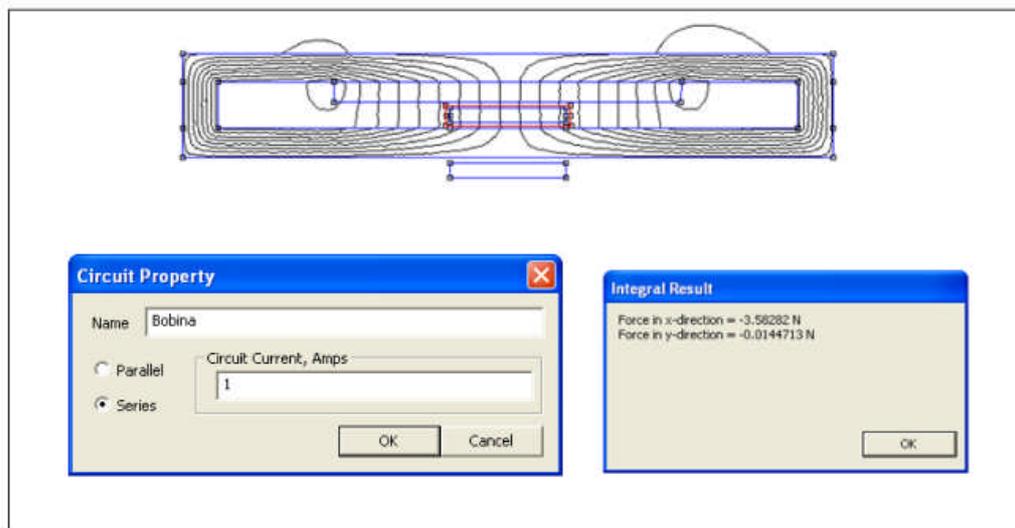


Figura 4.1 - Simulação de força para excitação da bobina com 1A.

Desenvolvido conforme script apresentado abaixo, no caso com 1 A, o programa FEMM foi utilizado para as demais simulações do estudo.

```
[Format] = 4.0
[Frequency] = 0
[Precision] = 1e-008
[MinAngle] = 30
[Depth] = 50
[LengthUnits] = millimeters
[ProblemType] = planar
[Coordinates] = cartesian
[ACSolver] = 0
[Comment] = "Add comments here."
[PointProps] = 0
[BdryProps] = 1
<BeginBdry>
  <BdryName> = "Fronteira"
  <BdryType> = 0
```



```
<A_0> = 0
<A_1> = 0
<A_2> = 0
<Phi> = 0
<c0> = 0
<c0i> = 0
<c1> = 0
<c1i> = 0
<Mu_ssd> = 0
<Sigma_ssd> = 0
<EndBdry>
[BlockProps] = 4
<BeginBlock>
  <BlockName> = "Air"
  <Mu_x> = 1
  <Mu_y> = 1
  <H_c> = 0
  <H_cAngle> = 0
  <J_re> = 0
  <J_im> = 0
  <Sigma> = 0
  <d_lam> = 0
  <Phi_h> = 0
  <Phi_hx> = 0
  <Phi_hy> = 0
  <LamType> = 0
  <LamFill> = 1
  <NStrands> = 0
```



```
<WireD> = 0
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
<BeginBlock>
  <BlockName> = "1020 Steel"
  <Mu_x> = 760
  <Mu_y> = 760
  <H_c> = 0
  <H_cAngle> = 0
  <J_re> = 0
  <J_im> = 0
  <Sigma> = 0
  <d_lam> = 0
  <Phi_h> = 0
  <Phi_hx> = 0
  <Phi_hy> = 0
  <LamType> = 0
  <LamFill> = 1
  <NStrands> = 0
  <WireD> = 0
  <BHPoints> = 9
    00
    0.20000000000000001    159.155
    0.52000000000000002    238.73249999999999
    1 557.04250000000002
    1.4199999999999999    1591.55
    1.60000000000000001    3183.0999999999999
    1.803582    7077.8066740000004
```



2.1378029999999999 29076.393005999998
2.2799999999999998 79577.5

<EndBlock>

<BeginBlock>

<BlockName> = "NdFeB 37 MGOe"

<Mu_x> = 1.048

<Mu_y> = 1.048

<H_c> = 950000

<H_cAngle> = 0

<J_re> = 0

<J_im> = 0

<Sigma> = 0.66700000000000004

<d_lam> = 0

<Phi_h> = 0

<Phi_hx> = 0

<Phi_hy> = 0

<LamType> = 0

<LamFill> = 1

<NStrands> = 0

<WireD> = 0

<BHPoints> = 0

<EndBlock>

<BeginBlock>

<BlockName> = "18 AWG"

<Mu_x> = 1

<Mu_y> = 1

<H_c> = 0

<H_cAngle> = 0



```
<J_re> = 0
<J_im> = 0
<Sigma> = 58
<d_lam> = 0
<Phi_h> = 0
<Phi_hx> = 0
<Phi_hy> = 0
<LamType> = 3
<LamFill> = 1
<NStrands> = 1
<WireD> = 1.0239652968433499
<BHPoints> = 0
<EndBlock>
[CircuitProps] = 2
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "Bobina"
  <TotalAmps_re> = 1
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
<BeginCircuit>
  <CircuitName> = "Bobina 2"
  <TotalAmps_re> = -1
  <TotalAmps_im> = 0
  <CircuitType> = 1
<EndCircuit>
[NumPoints] = 38
```

As figuras 4.2 e 4.3 apresentam a densidade de fluxo magnético produzida pelos ímãs permanentes no núcleo, demonstrando o direcionamento das linhas de campo magnético e a densidade de fluxo em cada ponto. Torna-se visível por linhas e cores a maior concentração de densidade de fluxo magnético nas extremidades dos ímãs permanentes, apresentado pela figura 4.4.

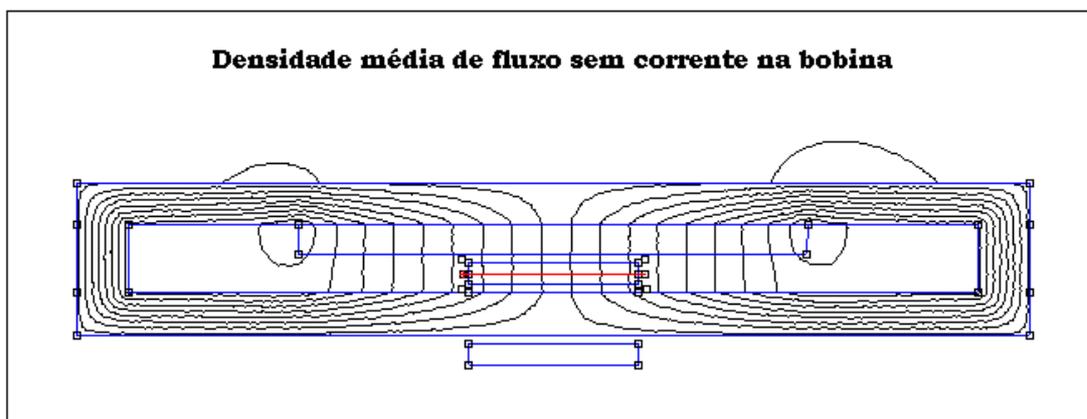


Figura 4.2 - Visualização da densidade média de fluxo sem corrente na bobina.

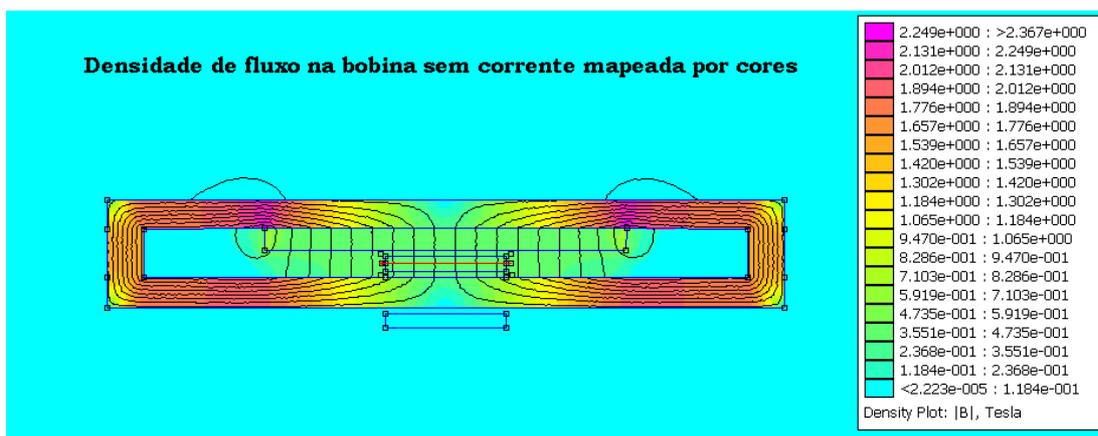


Figura 4.3 - Mapeamento por cores da densidade de fluxo sem corrente na bobina.

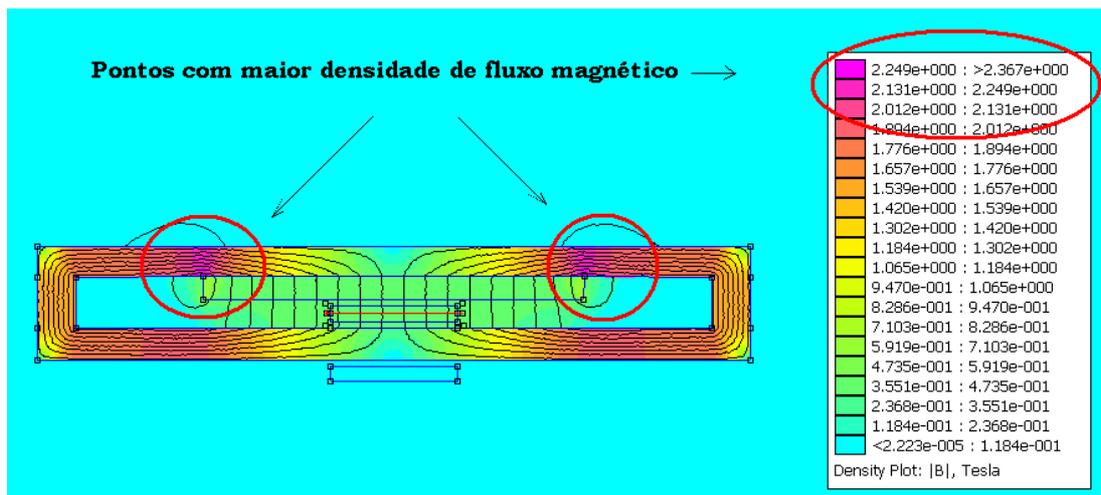


Figura 4.4 - Pontos com maior densidade de fluxo magnético em destaque.

A figura 4.5 apresenta o gráfico de densidade de fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes. Assim como demonstrado nas figuras 4.2 e 4.3, percebe-se, a maior concentração de densidade fluxo magnético nas extremidades dos ímãs permanentes.

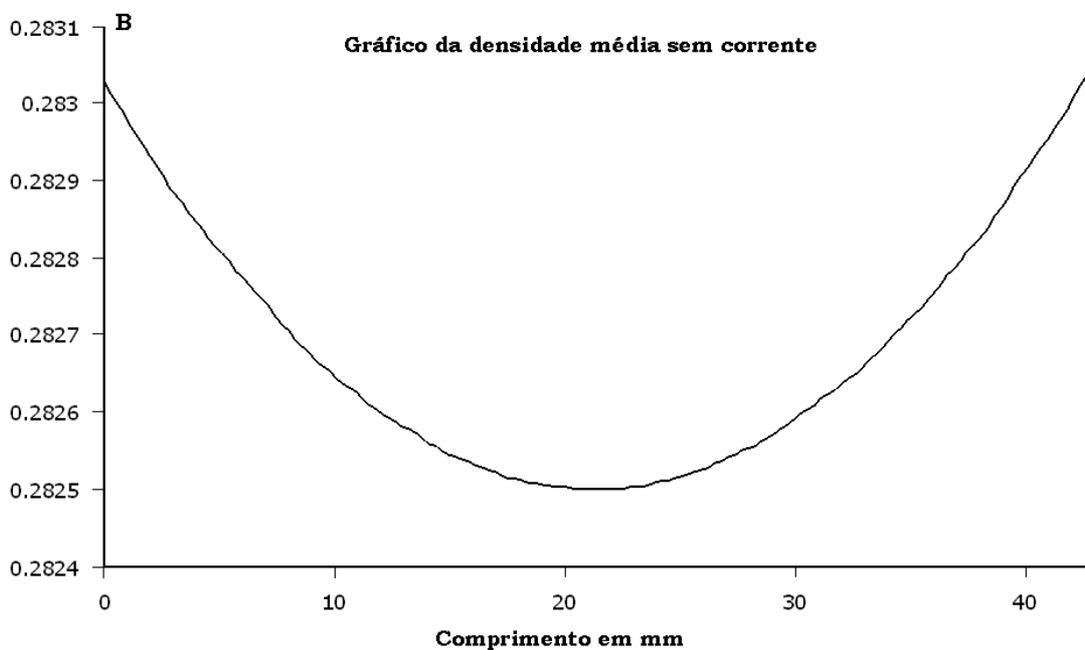


Figura 4.5 - Gráfico da densidade média sem corrente.

Constatados os caminhos e concentrações do fluxo magnético e realizada a simulação que permitiu visualizar a força desejada, havia a necessidade de simular

o comportamento linear da força em função de corrente do motor *voice coil*. As figuras 4.6 e 4.7 apresentam o resultado com aplicação de corrente na bobina de 0,25A e 2,5A. Foram também realizadas simulações com 0, 0.25, 0.75, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 e 2.25A, apresentadas na figura 4.8, em formato de gráfico de linearidade. A figura 4.9 apresenta a curva de densidade média com aplicação de corrente na bobina.

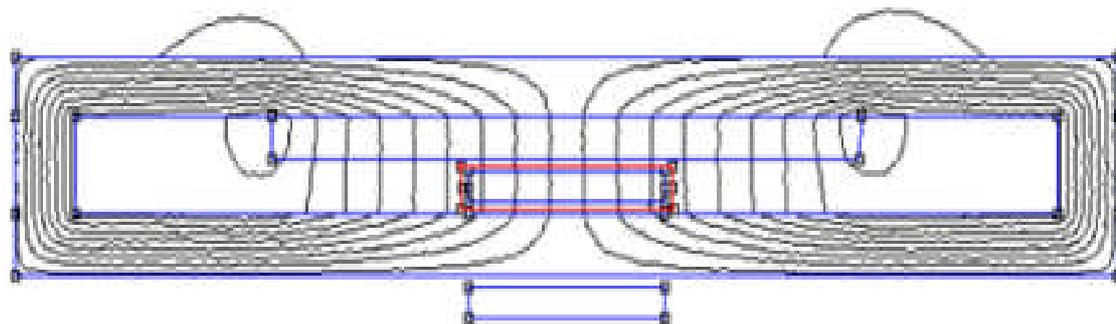


Figura 4.6 - Simulação da força para excitação da bobina com 0,25 A.

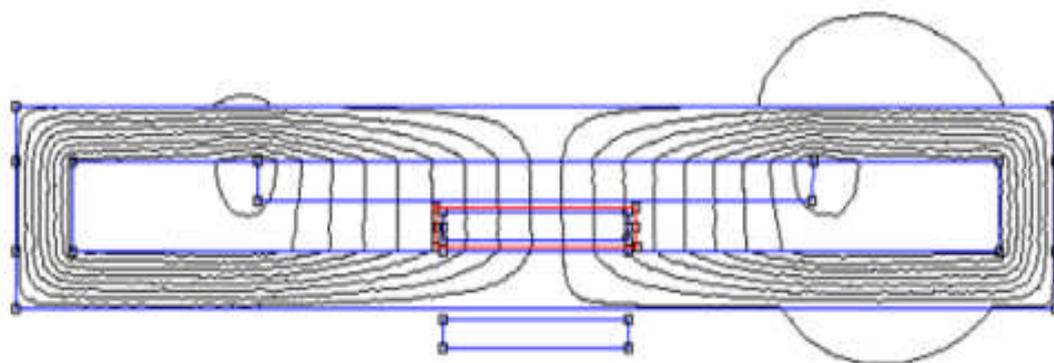


Figura 4.7 - Simulação de força para excitação da bobina com 2,5 A.

Através das simulações foi criado o gráfico, apresentado na figura 4.8, demonstrando a linearidade do motor

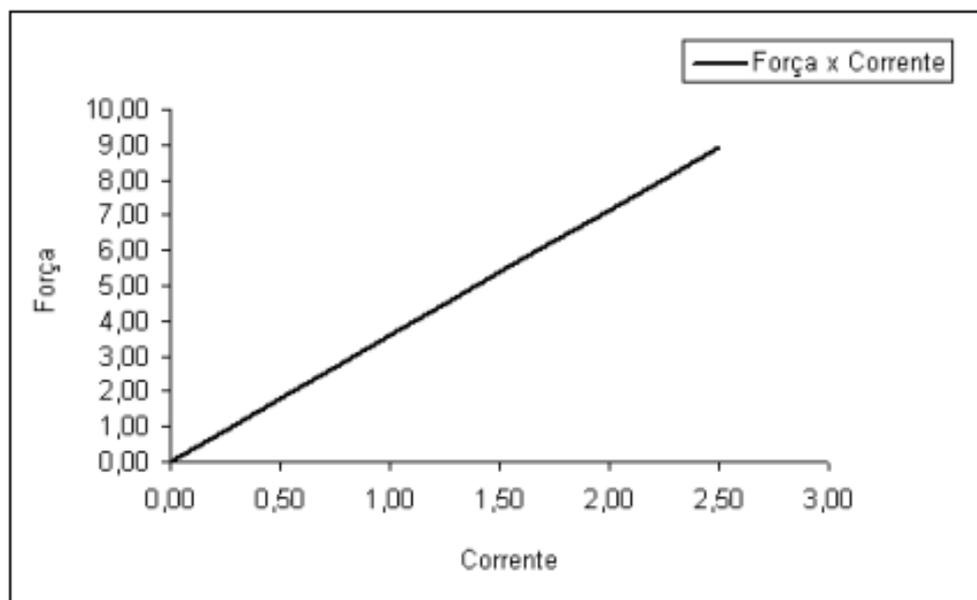


Figura 4.8 - Gráfico com relação entre corrente e força desenvolvidas.

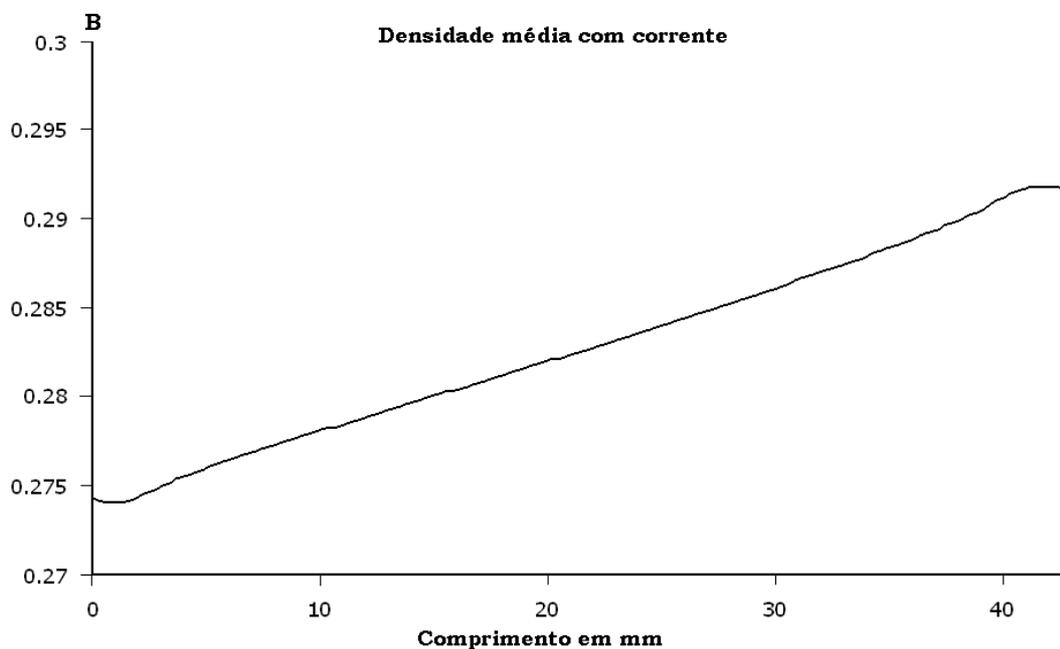


Figura 4.9 - Gráfico da densidade média com corrente.

4.2 Resultado Prático

O resultado prático da distribuição de densidade de campo magnético no núcleo foi comprovado pela leitura de tensão, através de um circuito com um sensor de campo magnético. Neste caso foi utilizado o AD22151Y, com leituras de tensão ao longo do interior do núcleo. Não foi definido o valor de densidade de campo magnético em cada ponto, devido à baixa sensibilidade do instrumento, mas através da leitura de tensão foi possível definir a distribuição da densidade por região do núcleo. A figura 4.10 apresenta os pontos de medição de tensão no interior do núcleo e as figuras 4.11 até 4.31 apresentam a medição de tensão em cada ponto.

Fica evidenciado que na região dos ímãs permanentes a densidade de fluxo magnética é muito mais significativa. Saindo da região dos ímãs permanentes em direção às extremidades do núcleo, é acentuado o declínio da densidade de fluxo magnético. Dos pontos 8 à 15 não é perceptível através da leitura de tensão a densidade de fluxo magnético, diferença constatada através das simulações.

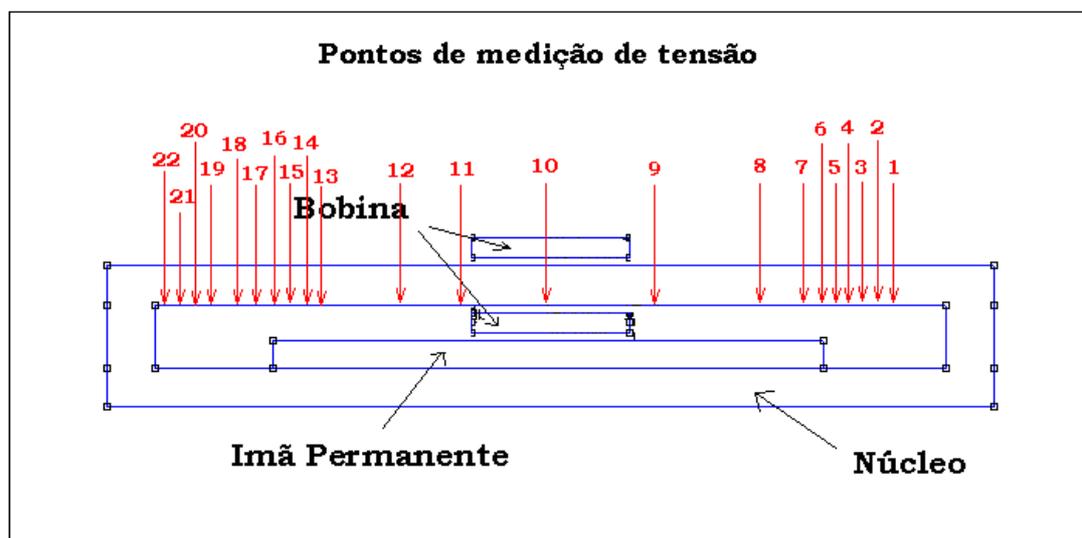


Figura 4.10 - Pontos de medição de tensão para visualização da densidade de campo magnético.

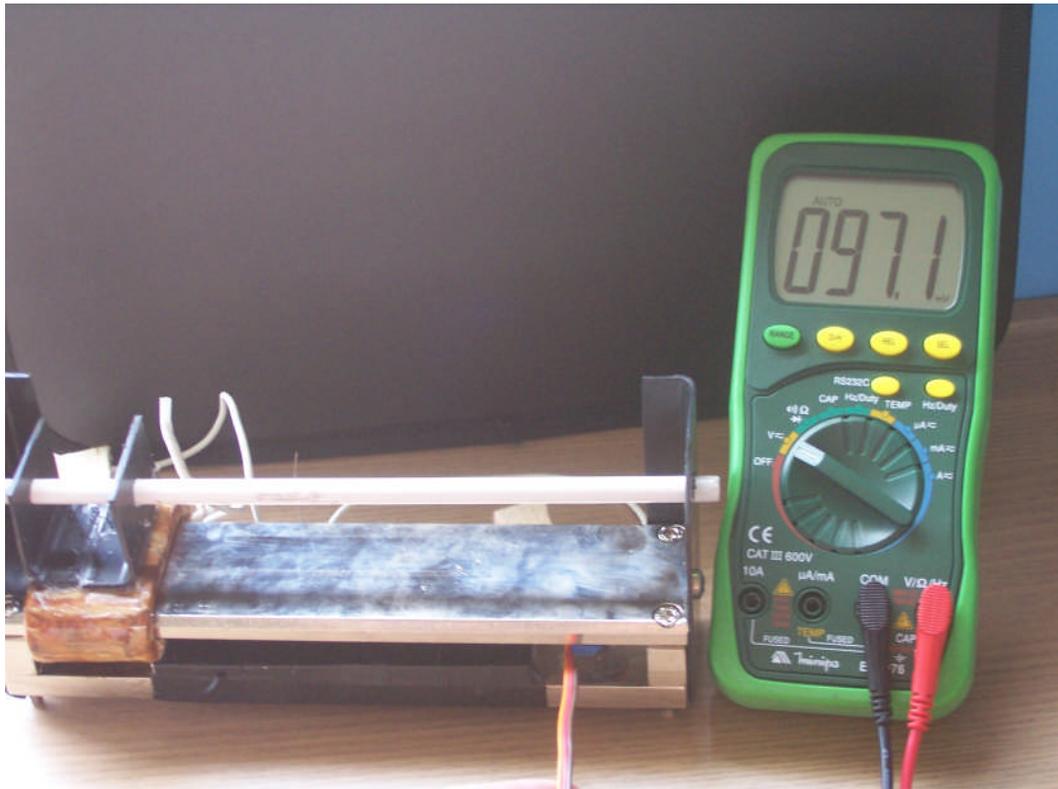


Figura 4.11 - Medição de tensão no ponto 1.

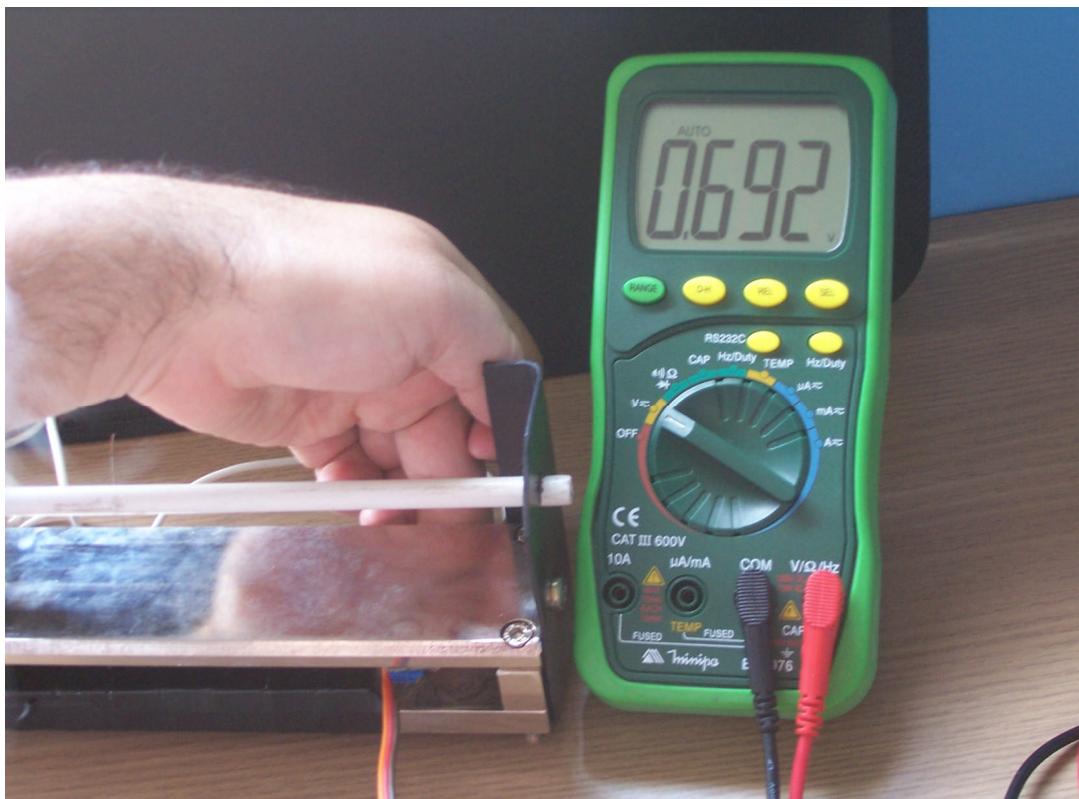


Figura 4.12 - Medição de tensão no ponto 2.

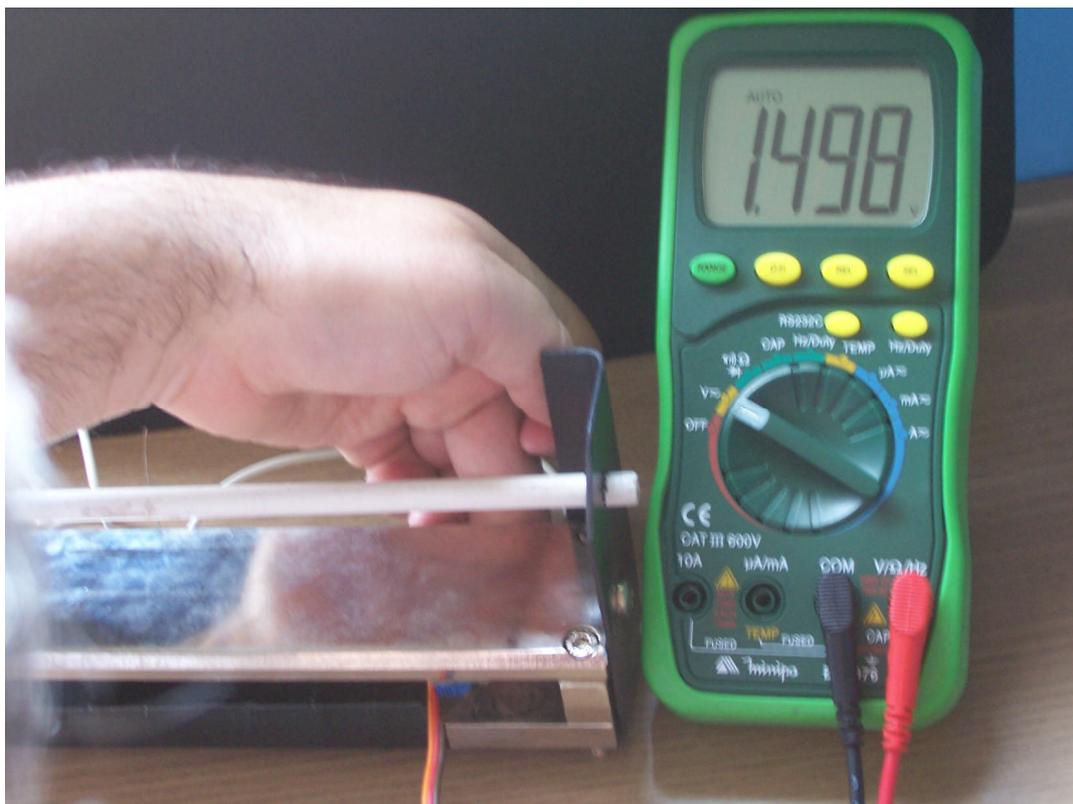


Figura 4.13 - Medição de tensão no ponto 3.

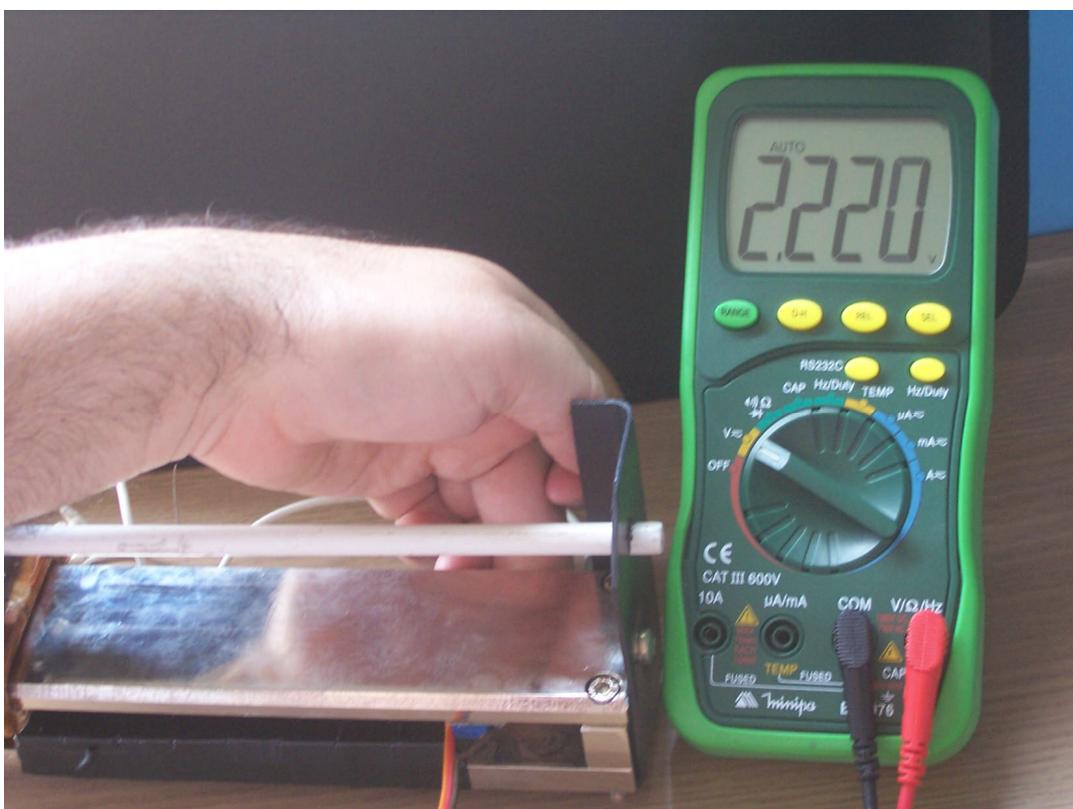


Figura 4.14 - Medição de tensão no ponto 4.

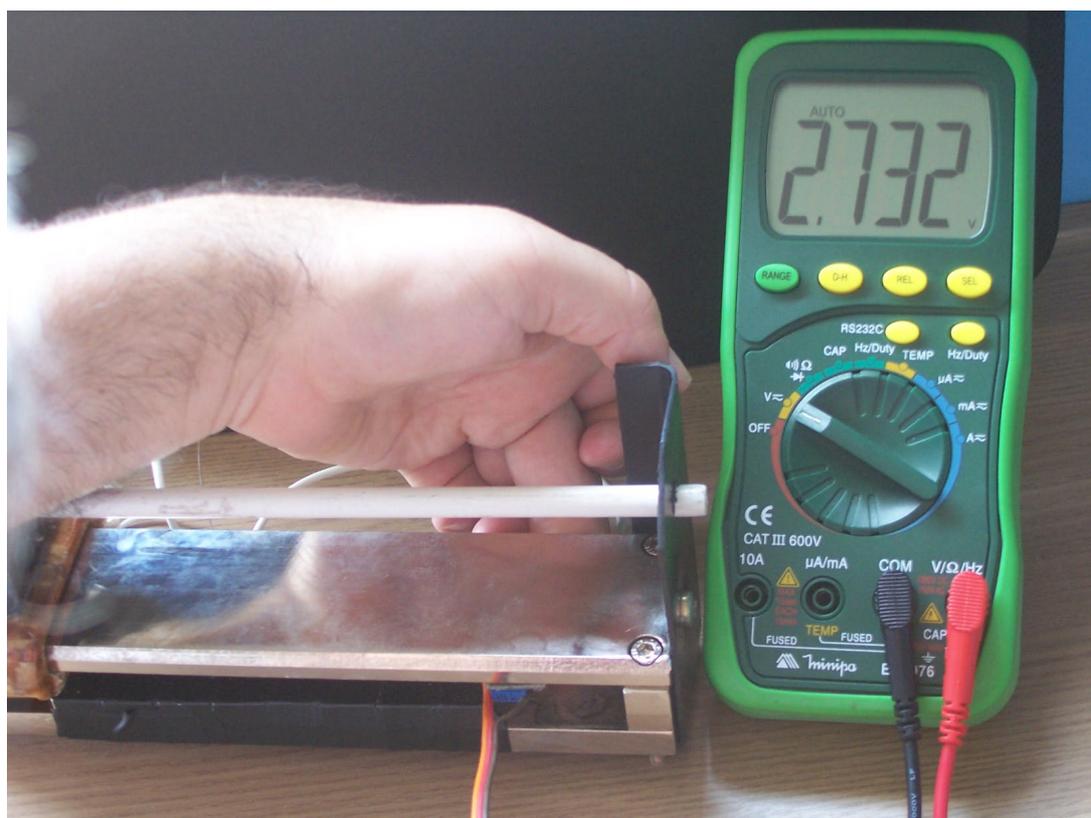


Figura 4.15 - Medição de tensão no ponto 5.

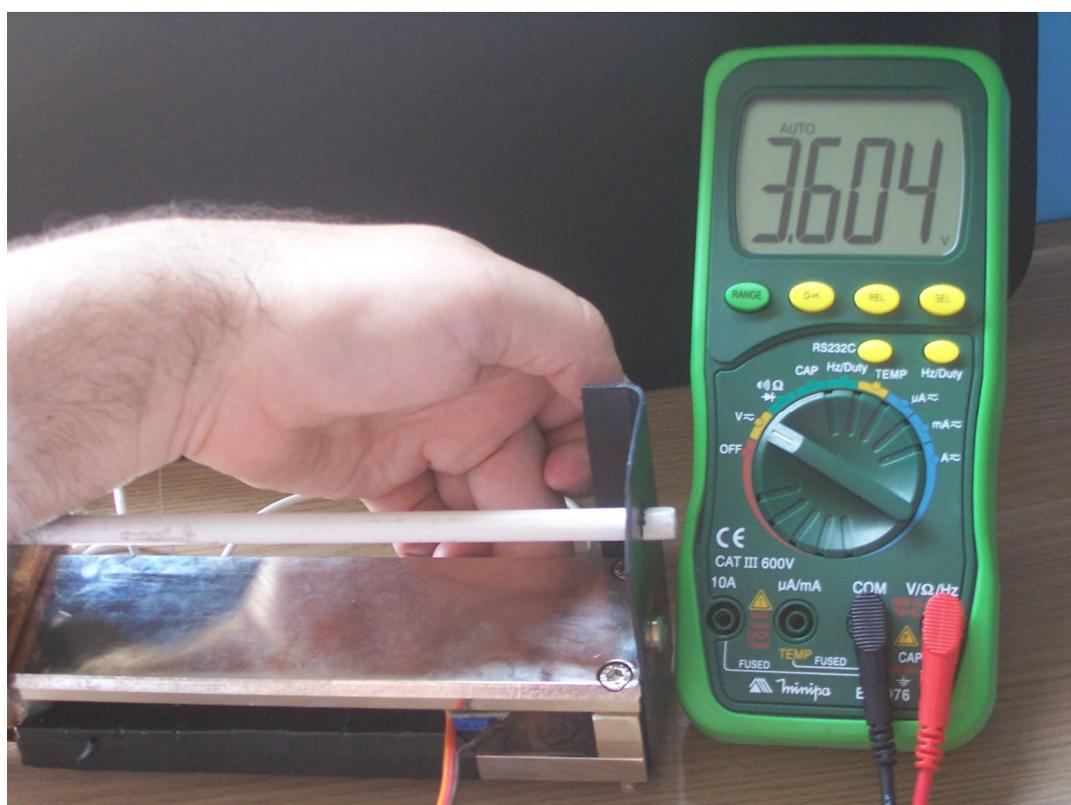


Figura 4.16 - Medição de tensão no ponto 6.

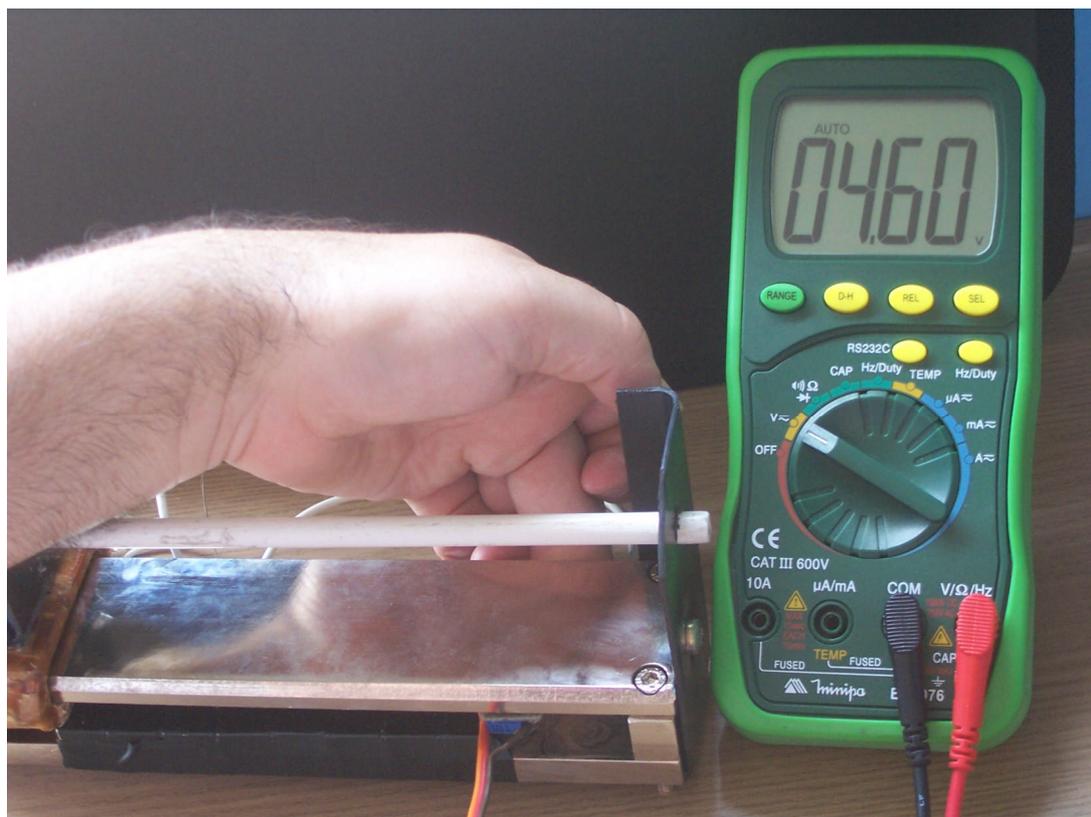


Figura 4.17 - Medição de tensão no ponto 7.

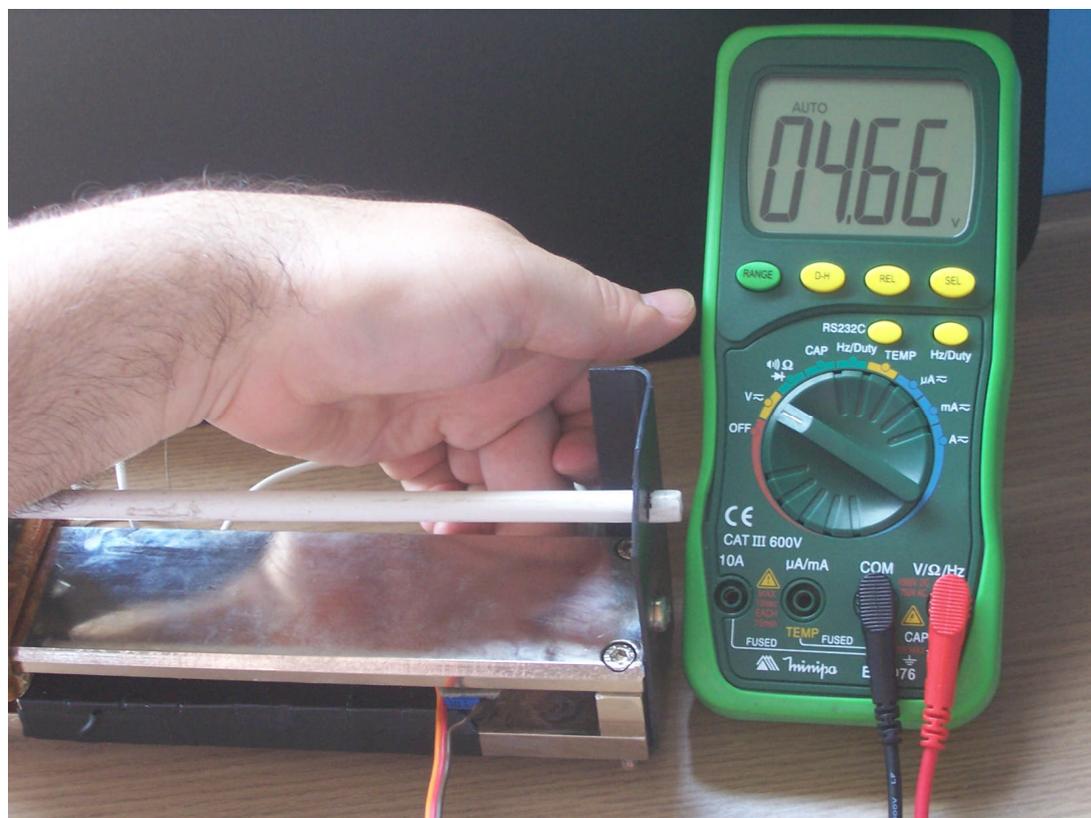


Figura 4.18 - Medição de tensão no ponto 8.

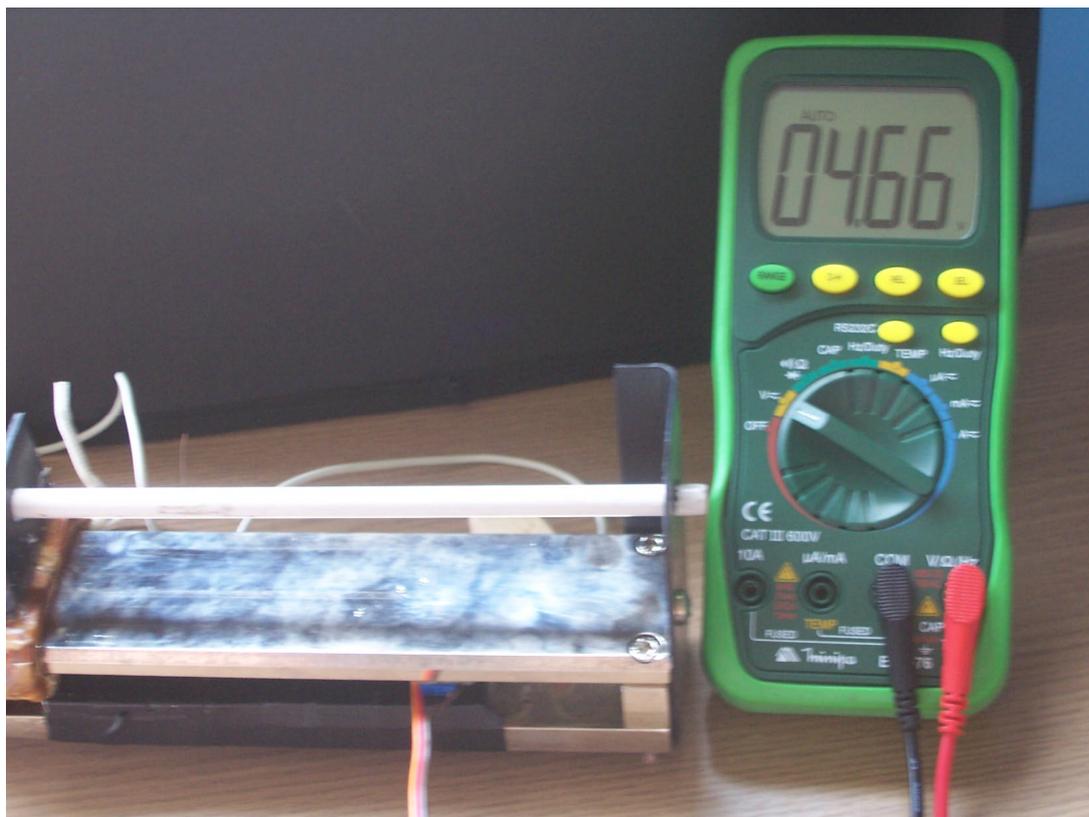


Figura 4.19 - Medição de tensão no ponto 9.

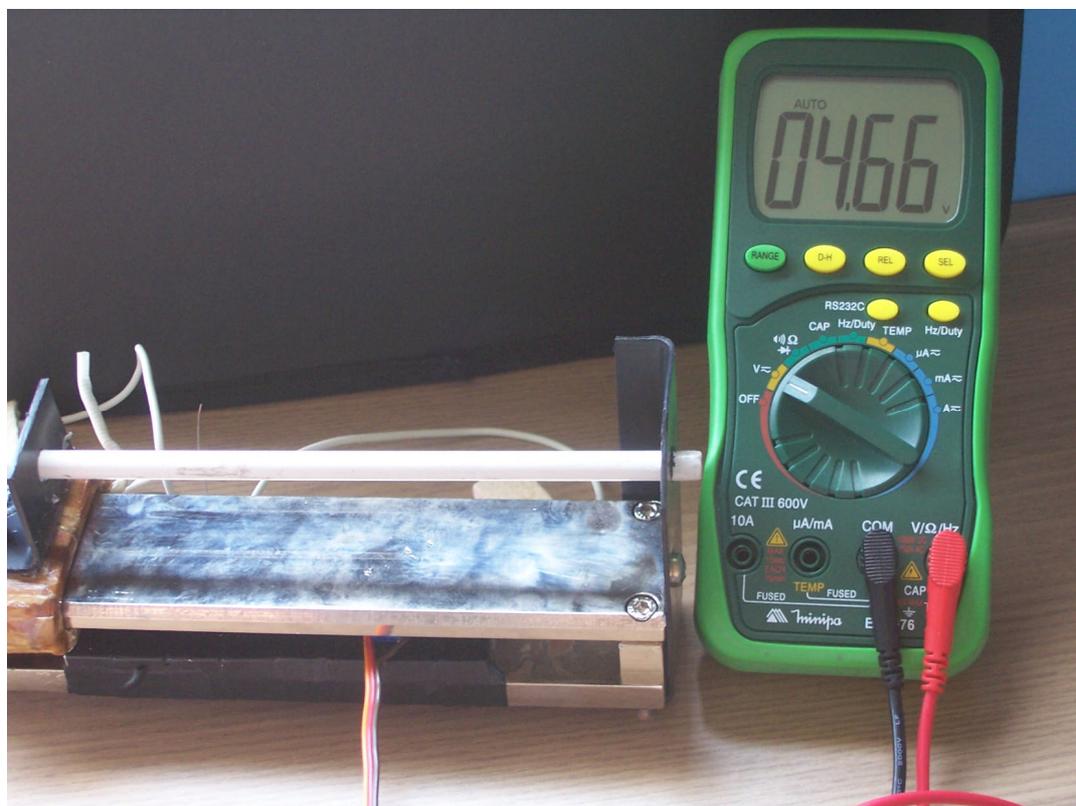


Figura 4.20 - Medição de tensão no ponto 10.

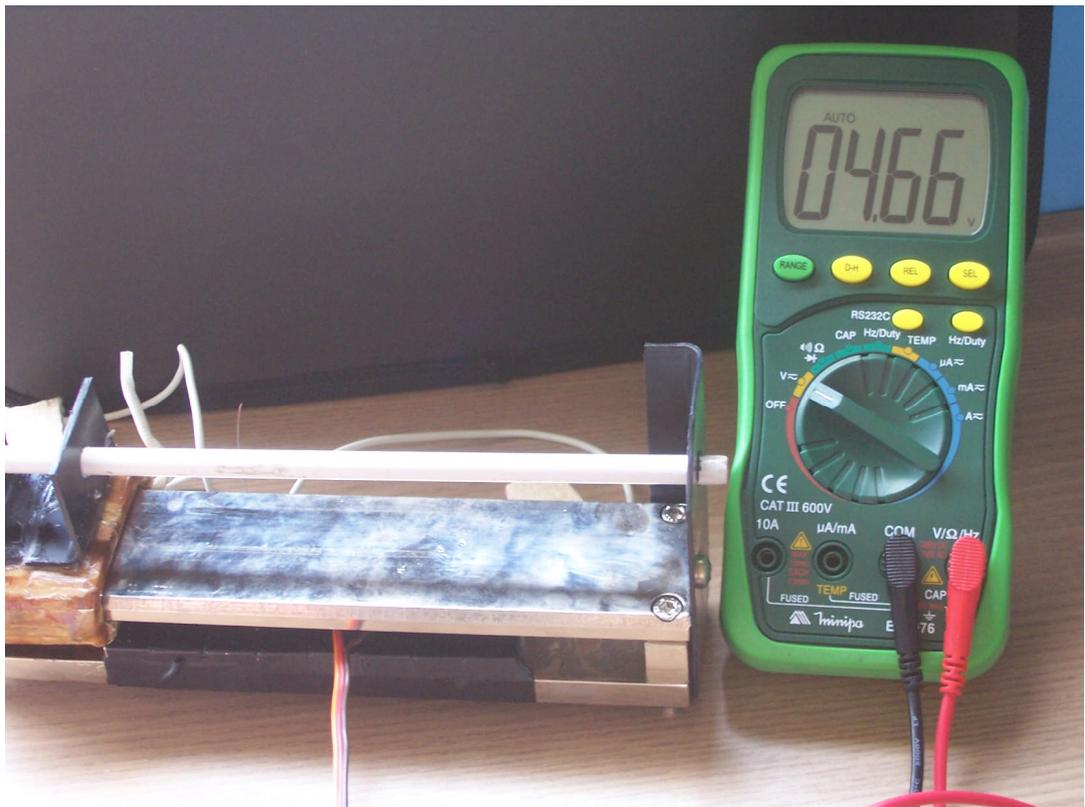


Figura 4.21 - Medição de tensão no ponto 11.

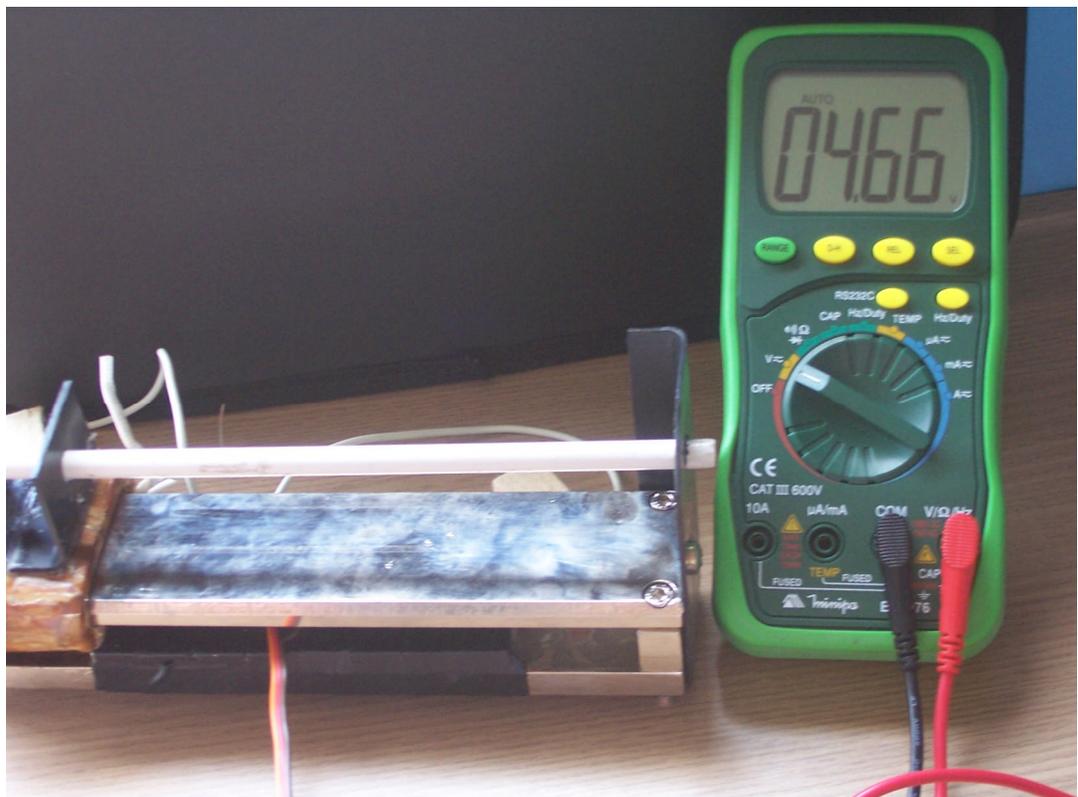


Figura 4.22 - Medição de tensão no ponto 12.

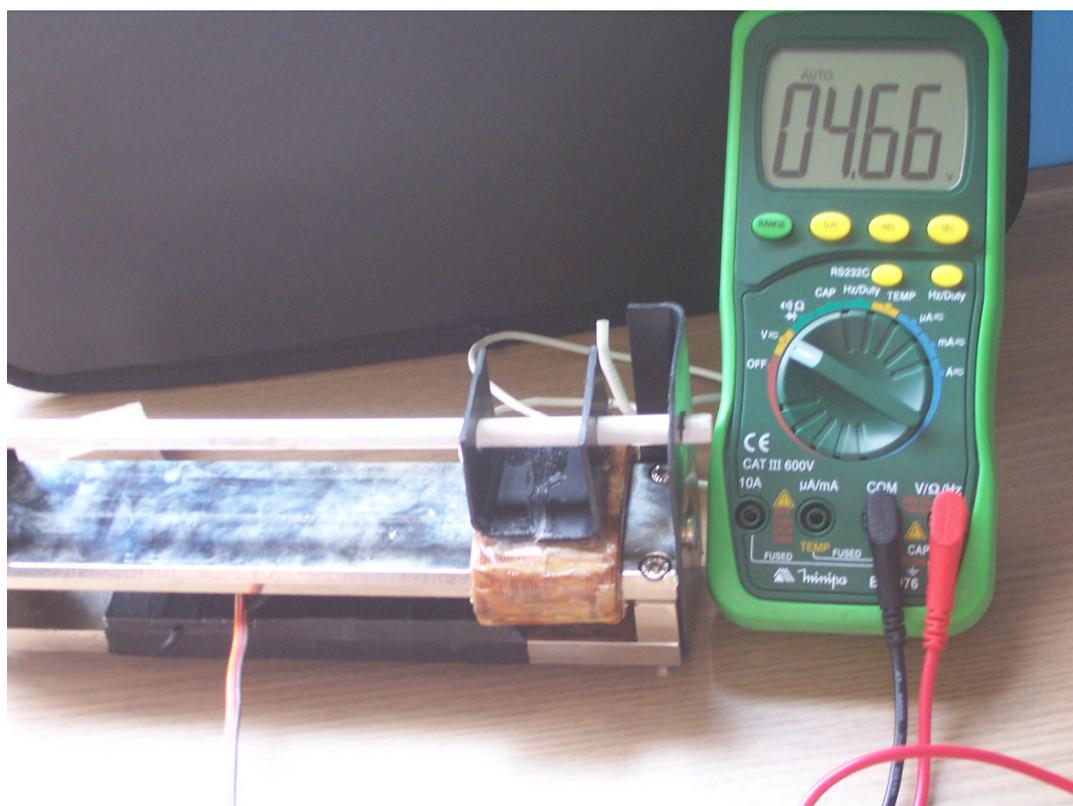


Figura 4.23 - Medição de tensão no ponto 13.

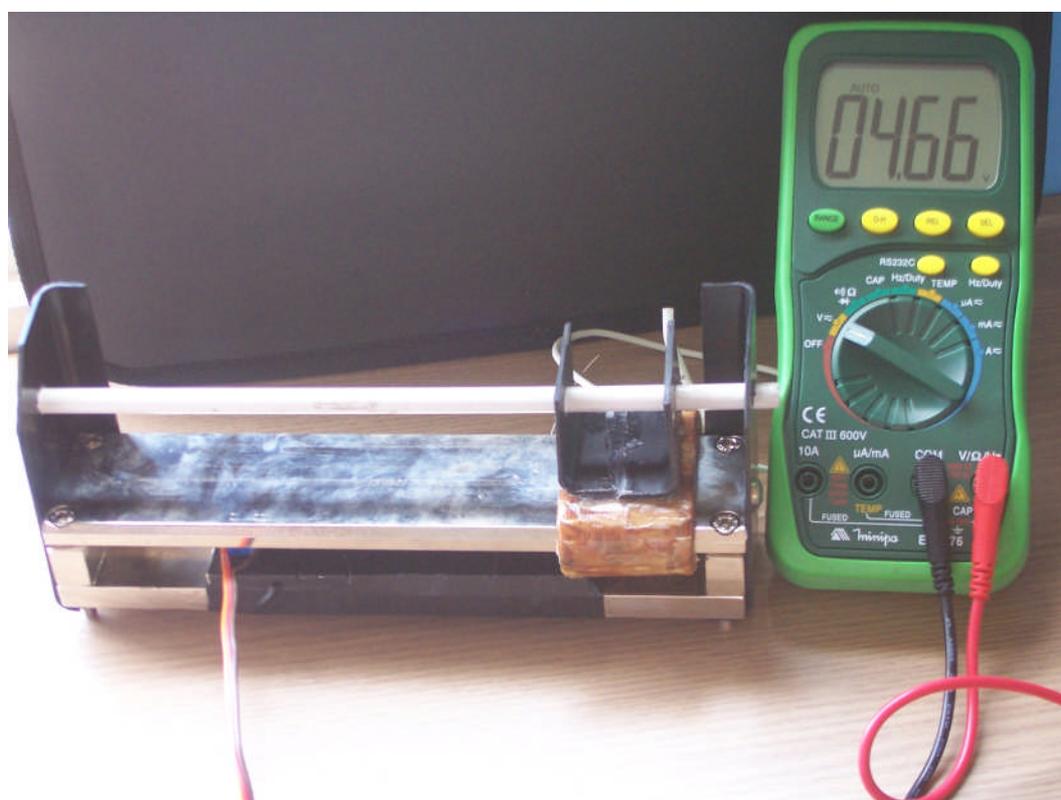


Figura 4.24 - Medição de tensão no ponto 14.

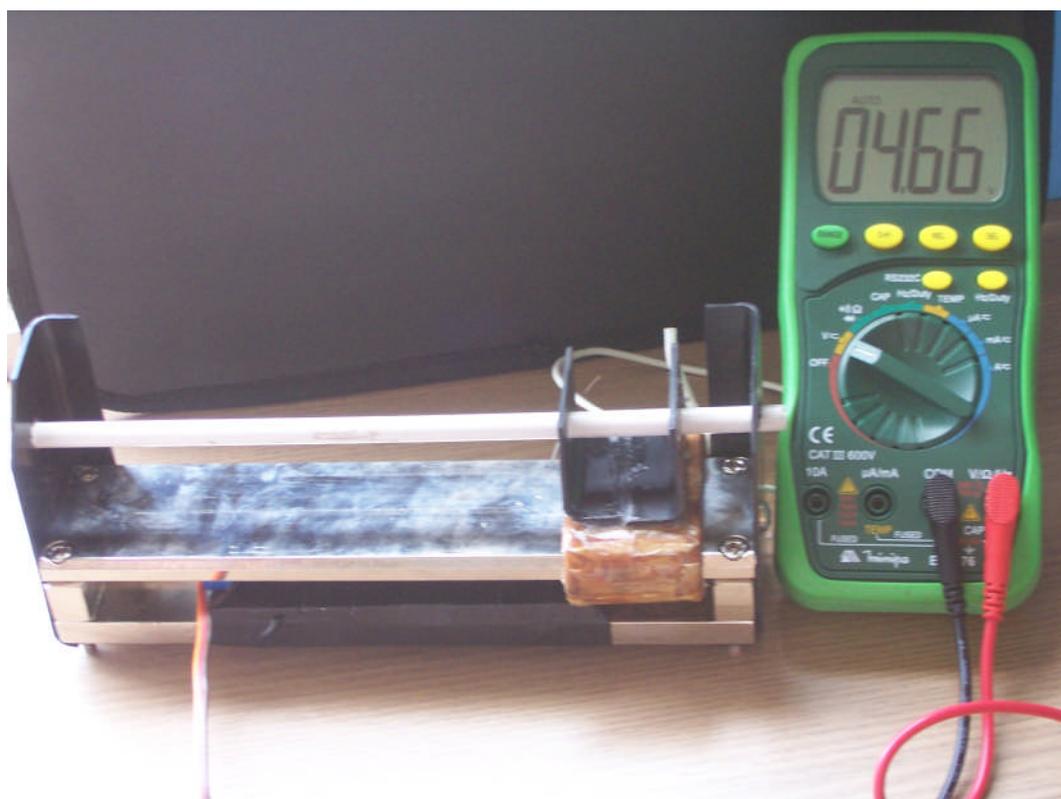


Figura 4.25 - Medição de tensão no ponto 15.

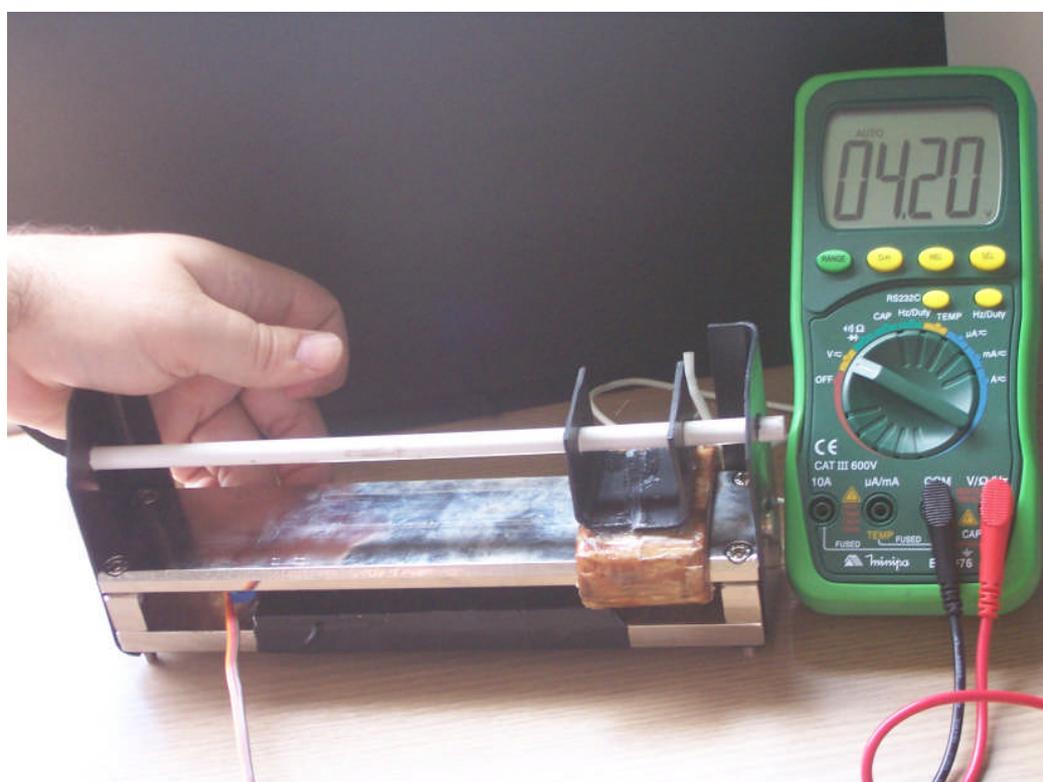


Figura 4.26 - Medição de tensão no ponto 16.

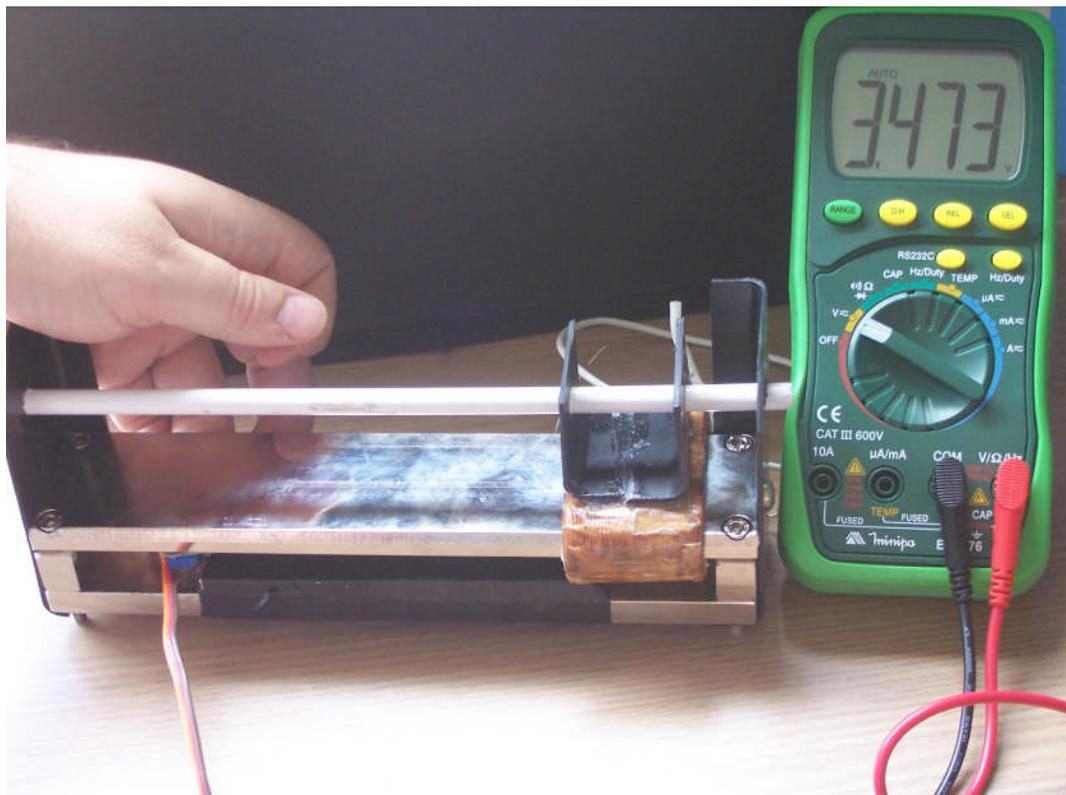


Figura 4.27 - Medição de tensão no ponto 17.

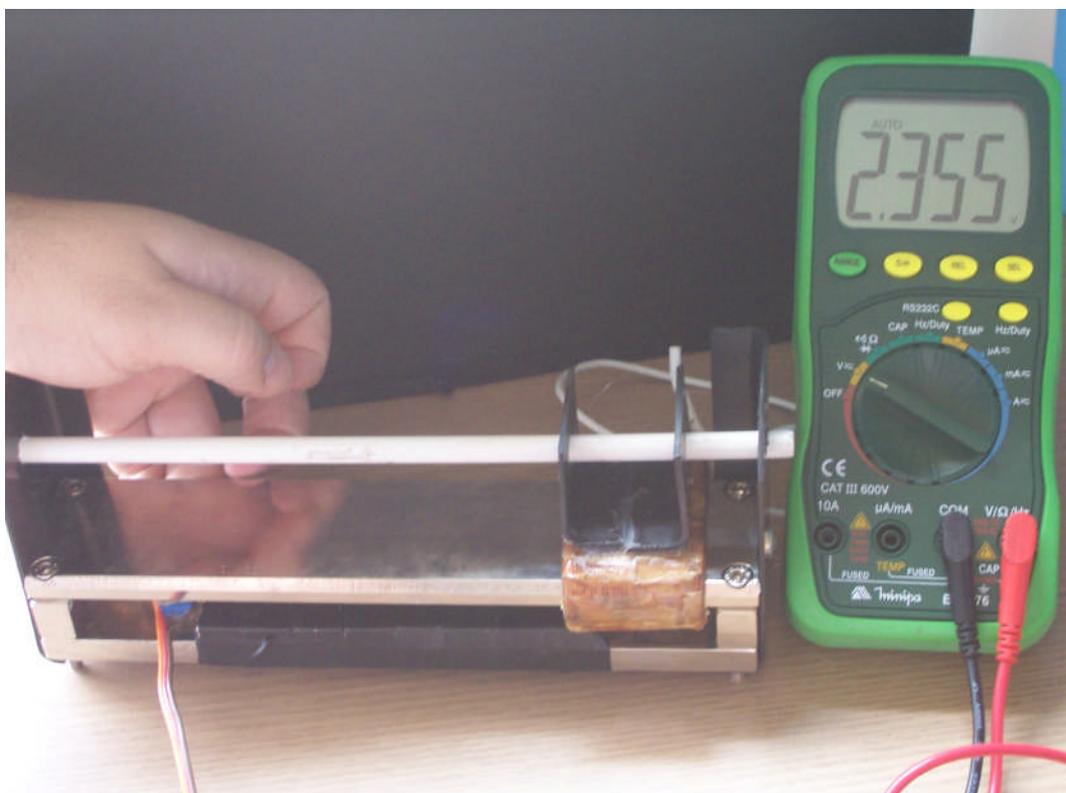


Figura 4.28 - Medição de tensão no ponto 18.

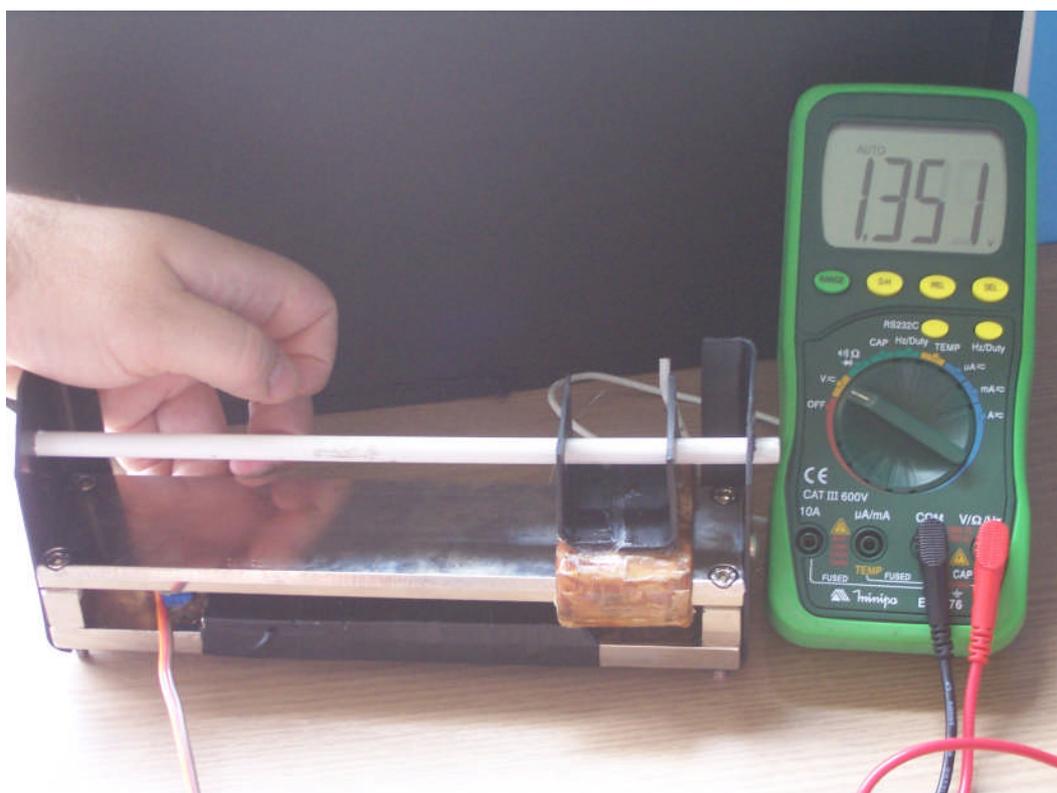


Figura 4.29 - Medição de tensão no ponto 19.

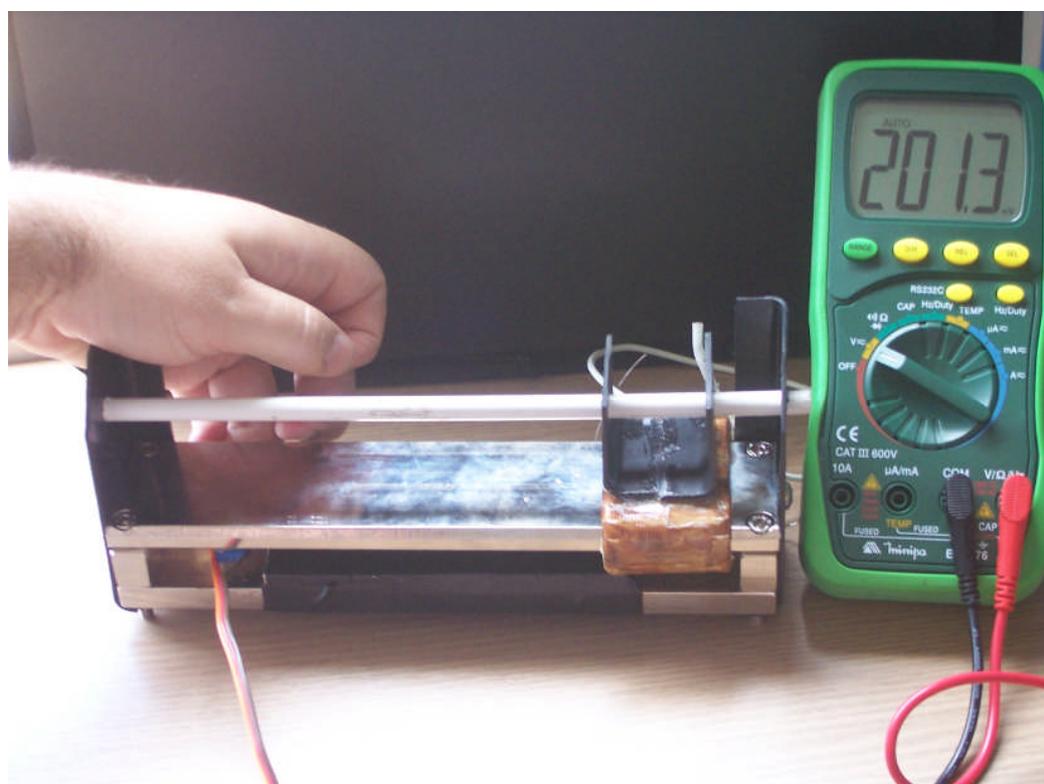


Figura 4.30 - Medição de tensão no ponto 20.

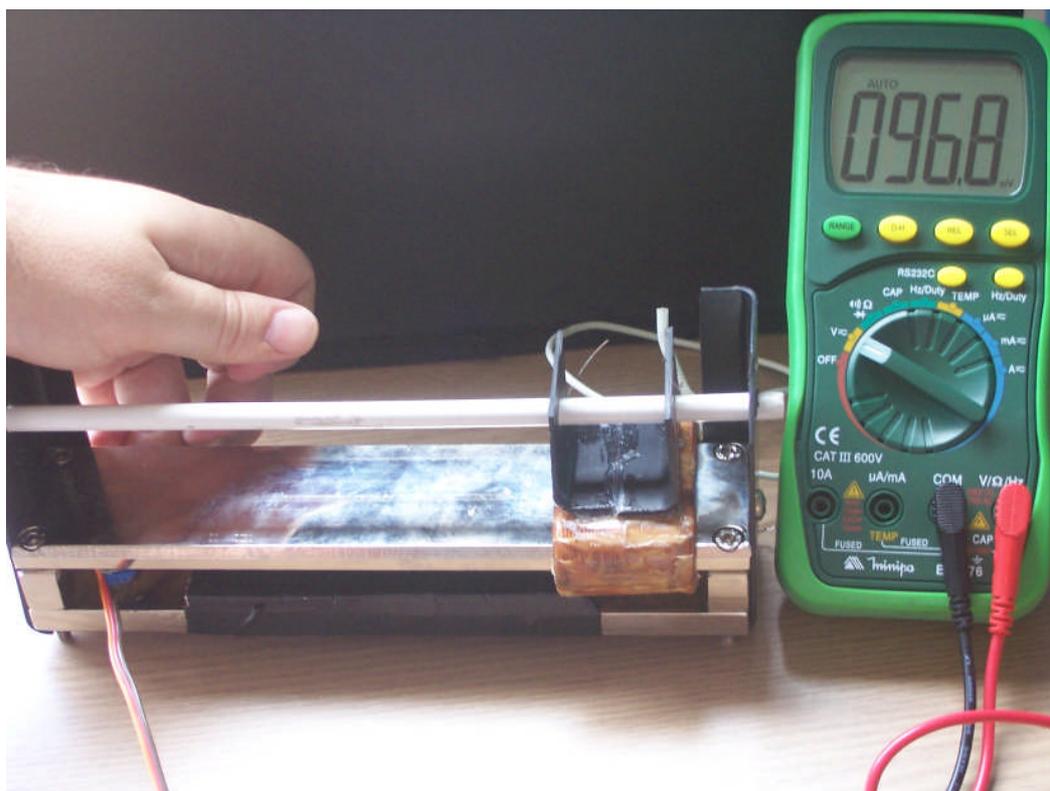


Figura 4.31 - Medição de tensão no ponto 21.

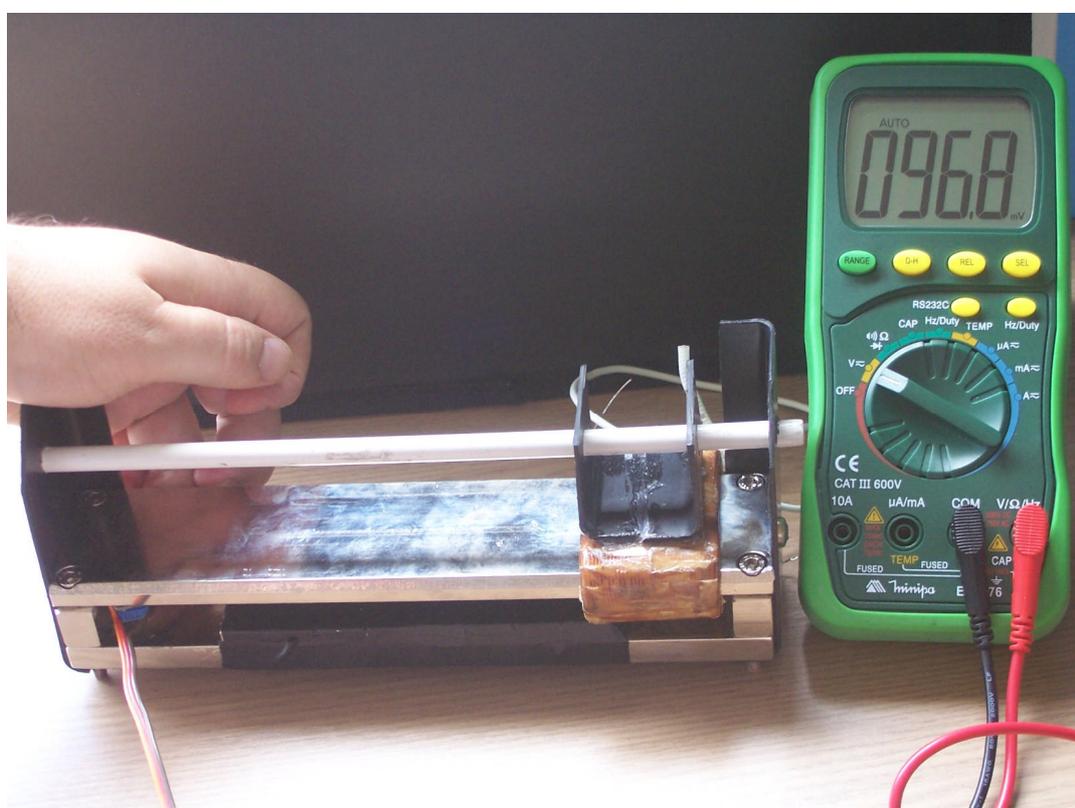


Figura 4.32 - Medição de tensão no ponto 22.



4.3 Comparações dos Resultados das Simulações, Modelos e o Sistema Real

O valor médio de densidade de fluxo magnético calculado foi de 0,52T (Capítulo 3.2) e no modelo ideal com 0,3T (Capítulo 3.2).

Conforme já descrito no capítulo 3, nos cálculos teóricos considerou-se a permeabilidade magnética do aço igual a infinito. Nesta situação a queda de potencial magnética foi tratada como desprezível.

As simulações realizadas posteriormente aos cálculos evidenciaram que a densidade de fluxo magnético no entreferro teria valor inferior àquele definido pela reta de carga do ímã permanente.

A verificação de densidade de fluxo magnético através da leitura de tensão, capítulo 3, mesmo não tendo estabelecido a densidade de fluxo magnético em cada ponto demonstrou que a concentração de fluxo magnético está localizada na região dos ímãs permanentes. Neste aspecto o teste real e a simulação demonstraram o mesmo resultado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se o estudo de um motor *voice coil* eletromagnético, que desenvolve o movimento sobre um trilho. Foram apresentados seus aspectos construtivos e de funcionamento, e o resultado prático através de um protótipo, desenvolvido pelo modelo analítico proposto, pela análise numérica através do Método dos Elementos Finitos. O atuador linear em estudo foi projetado através do processo analítico descrito no capítulo 3, e suas características construtivas foram validadas a partir das informações geradas pelos modelos teóricos descritos nos capítulos 3 e 4 deste trabalho.

O modelo analítico desenvolvido e descrito no capítulo 4 permitiu prever o comportamento da distribuição de fluxo magnético no entreferro. E no capítulo 3 foi possível prever o comportamento da força que atua sobre o carro do atuador linear.

A etapa de análise pelo Método dos Elementos Finitos foi extremamente importante e complementou as informações oriundas do modelo analítico. O efeito da reação da armadura pode ser apreciado e analisado através de toda a geometria do atuador linear.

A etapa de verificação de densidade de fluxo magnético no interior do núcleo pode demonstrar o efeito dos imãs permanentes no circuito. As regiões do núcleo apresentaram densidades de fluxo magnético dentro das expectativas, e em conformidade com as simulações do circuito.

Os resultados encontrados nos modelos teóricos apresentaram diferenças em torno de 16%, em relação à força a ser desenvolvida pelo motor linear na simulação. As diferenças encontradas podem ser justificadas pela possível diferença existente entre as características magnéticas teóricas e as características dos materiais adotados para simulação. O deslocamento do carro, como forma de demonstrar o efeito da Força de Lorentz, foi plenamente atingido, assim como, a



inversão do sentido do deslocamento do carro em função da inversão do sentido da corrente na bobina.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A continuidade deste trabalho poderá contemplar o estudo de força eletromagnética ativa desenvolvida pelo motor linear, adicionando-se ao carro um atuador, que possa desenvolver uma força pré-determinada.

Também está aberto o caminho para a criação de um sistema eletrônico que possibilite um controle de velocidade do carro e que possa analisar a dissipação de potência do sistema atuador.



6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] CHAI, Hi-Dong – Eletromechanical motion devices. – Prentice Hall. 1998.
- [2] FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. – Máquinas Elétricas, com Introdução à Eletrônica de Potência. – Bookman Companhia Editora. 2006.
- [3] FALCONE, A.G. – Eletromecânica: transformadores e transdutores. – Edgard Blücher. 1979.
- [4] SILVEIRA, Marília Amaral da – Tese para obtenção de título de Doutor em engenharia. Disponível em: <www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3592/000390183.pdf>. Acesso em: 2º semestre de 2009.
- [5] UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Desenvolvimento de uma máquina galvanométrica de três eixos. Disponível em: <<http://www.pgeas.ufsc.br/selecao2008/arquivos/daniel-1.pdf>>. Acesso em: 2º semestre de 2009.
- [6] LMEAE , UFRGS – Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia .Disponível em: <http://www.ufrgs/lmeae>. Acesso em: 2º semestre de 2009.

ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO DOS IMÃS PERMANENTES DE NEODÍMIO-FERRO-BORO



ESPECIFICAÇÕES:

Ímã: NdFeB (Neodímio, Ferro, Boro)
Tratamento superficial: Níquel
Magnetização: Bipolar Axial

Tipo	Remanência Br	Força Coercitiva bHc	Força Coercitiva Intrínseca iHc	Produto Energético Máximo (BH)máx	Temperatura de trabalho
	kg	kOe	kOe	MGOe	°C
N35	12.1	10.9	12.0	35	80
N42	13.2	11.6	12.0	42	80
N48	14.1	10.5	11.0	48	80

TABELA PEÇAS RETANGULARES/QUADRADAS

DIMENSÃO	TIPO	1 A 100	DIMENSÃO	TIPO	1 A 100	DIMENSÃO	TIPO	1 A 100
5X5X5	N35	R\$ 1,18	23X10X3,5	N35	R\$ 6,08	50X15x7	N35	R\$ 22,70
8x8x5	N35	R\$ 2,52	25X10X10	N36	R\$ 16,51	50X9X9	N35	R\$ 23,59
10x10x3	N35	R\$ 2,47	25x7x2,5	N35	R\$ 2,44	50x20x10	N35	R\$ 40,81
10x10x10	N35	R\$ 7,36	25,4X25,4X6,35	N35	R\$ 12,62	50x20x20	N35	R\$ 58,62
10x15X10	N35	R\$ 0,00	25,4X25,4X6,35	N42	R\$ 16,69	50x50x10	N48	R\$ 185,68
12x4x2	N35	R\$ 1,14	25,4x25,4x12,7	N35	R\$ 90,60	50,8X50,8X12,7	N35	R\$ 86,42
12x4x2	N42	R\$ 1,01	25x15x5	N35	R\$ 7,36	50,8X50,8X25,4	N35	R\$ 190,73
12x5,75x3,75	N35	R\$ 1,43	25x15x5	N42	R\$ 8,41	50x50x10	N48	R\$ 185,12
15x4x2	N35	R\$ 1,28	30x5x5	N35	R\$ 8,63	60x6x1,5	N35	R\$ 7,85
15x4x3	N35	R\$ 4,54	30x5x5	N42	R\$ 7,57	60x10x5	N35	R\$ 25,55
15x5x5	N35	R\$ 3,79	30x20x10	N35	R\$ 24,09	60x20x20	N35	R\$ 70,12
15x4x4	N35	R\$ 2,31	30x20x10	N42	R\$ 28,92	70x20x10	N35	R\$ 81,34
15x4x4	N42	R\$ 2,99	35x6x4	N35	R\$ 6,73	90x20x5	N35	R\$ 42,07
15x4x4	N48	R\$ 3,95	35X15X10	N35	R\$ 25,36	90x20x5	N42	R\$ 51,89
15x4x5	N48	R\$ 4,42	40X15X5	N50	R\$ 23,28	73x6x6	N35	R\$ 15,26
15X4X6	N48	R\$ 4,96	40X15X5	N35	R\$ 12,90	150x50x30	N35	R\$ 589,02
15x14x1,5	N35	R\$ 8,41	40x15x10	N50	R\$ 47,96			
15x5x6	N48	R\$ 6,10	40x20x10	N35	R\$ 30,71			
16x10x2	N35	R\$ 2,78	40x20x10	N42	R\$ 44,23			
16x10x4	N35	R\$ 7,74	40x25x5	N35	R\$ 22,29			
18X18X2	N35	R\$ 8,21	45x45x20	N35	R\$ 95,37			
18x18x4	N35	R\$ 8,41	50x6x1	N35	R\$ 5,05			
19x12,5x6,3	N35	R\$ 10,01	50x9x9	N35	R\$ 16,55			
20x20x5	N35	R\$ 10,33	50x20x7	N35	R\$ 34,98			
20x20x20	N35	R\$ 54,79	50x15x5	N35	R\$ 16,83			

ANEXO B – DATA SHEET TIP 147



TIP140/141/142
TIP145/146/147

COMPLEMENTARY SILICON POWER DARLINGTON TRANSISTORS

- TIP141, TIP142, TIP145 AND TIP147 ARE ST Microelectronics PREFERRED SALESTYPES
- COMPLEMENTARY PNP - NPN DEVICES
- MONOLITHIC DARLINGTON CONFIGURATION
- INTEGRATED ANTIPARALLEL COLLECTOR-EMITTER DIODE

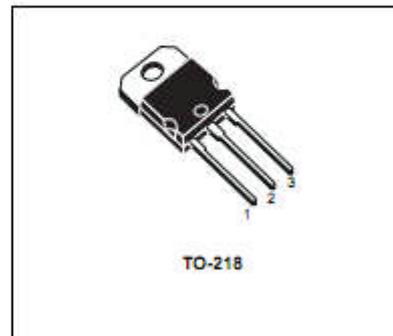
APPLICATIONS

- LINEAR AND SWITCHING INDUSTRIAL EQUIPMENT

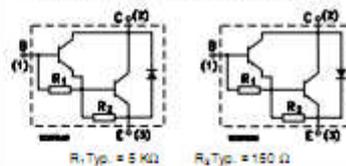
DESCRIPTION

The TIP140, TIP141 and TIP142 are silicon Epitaxial-Base NPN power transistors in monolithic Darlington configuration, mounted in TO-218 plastic package. They are intended for use in power linear and switching applications.

The complementary PNP types are TIP145, TIP146 and TIP147 respectively.



INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value			Unit	
		NPN	TIP140	TIP141		TIP142
		PNP	TIP145	TIP146	TIP147	
V_{CB0}	Collector-Base Voltage ($I_C = 0$)		60	80	100	V
V_{CE0}	Collector-Emitter Voltage ($I_B = 0$)		60	80	100	V
V_{EB0}	Emitter-Base Voltage ($I_C = 0$)			5		V
I_C	Collector Current			10		A
I_{CM}	Collector Peak Current			20		A
I_B	Base Current			0.5		A
P_{tot}	Total Dissipation at $T_{case} \leq 25^\circ\text{C}$			125		W
T_{stg}	Storage Temperature			-65 to 150		$^\circ\text{C}$
T_J	Max. Operating Junction Temperature			150		$^\circ\text{C}$

For PNP types voltage and current values are negative.

March 2000

1/4

ANEXO C - DATA SHEET IRF840A

International
IR Rectifier

SMPS MOSFET

IRF840A

HEXFET[®] Power MOSFET

PD-91900B

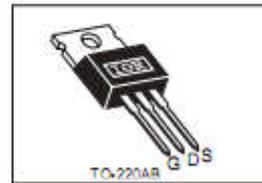
Applications

- Switch Mode Power Supply (SMPS)
- Uninterruptable Power Supply
- High speed power switching

V_{DSS}	$R_{ds(on) \max}$	I_D
500V	0.85 Ω	8.0 A

Benefits

- Low Gate Charge Q_g results in Simple Drive Requirement
- Improved Gate, Avalanche and dynamic dv/dt Ruggedness
- Fully Characterized Capacitance and Avalanche Voltage and Current
- Effective C_{oss} Specified (See AN1001)



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	8.0	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	5.1	
I_{DM}	Pulsed Drain Current Φ	32	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	125	W
	Linear Derating Factor	1.0	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 30	V
dv/dt	Peak Diode Recovery $dv/dt \Phi$	50	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (16mm from case)	
	Mounting torque, S-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1N-m)	

Typical SMPS Topologies:

- Two Transistor Forward
- Half Bridge
- Full Bridge

www.irf.com

1

04/02/03

ANEXO D - DATA SHEET IR2111(S)

International
IR Rectifier

Data Sheet No. PD60028-L

IR2111(S)

HALF-BRIDGE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Matched propagation delay for both channels
- Internally set deadtime
- High side output in phase with input

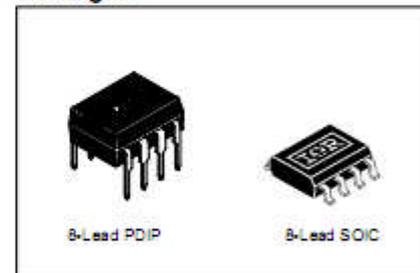
Description

The IR2111(S) is a high voltage, high speed power MOSFET and IGBT driver with dependent high and low side referenced output channels designed for half-bridge applications. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic input is compatible with standard CMOS outputs. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Internal deadtime is provided to avoid shoot-through in the output half-bridge. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 600 volts.

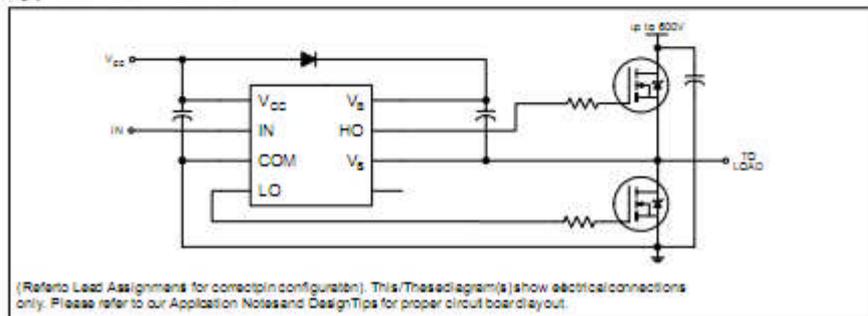
Product Summary

V_{OFFSET}	600V max.
$I_{\text{O}+/-}$	200 mA / 420 mA
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{\text{on/off (typ.)}}$	750 & 150 ns
Deadtime (typ.)	650 ns

Packages



Typical Connection



ANEXO E - DATA SHEET SN74LS73A

- Package Options Include Plastic "Small Outline" Packages, Flat Packages, and Plastic and Ceramic DIPs
- Dependable Texas Instruments Quality and Reliability

description

The '73, and 'H73, contain two independent J-K flip-flops with individual J-K, clock, and direct clear inputs. The '73, and 'H73, are positive pulse-triggered flip-flops. J-K input is loaded into the master while the clock is high and transferred to the slave on the high-to-low transition. For these devices the J and K inputs must be stable while the clock is high.

The 'LS73A contains two independent negative-edge-triggered flip-flops. The J and K inputs must be stable one setup time prior to the high-to-low clock transition for predictable operation. When the clear is low, it overrides the clock and data inputs forcing the Q output low and the \bar{Q} output high.

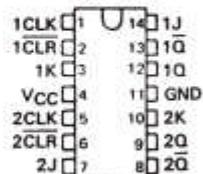
The SN5473, SN54H73, and the SN54LS73A are characterized for operation over the full military temperature range of -55°C to 125°C . The SN7473, and the SN74LS73A are characterized for operation from 0°C to 70°C .

SN5473, SN54LS73A, SN7473, SN74LS73A DUAL J-K FLIP-FLOPS WITH CLEAR

SOLE115 - DECEMBER 1983 - REVISED MARCH 1988

SN5473, SN54LS73A . . . J OR W PACKAGE
SN7473 . . . N PACKAGE
SN74LS73A . . . D OR N PACKAGE

(TOP VIEW)



73
FUNCTION TABLE

INPUTS				OUTPUTS	
CLR	CLK	J	K	Q	\bar{Q}
L	X	X	X	L	H
H	\downarrow	L	L	Q_0	\bar{Q}_0
H	\downarrow	H	L	H	L
H	\downarrow	L	H	L	H
H	\downarrow	H	H	TOGGLE	

'LS73A
FUNCTION TABLE

INPUTS				OUTPUTS	
CLR	CLK	J	K	Q	\bar{Q}
L	X	X	X	L	H
H	\downarrow	L	L	Q_0	\bar{Q}_0
H	\downarrow	H	L	H	L
H	\downarrow	L	H	L	H
H	\downarrow	H	H	TOGGLE	
H	H	X	X	Q_0	\bar{Q}_0

FOR CHIP CARRIER INFORMATION,
CONTACT THE FACTORY

ANEXO F - DATA SHEET MS MV7


Série MV

 Micronutor®
 Miniatura

- Circuito inversor com capacidade até 15A
- Mecanismo de ação rápida dos contatos com longa vida
- Ação de esfregamento e auto-limpeza dos contatos
- Opções de força de operação
- Variedade de atuadores e configuração dos contatos
- Terminais faston e para solda
- Dimensões conforme DIN 41635 forma A
- Componente Reconhecido UL (MV3 File E212007)
- Componente aprovado IEC 61058-1 (MV7)

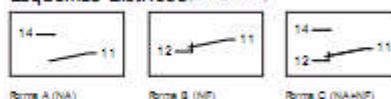


IEC 61058-1

Capacidade Elétrica

MV3	5A 250Vdc	
MV5	10A 250Vdc	
MV7	15A 250Vdc	IEC 61058-1

Esquemas Elétricos (IEC 60947-5-1)



Devido à alteração consideramos perdas

Especificações

Resistência de Contato	50mΩ máxima inicial (em 1A, 5Vdc)
Temperatura Ambiente	+55°C máxima (consultar nos parâmetros para aplicações em temperaturas de +125°C)
Velocidade de Operação	0,5mm/s mínima e 1mm/s máxima (na bobina)
Vida Mecânica	10.000.000 ciclos
Vida Elétrica	50.000 ciclos
Materiais	Invólucro: Poliamida
	Arunderes: Aluminos. Apo inoxidável
	Releto: Termoplástico
	Terminais: Cobre/Liga de Cobre
Contatos:	Liga de Prata

ANEXO F - DATA SHEET KA7805



www.fairchildsemi.com

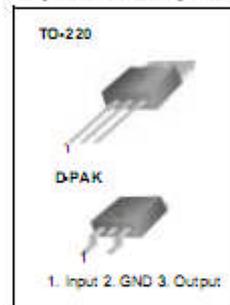
KA78XX/KA78XXA 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator

Features

- Output Current up to 1A
- Output Voltages of 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V
- Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

Description

The KA78XX/KA78XXA series of three-terminal positive regulator are available in the TO-220/D-PAK package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



Internal Block Diagram

