

André Cestari de Mesquita

Desenvolvimento de um atuador linear elétrico para veículo de competição

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
eletrônica.

ORIENTADOR: Prof. Edson Gesualdo.

São Carlos
2009

Dedicatória

Dedico este trabalho em especial aos meus pais e irmãos e a todos os que fazem uso do conhecimento e não medem esforços para aplicar as idéias e construir novas soluções para problemas práticos.

Agradecimentos

Ao professor Edson Gesualdo por aceitar a proposta de trabalho e incentivar a realização do projeto. Ao técnico Ruy Bertho da oficina do departamento de engenharia elétrica. A Alison Bedin e demais funcionários da Cestalto Industrial e Comercial.

À equipe EESC USP de fórmula SAE pelos anos de trabalho e conquistas e pelo aprendizado.

Aos amigos Flávio, Eduardo e Marcelo companheiros nos anos de universidade.

Resumo

A automatização se faz presente cada vez mais no mundo automotivo, tanto nos veículos de passeio quanto nos de alto desempenho. Nas competições realizadas entre estudantes de universidades nascem novas tecnologias que mais tarde poderão integrar estes veículos. As trocas de marcha têm papel fundamental na aceleração e desempenho e é por isso que sistemas automatizados ganham espaço no mercado automobilístico empregando as mais diversas tecnologias. O objetivo atingido neste trabalho foi desenvolver um atuador linear eletromagnético, do tipo solenóide, capaz de substituir o atual sistema eletropneumático utilizado no sistema de troca de marchas pela equipe de competição SOLID EDGE EESC USP, da Universidade de São Paulo, na categoria Fórmula SAE.

Palavras-chaves: Atuador, Marcha, Fórmula SAE, Solenóide

Abstract

Automation is increasingly present in the automotive world, both in regular and high performance vehicles. The university engineering competitions comprise a most prolific scenario in which the new technologies that are to be employed in cars in a near future are born. Gear shifts have a key role in the acceleration and overall performance of a vehicle, which explains why the automated transmission systems are currently growing popular in the market. The purpose of this work was to develop a solenoid type linear electromagnetic actuator capable of replacing the current electropneumatic gear shifting system used by the EESC USP SOLID EDGE Formula SAE racing team.

Key words: Actuator, Gear shift, Solenoid, Formula SAE,

Símbolos e siglas

AD	Analógico – Digital.
AMT	<i>Automated Manual Transmission</i> – Transmissão Manual Automatizada.
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Projeto Assistido por Computador.
CC	Corrente contínua.
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> – Transistor de efeito de campo do tipo metal-óxido-semicondutor .
NdFeB	Neodímio, Ferro, Boro. Refere-se a ímãs feitos desta liga.
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> – Placa de circuito impresso.
SAE	<i>Society of Automotive Engineering</i> – Sociedade de engenharia automotiva
SmCo	Samário, Cobalto. Refere-se a ímãs feitos desta liga.
TBJ	Transistor Bipolar de Junção.
R _{DS(on)}	Resistência equivalente entre o Dreno e a Fonte em um transistor de efeito de campo quando em condução.

Sumário

Dedicatória.....	III
Agradecimentos.....	IV
Resumo.....	V
Abstract.....	VI
Símbolos e siglas.....	VII
1 Introdução.....	1
1.1 A competição.....	1
1.2 A equipe SOLID EDGE - EESC USP.....	1
1.3 Tendências na indústria automotiva.....	2
1.4 O sistema de troca de marchas.....	2
1.5 O trabalho do atuador.....	3
1.5.1 Vantagens desse sistema.....	5
1.5.2 Desvantagens desse sistema.....	5
1.6 Alternativas.....	5
1.6.1 Solenóides.....	6
1.7 Ímãs de Neodímio.....	6
2 Objetivos.....	7
3 Revisão Bibliográfica.....	8
4 Dimensionamento e Especificações de Projeto.....	11
4.1 Projeto mecânico.....	11
4.2 Projeto Elétrico.....	12
4.2.1 Circuito magnético.....	14
4.2.2 Circuito de acionamento e potência.....	15
4.2.3 Módulo de controle.....	18
4.2.4 Software de controle.....	21
4.3 Seleção de materiais.....	22
4.3.1 Materiais magnéticos moles.....	22
4.3.2 Ímas permanentes.....	23
4.3.3 Buchas.....	23
4.4 Simulação Magnetostática – Elementos finitos.....	24
5 Construção do protótipo I.....	25
5.1 Manufatura das Bobinas.....	25
5.2 Manufatura de carcaça e pistão.....	25
5.3 Montagem do conjunto.....	26
6 Testes e resultados do protótipo I.....	29
6.1 Acionamento.....	29
6.2 Atuador.....	30
6.3 Procedimento.....	30
6.4 Desempenho do protótipo I.....	31
6.5 Custos do protótipo I.....	31
7 Otimização e construção do protótipo II.....	32
7.1 Projeto do protótipo II.....	32
7.2 Construção do protótipo II.....	35
7.3 Testes e desempenho do protótipo II.....	39
7.4 Custos do protótipo II.....	40
8 Conclusão.....	41
9 Comentários.....	42

10 Bibliografia.....	43
----------------------	----

Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama exemplificando o funcionamento do sistema.....	3
Figura 2: Eixo seletor de marchas.....	4
Figura 3: Eixo seletor, mostrando a ponta estrelada e a mola.....	4
Figura 4: Ponta em formato de estrela e a mola em um dos vales, correspondente à marcha neutra..	4
Figura 5: Eixo seletor de marcha, garfos movimentados por ele ao girar e engrenagens deslocadas neste movimento.....	5
Figura 6: Eficiência de motor CC em função das dimensões, para um determinado torque e velocidade [2].....	9
Figura 7: Topologia do atuador.....	11
Figura 8: Dimensões iniciais da carcaça do atuador, vista em corte.....	12
Figura 9: Dimensões iniciais do pistão do atuador, vista em corte.....	12
Figura 10: Diagrama de blocos do sistema. Em sentido horário: volante, módulo de potência e atuador, potenciômetro e unidade de controle.....	13
Figura 11: Circuito magnético para estimativa de corrente e força em um solenóide.....	14
Figura 12: Ponte H, para simulação do chaveamento dos MOSFETs.....	15
Figura 13: Etapas foto-acopladoras, conectores e ponte-H.	17
Figura 14: Layout proposto para o módulo de potência.....	18
Figura 15: Simulação do circuito em ponte, mostrando o pulso de tensão de acionamento dos fotoacopladores e a corrente na carga.....	18
Figura 16: Detecção da marcha através do potenciômetro.....	19
Figura 17: Esquemático da unidade de controle.....	20
Figura 18: Unidade de controle com microcontrolador e fotoacopladores em evidência	21
Figura 19: Trecho do programa que faz a leitura do potenciômetro.....	22
Figura 20: Curva típica de desmagnetização do NdFeB, a diferentes temperaturas [8].....	23
Figura 21: Densidade de fluxo no atuador para uma corrente de 5 A.....	24
Figura 22: Bobina no início e durante o processo de enrolamento.....	25
Figura 23: A carcaça do atuador, manufaturada em três partes, vista em corte.....	26
Figura 24: Usinagem da carcaça, parte lateral e central.....	27
Figura 25: Carcaça lateral e bobina.....	27
Figura 26: Carcaça lateral e central montadas e após colocação do pistão e da segunda bobina.....	27
Figura 27: Conjunto desmontado, o pistão já com os ímãs acoplados.....	28
Figura 28: Circuito de acionamento das bobinas.....	29
Figura 29: Detalhes do circuito: fotoacopladores em verde, MOSFETs em vermelho, e o microcontrolador em azul.....	29
Figura 30: Pulso de acionamento de 500ms, tensão de 1.042 V sobre a resistência $R = 0,33 \text{ ohm}$, o que indica 3 A de corrente.....	30
Figura 31: Estudo comparativo das posições dos ímãs.....	33
Figura 32: Força ao longo de várias posições do pistão, com excitação constante de 5 A em cada bobina, em sentidos opostos.....	34
Figura 33: Etapas da simulação em elementos finitos: a) o modelo em CAD. b) A malha definida. c) a representação vetorial da densidade de fluxo.....	34
Figura 34: Densidade de fluxo no atuador para corrente de 5 A em cada bobina, em sentidos opostos	35
Figura 35: Vista em corte do conjunto montado em CAD.....	36
Figura 36: Sequência de montagem do atuador.....	36
Figura 37: Eixo magnético, bobinas e carcaça.....	37
Figura 38: Foto do atuador montado.....	37
Figura 39: Vista frontal dos atuadores: o protótipo II possui menor diâmetro externo e de eixo do	

pistão.....	38
Figura 40: Vista de cima: o protótipo II possui maior comprimento em relação ao protótipo I.....	38
Figura 41: Bancada de testes.....	39
Figura 42: Atuador, alavanca e eixo seletor de marchas.....	40

Índice de tabelas

Tabela 1: Parâmetros das bobinas construídas.....	38
Tabela 2: Modelos simulados em elementos finitos.....	46

1 Introdução

1.1 A competição

A Fórmula SAE é uma competição exclusiva para estudantes universitários, organizada pela SAE (Society of Automotive Engineers). Presente no Brasil, Alemanha, EUA, Austrália, Itália, Japão, é patrocinada por empresas líderes no ramo automotivo como Petrobrás, Ford, GM, Daimler-Chrysler, Bosch, entre outras. Está atualmente na quinta edição no país. Cada equipe de estudantes deve desenvolver um projeto, desde sua concepção até a fase de protótipo, que deve ser construído e ter seu desempenho avaliado em provas dinâmicas e estáticas. As principais características do veículo são: chassi monoposto, motor de 4 tempos de no máximo 610 cc, alto desempenho em aceleração, frenagem, dinâmica lateral, boa relação custo benefício, confiabilidade e fácil manutenção. Os juízes avaliam além dos relatórios técnicos, proposta de *marketing*, planejamento de produção em série e o custo do projeto.

1.2 A equipe SOLID EDGE - EESC USP

A Equipe EESC-USP de Fórmula SAE foi fundada em Junho de 2003 por alunos da Escola de Engenharia de São Carlos, alunos estes que em sua maioria eram ex-membros da Equipe EESC-USP de Mini-Baja.

A primeira gestão tinha como objetivos finalizar o projeto do protótipo E1, ser campeã brasileira, e, assim, poder representar o Brasil nos EUA, finalizando todas as provas da competição. Os objetivos foram alcançados, a equipe da Escola de Engenharia de São Carlos foi a primeira colocada na competição brasileira de Fórmula SAE, que ocorreu no ano de 2004, na cidade de São Paulo, e devido a este título, ganhou o direito de representar o Brasil na *Formula SAE Competition*, em Detroit-MI (EUA), em Maio de 2005, onde se tornou a segunda melhor equipe estreante da competição e conquistou um importante prêmio de melhor sistema de freios.

Ao fim desta competição, uma nova gestão se iniciava onde, tendo a concepção do projeto pronta, as metas desta nova gestão estavam voltadas para a área administrativa, cujos principais objetivos seriam a profissionalização e a reestruturação do organograma da Equipe. As mudanças foram bem sucedidas, e o resultado deste bom trabalho veio na cidade de Piracicaba-SP em Outubro de 2005, onde a Equipe EESC-USP de Formula SAE sagrou-se bicampeão brasileira de Formula SAE, além da conquista do “Prêmio de Inovação Tecnológica”.

Em Maio de 2006 uma nova gestão se iniciou, a terceira desde a criação da Equipe EESC-USP de Fórmula SAE, que tem mantido o foco no gerenciamento de projeto e na busca de novas parcerias.

Atualmente, na quarta gestão desde novembro de 2007, a equipe conta com 40 membros, que são alunos de graduação e pós-graduação de diferentes cursos da Escola de Engenharia de São Carlos, além de um professor orientador e professores co-orientadores.

1.3 Tendências na indústria automotiva

Sistemas eletromecânicos de atuação vêm sendo considerados como alternativa aos sistemas hidráulicos e pneumáticos, no controle de embreagens e trocas de marcha em transmissões, uma vez que oferecem potencial para maior eficiência, menos componentes e menor volume, já que dispensam o uso de fluídos [3]. Com o aumento da demanda por carros ecologicamente corretos e combustíveis alternativos, há uma tendência de migração para sistemas elétricos de menor porte e maior eficiência no mercado automotivo.

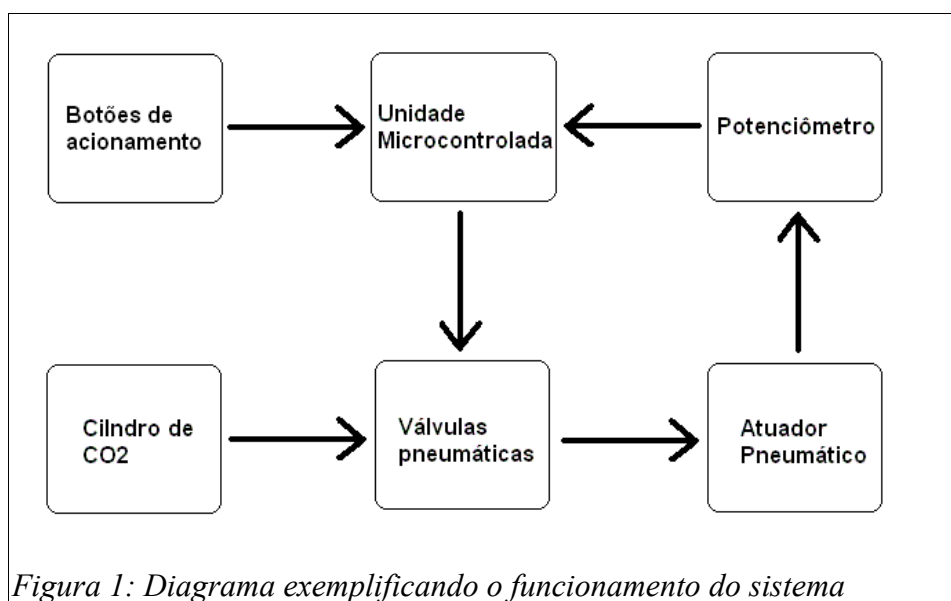
1.4 O sistema de troca de marchas

O motor utilizado pela equipe no protótipo E-5 é fabricado pela Honda e utilizado em seus modelos Hornet CB600, e, como é usual neste tipo de motor, a troca de marchas se dá com o simples movimentar de uma alavanca para frente ou para trás. Este movimento aciona um engenhoso sistema mecânico que rotaciona o eixo seletor de marchas para a posição desejada e retorna a alavanca para sua posição central. O mecanismo básico pode ser mais bem compreendido observando-se as figuras 1, 2 e 3 no item 5.

O atual sistema de troca de marchas do protótipo E-5 é eletro-pneumático, constituído de um atuador pneumático bidirecional, um cilindro de CO₂ comprimido, duas válvulas solenóides que controlam o fluxo de ar para o atuador, botões de acionamento, uma central de controle microcontrolada, capaz de se comunicar com o sistema de controle de injeção eletrônica do motor, e por fim, um potenciômetro que detecta a posição do eixo seletor de marchas.

Quando um botão é pressionado, o sinal é microprocessado e o sistema define se o atuador realizará o movimento da alavanca do cilindro seletor de marchas para frente ou para trás, baseando-se na posição do potenciômetro. Em seguida, um sinal é enviado para a central de injeção eletrônica do motor para desativar as velas de modo que durante a troca de marcha não haja combustão e o piloto não precise utilizar a embreagem. Então uma das válvulas solenóides é acionada, liberando CO₂ comprimido para uma das entradas do atuador pneumático bidirecional. Esse movimento impulsiona a alavanca que gira o eixo seletor de marchas dentro do motor e posiciona as respectivas engrenagens. Assim que a troca de marcha é detectada, ou seja, o eixo seletor de marchas assume uma nova posição e movimenta o potenciômetro, o sistema desativa o

atuador, caso isto não ocorra, ele é desativado após 500ms. Para detectar o momento exato da troca e a posição do eixo seletor de marchas, o sistema é realimentado por um potenciômetro que gira acoplado ao eixo. Para cada marcha engatada o potenciômetro se encontra em uma posição determinada, sempre a mesma para cada marcha. O tempo de troca de marcha com esse sistema é de aproximadamente 300ms. A figura 1 ilustra este funcionamento na forma de diagrama de blocos.



1.5 O trabalho do atuador

O movimento realizado pelo atuador é relativamente simples: 30mm de excursão para frente ou para trás, com uma força suficiente para movimentar a alavanca do eixo seletor de marchas. O eixo seletor de marchas é um cilindro no qual uma das pontas em formato de estrela em conjunto com uma forte mola permitem seu posicionamento em 6 posições fixas. A mola fica em repouso nos vales, entre duas pontas da estrela. O atuador realiza um movimento para frente ou para trás, com um braço de alavanca que gira o eixo. Para que isso ocorra é necessário vencer a força da mola até que esta repouse novamente no vale seguinte, perfazendo um movimento de 36 graus. Ao girar, os sulcos no eixo seletor, onde repousam parte de um conjunto de garfos, forçam os mesmos a deslocar-se horizontalmente e levar engrenagens a posições determinadas. Na figura 2, podemos observar o eixo seletor de marchas com os entalhes que guiam os garfos para posicionar as engrenagens. A figura 3 mostra o eixo explodido e a estrela na ponta, onde repousa a mola. A figura 4 permite uma vista frontal do eixo, onde aparecem a estrela e o braço de deslocamento que se apóia na estrela. A figura 5 mostra as engrenagens, os garfos e o eixo

seletor de marchas.



Figura 2: Eixo seletor de marchas.



Figura 3: Eixo seletor, mostrando a ponta estrelada e a mola.

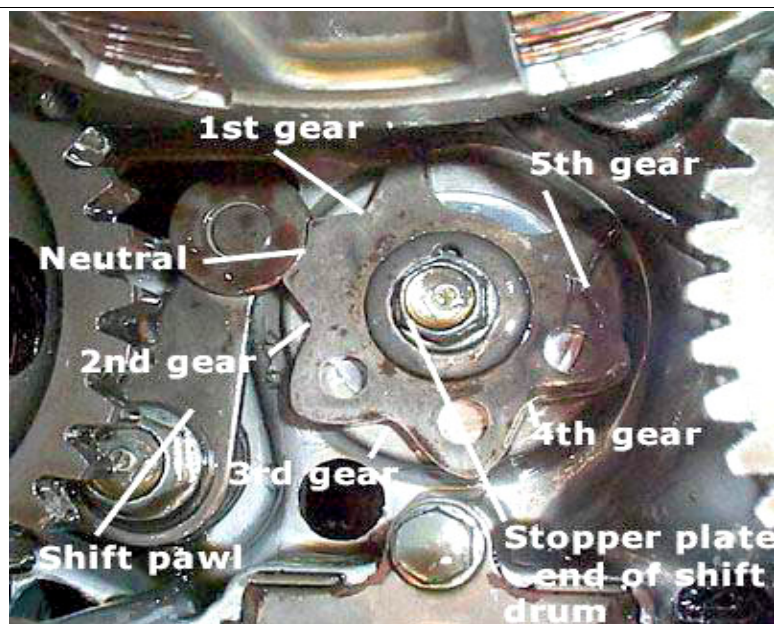


Figura 4: Ponta em formato de estrela e a mola em um dos vales, correspondente à marcha neutra.

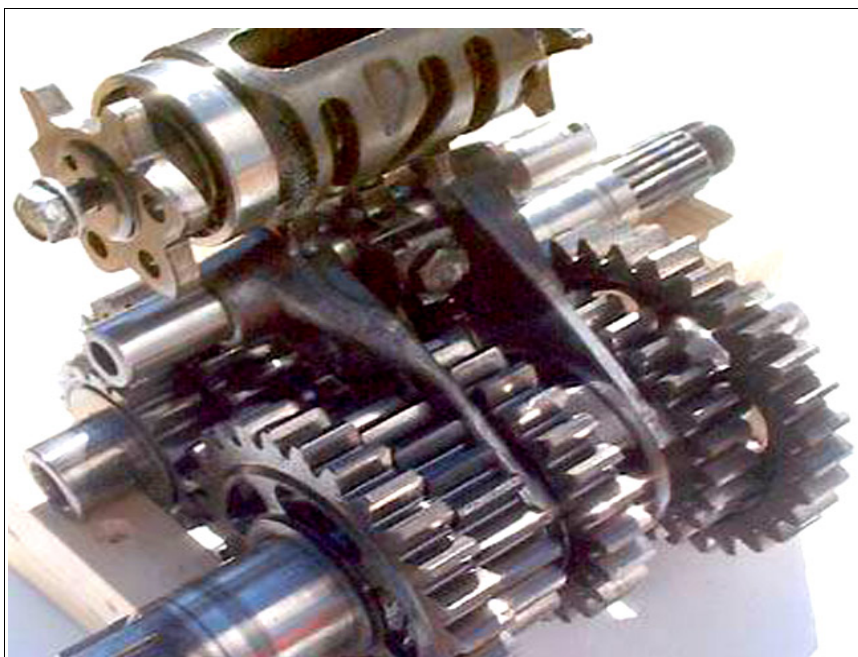


Figura 5: Eixo seletor de marcha, garfos movimentados por ele ao girar e engrenagens deslocadas neste movimento.

1.5.1 Vantagens desse sistema

A eficiência e o baixo tempo de resposta do sistema foram responsáveis pelo novo recorde na prova de aceleração da competição brasileira. A autonomia foi comprovada em testes e a carga do cilindro de CO₂ utilizado é suficiente para durar mais do que a competição exige.

1.5.2 Desvantagens desse sistema

O sistema é uma adaptação com cilindros de CO₂ utilizados em *paintball* e conexões, tubulações e atuador encontrados na indústria. No veículo, a vibração, o calor, a dinâmica do carro em constante movimento, aceleração e desaceleração, tornam o ambiente hostil e o gasto com manutenção aumenta. As vedações devem ser sempre verificadas e sua vida útil, assim como a das válvulas, diminui. Outra desvantagem é a recarga periódica de CO₂ necessária.

1.6 Alternativas

Em vista das desvantagens apresentadas, foram estudados outros tipos de sistema,

notadamente os elétricos, baseados em solenóide e motores CC. As duas alternativas sem dúvida cumpriam o papel como atuador, mas seria fundamental igualar o desempenho ao do sistema atual. Consultando publicações disponíveis sobre o assunto, foi escolhido o método solenóide.

1.6.1 Solenóides

A força produzida por solenóides convencionais é uma força de atração exercida através do entreferro. Portanto, é mais fraca no começo do movimento, quando o entreferro é maior. Contudo, nas últimas décadas, novas tecnologias possibilitaram a fabricação de ímãs permanentes poderosos de dimensões reduzidas. Uma recente categoria de atuadores que utiliza a força de repulsão que uma bobina estacionária energizada produz em um ímã deste tipo pode prover altas acelerações iniciais, mesmo quando a excursão desejada é relativamente grande [4].

1.7 Ímãs de Neodímio

Ímãs de terras raras vêm sendo largamente aplicados na indústria, podendo ser encontrados em atuadores [5], discos-rígidos, motores, etc. Seu desempenho pode ser medido pelo ponto mais alto do segundo quadrante do laço de histerese $B \times H$, denominado produto energético e é muito alto neste tipo de ímã, o que o torna ideal para aplicações que necessitam de um campo intenso e volume e massa mínimos. Os ímãs de NdFeB são os mais fortes encontrados no mercado, apresentam densidade de fluxo 1,6 T, e resistem a temperaturas da ordem de 80 a 120 °C antes de perderem suas características magnéticas. Os ímãs de SmCo resistem a temperaturas muito mais altas, porém são mais caros e oferecem menor densidade de fluxo magnético, em torno de 1,4 T.

2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de atuador linear elétrico capaz de operar as trocas de marcha automatizadas de um veículo de competição da categoria Fórmula SAE para avaliar a viabilidade deste tipo de dispositivo em relação a seu equivalente pneumático. Por meio do projeto, aprofundar o conhecimento nos conceitos envolvidos, bem como nas etapas e ferramentas do processo de desenvolvimento de um produto na indústria.

O atuador funcionará em conjunto com o sistema de controle já implementado, sendo necessárias, apenas, pequenas alterações em *software* e um módulo de potência com entradas compatíveis com os níveis de tensão do microcontrolador para acionar o circuito.

3 Revisão Bibliográfica

As três publicações estudadas abordam o tema das transmissões manuais automatizadas (*automated manual transmissions* ou AMTs), sob três diferentes aspectos: A referência [1] apresenta um projeto e desenvolvimento de um protótipo de atuador linear elétrico para aplicação em sistemas de AMTs. A referência [2], descreve os principais tipos de tecnologias e atuadores lineares utilizados neste tipo de transmissão, suas vantagens e desvantagens. A referência [3] propõe e aplica uma metodologia de avaliação das AMTs em veículos de diferentes categorias que circulam pela Europa.

A publicação [1] destaca primeiramente as vantagens dos atuadores eletromecânicos sobre os hidráulicos e pneumáticos, como a construção e manutenção simplificada, menor número de componentes, robustez, a possibilidade de consumo zero quando não atuando, a eliminação de engrenagens e componentes mecânicos adicionais que aumentam a histerese do sistema e a não necessidade de trabalhar com fluidos.

O sistema é dimensionado por meio do estudo da topologia do atuador, tubular por oferecer alta densidade de força e não possuir quinas que pudessem favorecer perda de energia. O ciclo de trabalho, segundo fator levado em conta, é estimado em 3% a partir da simulação de um trajeto urbano padronizado. O objetivo foi minimizar a área de seção transversal da bobina, um dos fatores determinantes na dimensão final do atuador. Supondo uma densidade de corrente contínua de 5 A/mm², a densidade de corrente RMS de pico máxima permitida é de 28,8 A/mm², ou seja, a área da seção da bobina pode ser diminuída em 82% comparada a um atuador de regime contínuo.

Os materiais foram selecionados de modo a minimizar a massa do atuador sem comprometer as propriedades magnéticas do sistema. Assim, ímãs permanentes de NdFeB foram escolhidos para compor o núcleo móvel. O resto do sistema utilizou aço com baixo teor de carbono. A partir daí tem início um processo iterativo que inclui análise em *software* de elementos finitos para eletromagnetismo. O trabalho é concluído com a construção e testes dinâmicos e estáticos de um protótipo na bancada, com resultados positivos, alcançando 1kN de força e 16 mm de excursão, e ilustra uma sequência lógica de projeto que serviu de guia para este presente trabalho.

A referência [2] é um estudo comparativo das tecnologias de atuadores eletromecânicos atualmente utilizados nas AMTs :

- **Mecanismos rotativos: motores CC com escovas e sem escovas**

Motores com escovas são mais baratos, mas não produzem torque elevado, apresentam maior inércia e menor eficiência do que motores sem escovas.

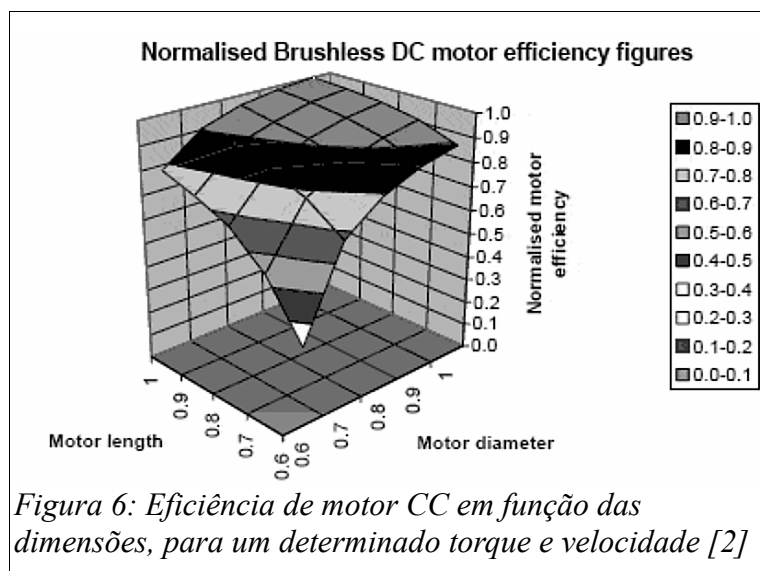
- **Mecanismos lineares: solenóides, atuadores de bobina móvel, atuadores com ímãs permanentes móveis**

Nos solenóides comuns, a força produzida tem natureza não linear em função do entreferro, o que dificulta o controle do dispositivo. Atuadores de bobina móvel oferecem resposta muito rápida, porém a força de saída é limitada pelas características físicas da bobina. Atuadores com ímãs móveis são mais robustos e sofrem poucas perdas elétricas, no entanto ambientes com temperaturas elevadas podem desmagnetizar os ímãs.

O artigo [2] sugere ainda diferentes tipos de amplificação de força para tais dispositivos eletromecânicos:

- Alavancas simples
- Engrenagens
- Cilindro eletrohidráulico

Um projeto é desenvolvido e avaliado, empregando um motor CC sem escovas como atuador. Os resultados, como mostra a figura 6, indicam que tais máquinas se tornam menos eficientes quanto menor seu volume, já que a área disponível para bobinas e laminações é menor, o que obriga os condutores a operarem com maior corrente e aumenta as perdas elétricas no cobre e magnéticas no material ferroso. Apesar da alta eficiência dos atuadores eletromecânicos, as baixas tensões de alimentação disponíveis nos veículos e a alta densidade de potência requerida resultam em dispositivos relativamente grandes.



No estudo realizado em [3], seis diferentes categorias de veículos como esporte, utilitário e popular, empregando tecnologias de AMT diversas são submetidos a várias condições de carga, terreno e partida. Variáveis físicas como o tempo de troca de marcha, são contrastadas com variáveis subjetivas como o custo e conforto do sistema para criar uma métrica de qualidade de troca de marchas em AMTs.

Dentre os resultados de [3] relevantes para este trabalho, destacam-se a maior velocidade de troca observada para o único sistema eletromecânico avaliado em relação aos outros e a possibilidade de priorizar o desempenho em detrimento do conforto em um carro esporte no qual o consumidor paga pelo desempenho. Ainda assim, os índices atingidos na medida de conforto no sistema foram de 80%. Apesar de o modelo de veículo que possuía o atuador eletromecânico ser o mais caro dentre os testados, o valor do sistema como item opcional do veículo é o segundo menor, ou seja, o sistema não representa um acréscimo significativo no preço final do veículo. Por ser uma tecnologia recente, não está presente em muitos modelos, mesmo nos países europeus.

Os requisitos de energia consumida no protótipo desenvolvido em [1] excedem em muito os permitidos neste trabalho, porém a força desenvolvida pelo atuador também deve ser pelo menos dez vezes menor e por isso a publicação serviu de base para este projeto. Optou-se pela seguinte sequência de desenvolvimento: adotar restrições de dimensão para o protótipo, baseadas no espaço físico livre no veículo e em componentes disponíveis no mercado; examinar materiais acessíveis com propriedades magnéticas adequadas e então, dentro destas limitações, obter a maior força possível no pistão. Vale ressaltar que como em [1], na qual a aplicação do dispositivo é semelhante à proposta neste trabalho, há a necessidade do atuador se manter em uma posição de equilíbrio sem consumir energia, quando alguma marcha estiver engatada. No entanto, o sistema mecânico da caixa de câmbio possui poderosas molas de retorno, que mantêm o atuador na posição necessária, não havendo necessidade de executar este controle de outra maneira.

Após analisadas as publicações e suas referências bibliográficas, foi possível concluir que é viável o desenvolvimento de um atuador elétrico linear utilizando ímãs modernos e auxílio da computação para refinar estimativas baseadas em restrições mecânicas ou elétricas definidas para o projeto.

4 Dimensionamento e Especificações de Projeto

4.1 Projeto mecânico

De acordo com as publicações estudadas, a topologia tubular com um pistão e ímãs permanentes oferece a mais alta densidade de força dentre diferentes tipos de atuador linear com ímã permanente investigados [3],[4]. O formato tubular evita perdas de fluxo por quinas ou pontas tanto no corpo do atuador como na bobina. No entanto, há dificuldade em se laminar dispositivos tubulares e uma carcaça maciça pode influenciar a resposta dinâmica do atuador e gerar perdas por correntes parasitas[3], [5].

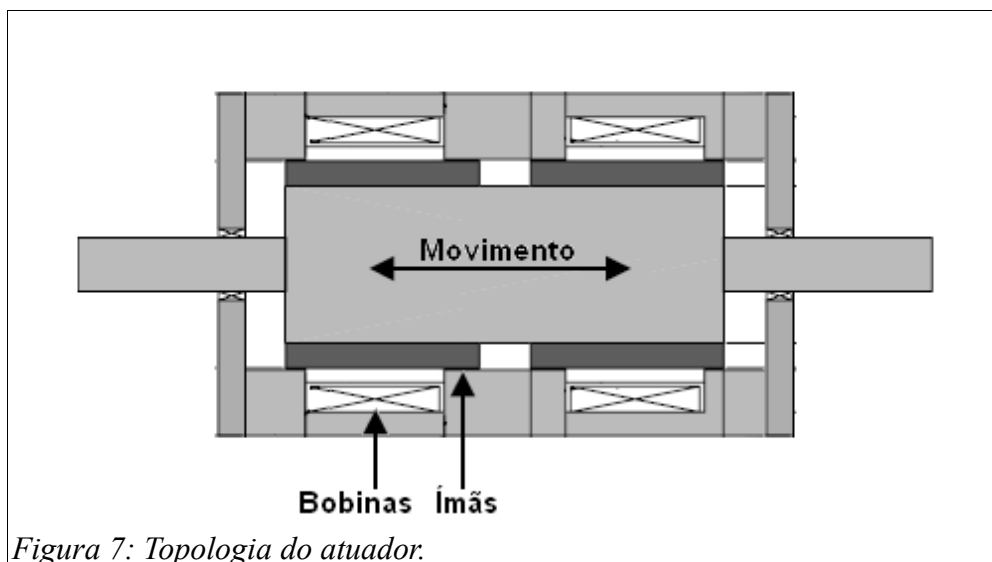
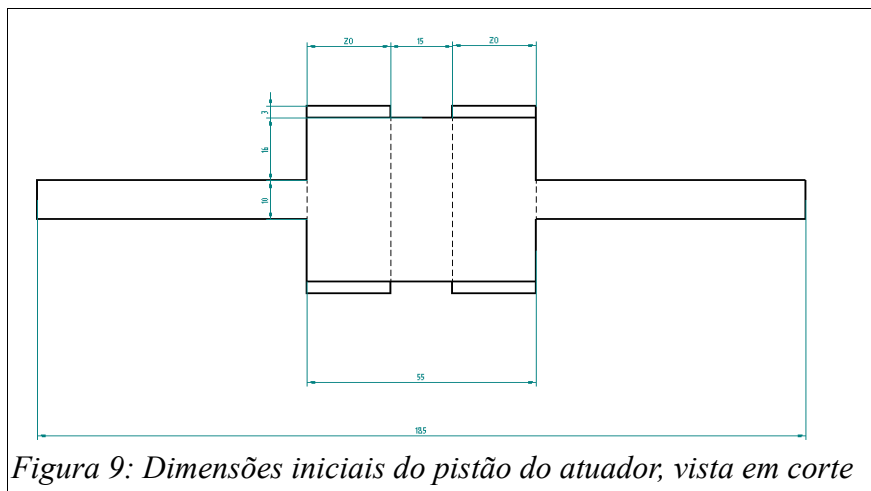
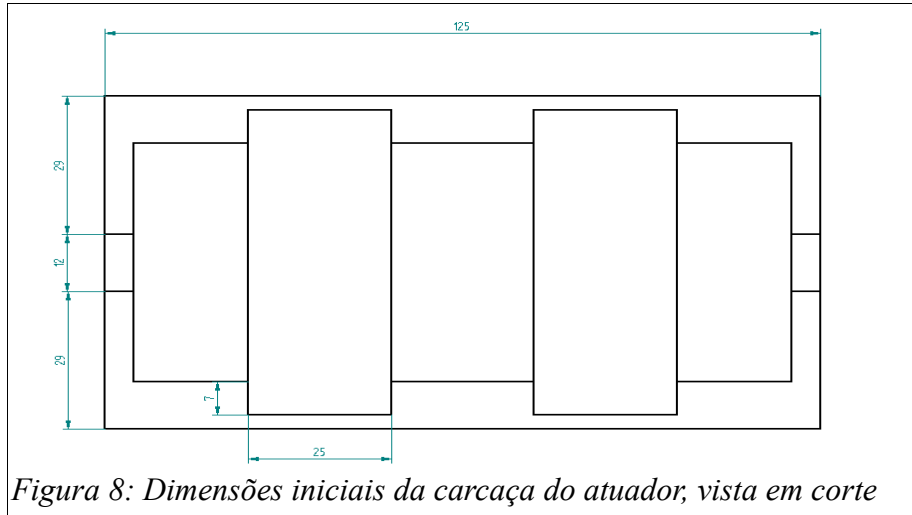


Figura 7: Topologia do atuador.

O dimensionamento deste primeiro protótipo teve como base as restrições de espaço disponível no veículo, ou seja, um volume de 125mm x 150mm x 280mm. Dentro destas limitações, os ímãs toroidais de NdFeB disponíveis no mercado representam outra restrição. Com base no volume disponível, definiu-se que os ímãs poderiam ter comprimento entre 20 e 60mm e diâmetro externo de 40 a 70mm. O tamanho encontrado mais adequado foi de 20mm de comprimento, com diâmetro externo de 48mm e interno de 42mm, o que restringiu diretamente as dimensões do pistão e indiretamente as da carcaça e da bobina.

Definidas as dimensões do ímã e o curso de 30mm do atuador, o pistão foi dimensionado de modo a acomodar os ímãs, permitir o movimento de 30mm para cada lado e minimizar o entreferro. Em seguida foi possível obter as dimensões internas da carcaça, que deve levar em conta o curso do pistão e, ao mesmo tempo, oferecer um entreferro mínimo para o fluxo magnético. O comprimento das bobinas foi, então, calculado de modo a ocupar simetricamente o maior espaço restante possível, obedecendo a restrição de tamanho inicial.

Os entreferros entre o pistão e a carcaça e entre o eixo e a carcaça são de 1 mm, suficiente para não comprometer a eficiência eletromagnética do sistema, acomodar a bucha sobre a qual deslizará o eixo do pistão e não exigir tolerância excessiva que dificultaria a usinagem das peças. O primeiro resultado deste dimensionamento pode ser visto nas figuras 8 e 9.

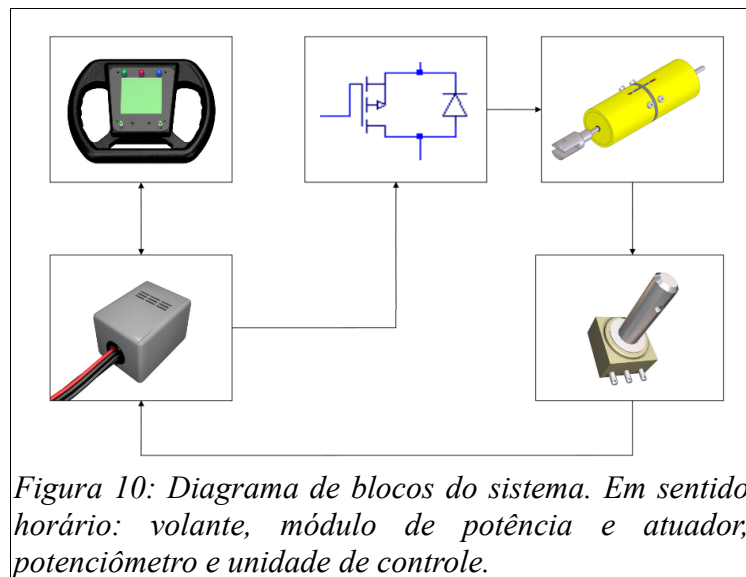


O atuador pneumático em operação no veículo atualmente trabalha a uma pressão de 6 bar, com uma excursão de 15 mm para frente ou para trás, produzindo uma força de 121 N em um alavanca de 50 mm. O torque gerado no eixo, produto da força pelo braço da alavanca é de 6,05 N.m. Estes parâmetros foram utilizados posteriormente como referência nas simulações em computador.

4.2 Projeto Elétrico

A operação do atuador requer que este seja acionado em um evento de troca de marchas

durante cerca de 500ms em um dos dois sentidos, de modo a subir ou descer a marcha de acordo com a vontade do piloto. Para isso, o sistema possui uma unidade de controle microcontrolada. Há dois botões no volante, um para subir a marcha, outro para descer. A unidade de controle ao receber o comando do botão, verifica o nível de tensão do potenciômetro acoplado ao eixo seletor de marchas por meio do conversor AD do microcontrolador. Comparando este valor com uma tabela de referência no *software*, o sistema identifica a marcha atual, envia um sinal para a central de injeção eletrônica para que esta corte a explosão no motor e aciona o módulo de potência do atuador enviando um pulso aos fotoacopladores que por sua vez acionam os *MOSFETs* de potência, liberando o fluxo de corrente nas bobinas, de modo a movimentar o atuador no sentido correspondente. O movimento do eixo é detectado pelo já mencionado potenciômetro, evento que cessa o pulso de acionamento do atuador.



O ponto chave para a viabilidade de um sistema elétrico no veículo é o consumo de energia e o módulo de potência do atuador é o fator dominante no consumo do sistema. A fonte de energia que alimenta todo o veículo é uma bateria de motocicleta, com capacidade de 14Ah. A tensão de saída em seus terminais é de 12 V, portanto a potência consumida pelo sistema é diretamente proporcional à corrente consumida. Os demais sistemas elétricos do veículo em operação em sua condição mais crítica consomem 25,79 A ao passo que o alternador fornece 36,08 A, o que significa que aproximadamente 10 A estariam disponíveis para alimentar continuamente outros sistemas sem que a bateria fosse descarregada. Dessa maneira, uma corrente de até 5 A ou seja, uma potência de até 60 W contínua foi estabelecida como limitante para o projeto.

O módulo de potência do atuador opera com excitação CC aplicada esporadicamente nos eventos de troca de marcha, na forma de um pulso com duração aproximada de 200 a 500 ms, o

que faz a limitação adotada segura. Além disso, nestas condições, a perda por correntes parasitas ou induzidas no material do núcleo ou carcaça são irrelevantes, não sendo necessário utilizar material laminado nestas peças [1].

4.2.1 Circuito magnético

Uma aproximação pode ser utilizada como ponto de partida para definirmos alguns parâmetros de projeto. A aproximação a seguir é válida se ignorarmos a presença dos ímãs. Podemos considerar que toda a energia magnética do circuito é armazenada no entreferro, desconsiderar o efeito da saturação magnética no aço [6] [2] e calcular a força exercida pelo atuador em função da corrente, com as seguintes equações aplicadas no circuito da figura 11:

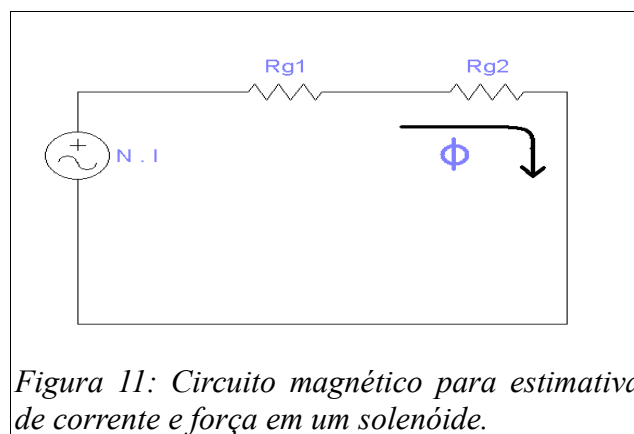
Lei de Ohm:

$$(N \cdot I) = (R_{g1} + R_{g2}) \cdot \Phi$$

Força na direção de atuação:

$$F = \frac{(N \cdot I)^2 \mu_0}{2} \cdot \left(\frac{A_{g1}}{l_{g1}^2} + \frac{A_{g2}}{l_{g2}^2} \right)$$

Nas quais: N é o número de espiras da bobina, I é a corrente de excitação, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, R_{g1} e R_{g2} são as relutâncias dos entreferros 1 e 2, respectivamente, Φ é o fluxo magnético, A_{g1} , A_{g2} , l_{g1} e l_{g2} são as áreas e comprimentos dos respectivos entreferros.



A formulação é válida, no entanto, apenas para solenóides convencionais que se utilizam da força de atração em um entreferro. O caso com ímãs permanentes móveis e uma combinação

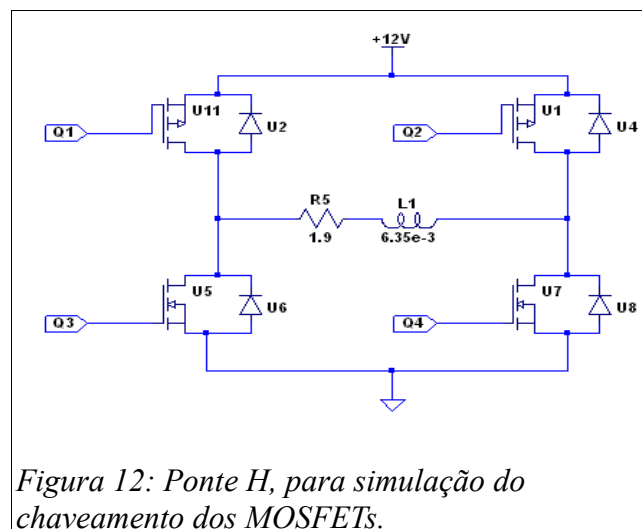
de forças de repulsão nos ímãs e atração no entreferro é muito mais complexo e requer solução numérica. O método de elementos finitos pode ser útil para fornecer soluções estáticas para diferentes posições do êmbolo e correntes de excitação nas bobinas [5].

4.2.2 Circuito de acionamento e potência

O circuito de acionamento mais adequado para este tipo de aplicação é a topologia em “ponte H”, com *MOSFETs* de potência, que possibilita o fluxo de corrente nos dois sentidos na carga e consome quantidade ínfima de energia em seus componentes em relação ao circuito equivalente utilizando TBJs, devido à sua altíssima impedância de entrada e à baixa resistência equivalente em operação: R_{dsON} [1] [5].

O modelo na figura 12 foi simulado no SPICE e implementado através do *software* “*Switcher Cad III*” da empresa Linear Technology, oferecido gratuitamente na *internet*, indicado pelo professor Paulo Roberto Veronese aos alunos do curso de circuitos eletrônicos oferecido por este Departamento. A carga, composta pela resistência R5, de 1.9 ohms e indutância L1, de 6,3 mH ligadas em série foi calculada aproximadamente, para a bobina dimensionada com 300 espiras. O circuito foi simulado com a carga ligada diretamente aos terminais da ponte para verificar sua operação na condição crítica, porém na aplicação real, pode haver a necessidade de um elemento resistivo em série com a carga a fim de limitar a corrente. Há uma etapa de interface com fotoacopladores para isolar o circuito de potência dos circuitos lógicos de controle e possibilitar o acionamento via microcontrolador.

Os transistores utilizados foram IRF3205 canal N, que fornece até 110 A com $R_{dsOn} = 8$ mohm e IRF4905 canal P, que fornece até 74 A e possui $R_{dsON} = 20$ mohm, de acordo com *datasheet* do fabricante [7]. Os fotoacopladores são PC817 da Philips, por já serem utilizados em algumas placas de circuito do veículo, com bons resultados.



A figura 13 mostra o circuito de potência completo e a figura 14 um *layout* para a placa de circuito impresso, onde pode-se observar as trilhas grossas pelas quais circula a corrente que alimenta as bobinas, da ordem de alguns amperes. O esquema elétrico e o projeto da placa foram realizados no *software* Altium Designer 6, antigo Protel.

Devido às altas correntes envolvidas, optou-se por 2 módulos de potência, um para cada bobina. O que adiciona a vantagem da possibilidade de controlar as bobinas individualmente, caso haja necessidade de um ajuste fino no movimento.

Os fotoacopladores foram arranjados de modo que as entradas A1 e A4 fossem acionadas juntas, colocando os transistores nas entradas Q1 e Q4 em condução. Os transistores controlados pela entradas Q2 e Q3 trabalham de maneira análoga, sendo acionados por A2 e A3. Os *MOSFETs* de canal P são acionados com tensão próxima de 0,15 V e os de canal N com aproximadamente 11,8 V.

Um pulso de 500 ms foi utilizado para acionar o circuito na simulação, na bancada foi utilizado primeiramente um monoestável baseado no circuito integrado 555 e posteriormente um microcontrolador *Freescall* HCS908, o mesmo do sistema presente no veículo. Podemos observar na figura 15 que durante o acionamento de Q2 e Q3 a corrente na carga vai para aproximadamente 5,0 A e se mantém neste nível durante o pulso de acionamento.

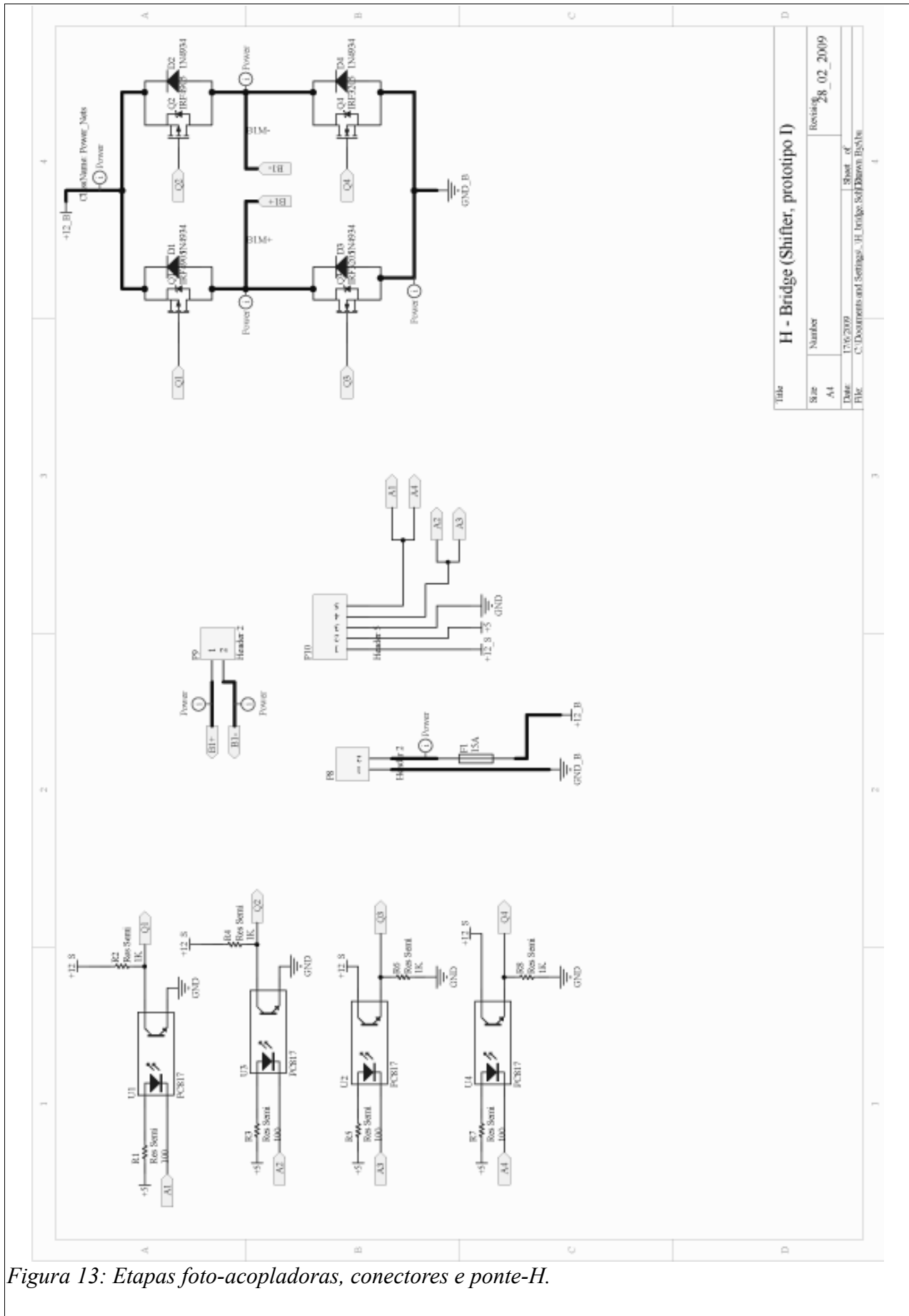


Figura 13: Etapas foto-acopladoras, conectores e ponte-H.

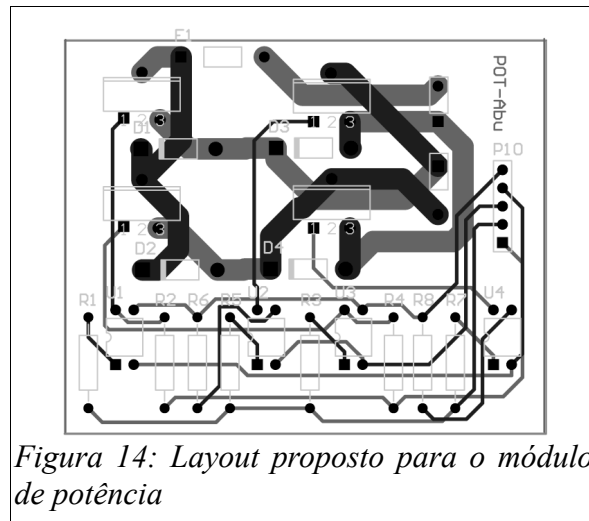


Figura 14: Layout proposto para o módulo de potência

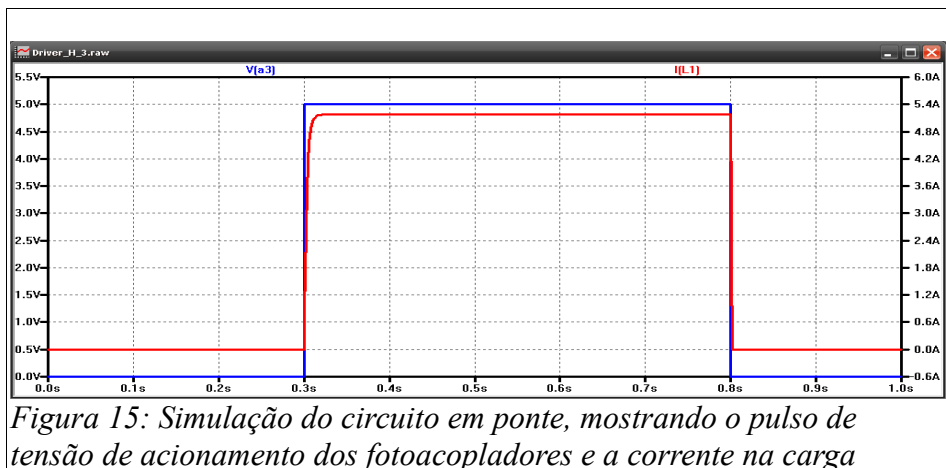
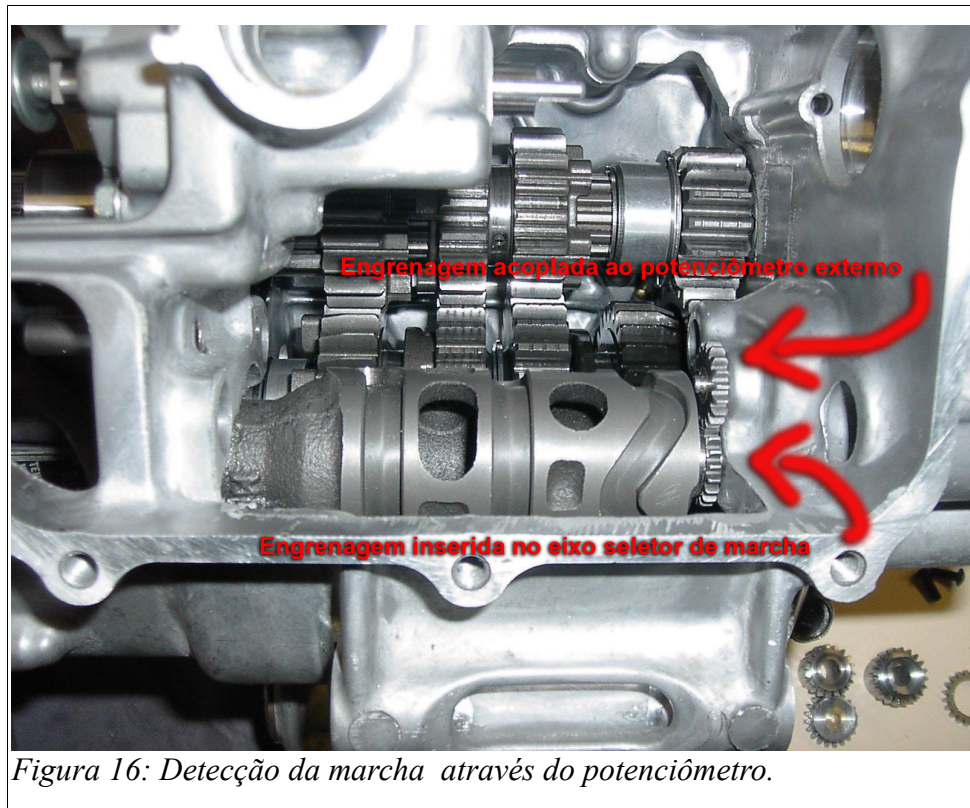


Figura 15: Simulação do circuito em ponte, mostrando o pulso de tensão de acionamento dos fotoacopladores e a corrente na carga

4.2.3 Módulo de controle

A lógica e o circuito de controle têm como principal componente um microcontrolador *Freescale* da família HCS08 e um potenciômetro acoplado ao eixo seletor de marchas, mostrado na figura 16. A cada marcha, o eixo seletor encontra-se em uma posição determinada, pois gira 36 graus para frente ou para trás a cada troca. Assim, para detecção, o potenciômetro fornece uma tensão específica para cada marcha, que é comparada a valores de uma tabela no *software*. O potenciômetro também controla o tempo de acionamento do atuador. O sinal de atuação é enviado, um temporizador é iniciado e o potenciômetro lido constantemente no conversor analógico-digital, incluído no microcontrolador. Logo que uma mudança no valor de tensão é detectada, indicando que houve movimento do eixo e a marcha foi trocada, o atuador é desligado. Caso isso não ocorra dentro de 500ms, o temporizador atinge seu valor limite e encerra a rotina,

desligando o atuador.



No esquema elétrico da figura 17, a seguir, a única alteração necessária para adaptar o sistema atual de controle ao novo atuador é a eliminação do bloco com as válvulas solenóides e conexão das saídas “PTB#5 1” e “PTB#6 1” às entradas A1, A3 e A2, A4 nos fotoacopladores no circuito da figura 13.

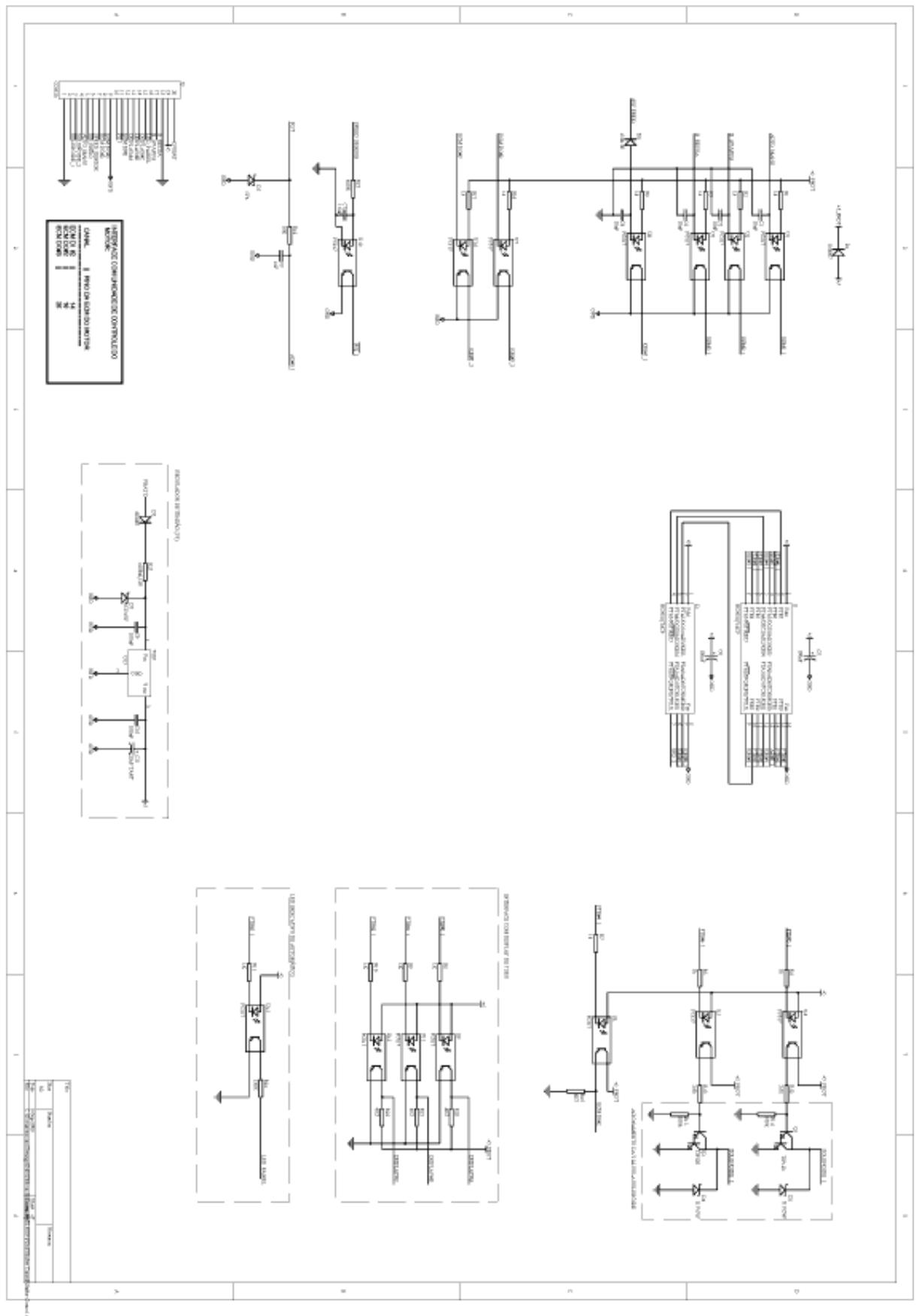


Figura 17: Esquemático da unidade de controle.

Nas figuras 17 e 18, percebe-se uma grande quantidade de fotoacopladores, pois foram utilizados para isolar e adequar à lógica TTL praticamente todas as entradas e saídas do circuito.

Além do módulo de potência, o sistema também se comunica com a central de controle de injeção eletrônica do motor, de onde adquire a informação de velocidade angular em RPM, e envia um sinal para a mesma cortar a ignição enquanto ocorre a troca de marcha, eliminando a necessidade do piloto utilizar a embreagem.

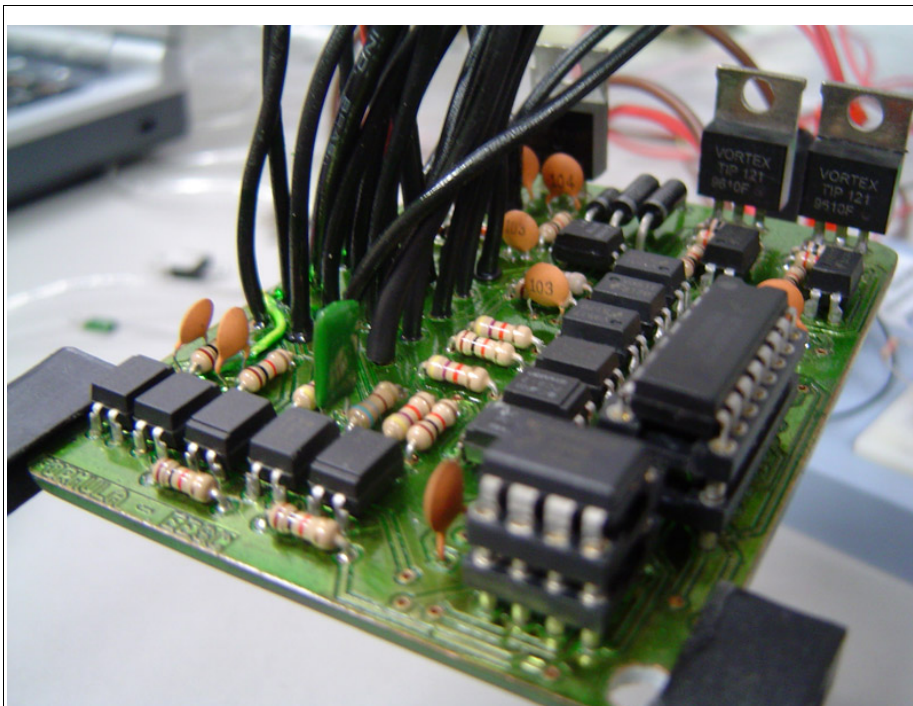


Figura 18: Unidade de controle com microcontrolador e fotoacopladores em evidência .

4.2.4 Software de controle

O *software* de controle foi escrito em linguagem C, e implementado no ambiente *CodeWarrior* da *Freescale*, fornecido no site do fabricante do microcontrolador. Ele se baseia no microcontrolador HCS08, de 8 bits . A cada toque no botão de avançar ou recuar marchas, reconhecidos através de uma interrupção, o microcontrolador determina a marcha atual através da posição do potenciômetro lida no conversor AD, comparando-a com uma tabela de valores. Se o botão pressionado for o de recuar, o atuador é acionado para trás, caso contrário para frente. O movimento cessa quando há mudança no valor do potenciômetro ou após 500ms, o que ocorrer primeiro. A marcha atual é informada ao piloto por meio de um *display* LCD. Algumas condições são analisadas para permitir a troca, como por exemplo, o atuador não é acionado para recuar se a marcha atual já é a menor possível. Enquanto o atuador é acionado, uma das portas do microcontrolador, que está conectada à central de injeção eletrônica, é mantida em nível alto e

não há combustão no motor durante este intervalo, eliminando a resistência para a marcha entrar. As leituras no conversor AD não são feitas diretamente. Um ciclo de amostragem e conversão é realizado e o valor do conversor lido no *buffer* do canal de aquisição. Este procedimento se repete cinco vezes, os valores são acumulados em uma variável e o resultado considerado é a média das cinco medidas efetuadas, a fim de minimizar o efeito de ruído. Esta rotina de leitura pode ser vista na figura 19.

```

/***** Rotina le_pot *****/
unsigned int le_pot(void)
{
    unsigned int valor_CH0;
    unsigned char numero_leituras;

    valor_CH0 = 0;
    numero_leituras = 0;
    while(numero_leituras < NUM_LEITURAS) // NUM_LEITURAS atualmente = 5;
    {
        //faz leitura do canal 0 do A/D // Inicia amostragem;
        ADSCR &= READ_CH0;

        do
        {
        };
        while(ADSCR_COCO == 0); // Aguarda conversao
        ADSCR |= STOP_ADC; //
        valor_CH0 += ADR; // acumula leituras
        numero_leituras++; // incrementa contador de leituras
    }
    valor_CH0 /= NUM_LEITURAS;
    return(valor_CH0);
} //fim da rotina le_pot
/*****

```

Figura 19: Trecho do programa que faz a leitura do potenciômetro

4.3 Seleção de materiais

4.3.1 Materiais magnéticos moles

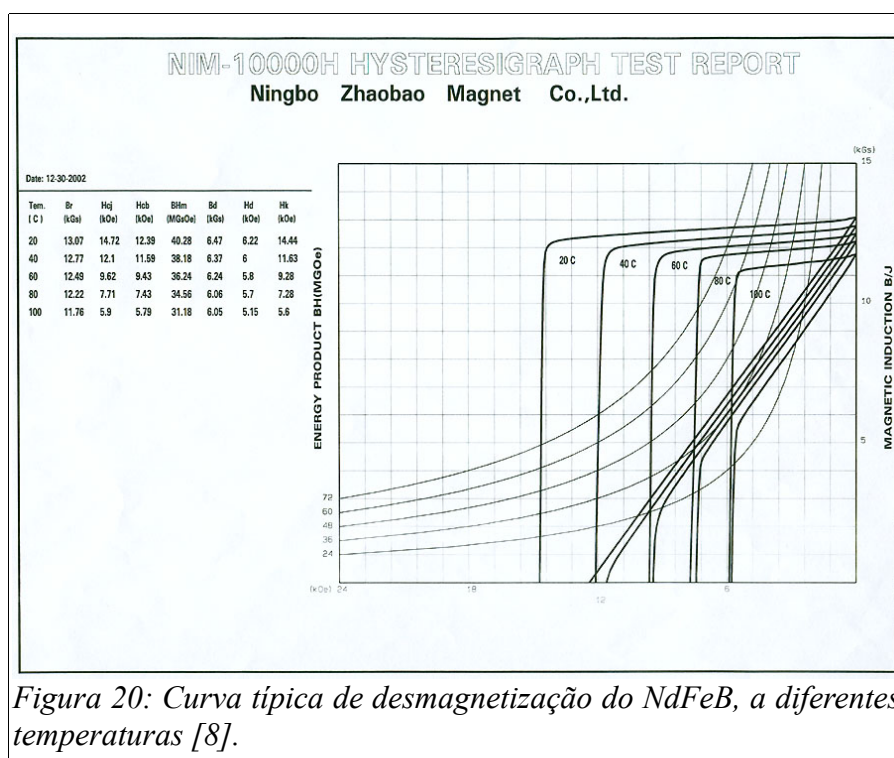
Todos os componentes do atuador com exceção de buchas e elementos de fixação são ao mesmo tempo estruturais e parte do circuito magnético, ou seja, devem apresentar alta permeabilidade relativa com o objetivo de concentrar o fluxo magnético. O aço mais barato e mais facilmente encontrado na indústria com estas propriedades é o SAE 1020, escolhido para compor a carcaça e o pistão do atuador.

A classificação dos aços segundo as normas da SAE (Society of Automotive Engineers - EUA) é a mais utilizada em todo o mundo para aços-carbono (aços sem adição de elementos de liga, além dos que permanecem em sua composição no processo de fabricação) e aços de baixa liga. A classificação SAE é baseada na composição química do aço. A cada composição normalizada pela SAE corresponde uma numeração com 4 ou 5 dígitos. No total são previstas muitas dezenas de classificações. Nelas, os 2 dígitos finais XX indicam os centésimos da porcentagem de C (Carbono) contida no material, podendo variar entre 05, que

corresponde a 0,05% de C, a 95, que corresponde a 0,95%. No caso do aço 1020, são 0,2 % de C e a permeabilidade magnética relativa deste material se encontra na faixa de 1200 a 6000, ou seja, oferece resistência ao fluxo magnético milhares de vezes menos do que o ar.

4.3.2 Ímãs permanentes

Foram estudados os diferentes tipos disponíveis no mercado, como de ferrite, AlNiCo e SmCO, porém os ímãs permanentes mais fortes, indicados em [1], [2], [4] e [5] para aplicações que exigem alta densidade de energia, ou seja, massa e volume mínimos, e por essa razão utilizados no projeto são os de NdFeB. As peças escolhidas para este protótipo têm geometria toroidal, diâmetro interno de 42 mm, externo de 48 mm, comprimento 20 mm e produto energético máximo 42. Essa medida, que pode ser interpretada como a força do ímã, é o ponto mais alto no segundo quadrante da curva de desmagnetização ($B \times H$) do material, como mostra a figura 20.



4.3.3 Buchas

As buchas para deslizamento do eixo foram escolhidas após análise de catálogo sugerido por industrial do ramo de motores, são fabricadas pela empresa IGUS, com material próprio, patenteado, específico para este tipo de aplicação. Não requerem lubrificação, possuem longa vida útil e seu custo é mínimo.

4.4 Simulação Magnetostática – Elementos finitos

Para verificar a distribuição do fluxo magnético no modelo e refinar os resultados da primeira aproximação, o modelo foi desenhado em CAD e simulado estaticamente no *software* ANSYS 11, com o pacote E-MAG, que realiza simulações magnetostáticas no modelo, a partir da geometria e especificações dos materiais. Os dados relativos ao ímã permanente foram retirados da curva de histerese do fabricante dos ímãs de NdFeB. Na figura 21, a maior densidade de fluxo aparece nos dois ímãs e na seção do eixo entre a parede da carcaça e do corpo cilíndrico do pistão, nas cores verde, amarela e vermelha na figura, não ultrapassando 2,3 T. O fluxo se concentra principalmente no eixo do pistão, na cor vermelha, onde há uma menor área de seção transversal. Não é interessante ultrapassarmos o nível de saturação do material ferromagnético pois a partir deste ponto, ele deixa de contribuir para o aumento do fluxo magnético na peça e sua magnetização no sentido oposto fica mais difícil, ou seja, há perda de energia por histerese.

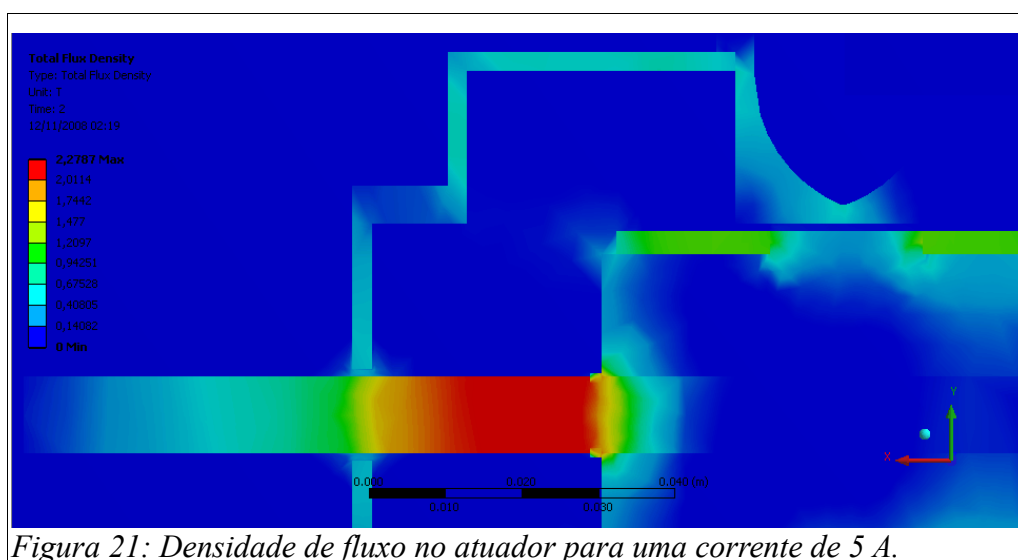


Figura 21: Densidade de fluxo no atuador para uma corrente de 5 A.

5 Construção do protótipo I

5.1 Manufatura das Bobinas

As bobinas foram enroladas manualmente em fio 18 AWG, capaz de suportar correntes de até 10 A, pois apesar da corrente de trabalho ser bem menor e a operação esporádica, o conjunto vai estar sujeito a temperaturas da ordem de 50° C. A confecção foi feita na oficina mecânica do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC USP. Foram utilizados carretéis de PVC e papel isolante entre as camadas da bobina com a função adicional de nivelar a superfície para a próxima camada a ser enrolada. A figura 22 mostra uma bobina antes e depois de enrolada. O diâmetro externo final das bobinas excedeu o esperado e as dimensões finais da carcaça do atuador foram ajustadas de acordo.

Cada bobina possui 13 camadas com 27 espiras cada uma, em média, num total de 313 espiras. As características medidas em laboratório após a manufatura são mostradas na tabela 1 :

Tabela 1: Parâmetros das bobinas construídas.

B1	DC	120 Hz	1 kHz		B2	DC	120 Hz	1 kHz
R	2,1 ohm	16,70 ohm	1,01 kohm		R	1,8 ohm	16,5 ohm	1 kohm
L	-	6,385 mH	6,379 mH		L	-	6,332 mH	6,326 mH
Q	-	3,08	23,9		Q	-	3,07	24,0

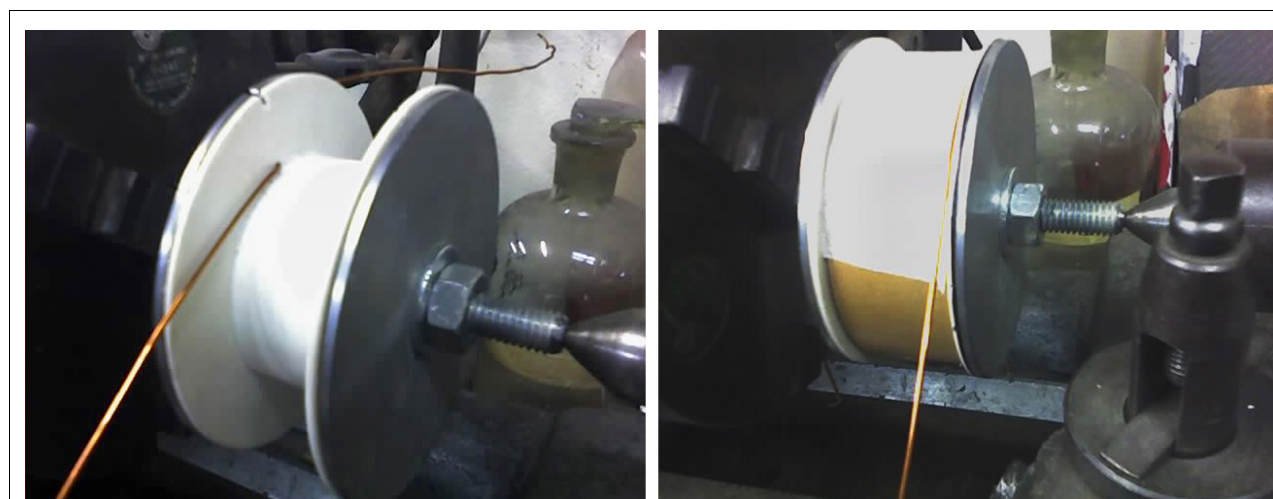


Figura 22: Bobina no início e durante o processo de enrolamento.

5.2 Manufatura de carcaça e pistão

Para maior simplicidade na manufatura, a carcaça do atuador foi dividida em três partes, como na figura 23, de modo a facilitar a colocação das bobinas e a fixação da peça. As partes foram torneadas a partir de um tarugo cilíndrico de aço 1020, na oficina do Departamento. A figura 24 ilustra o processo.

O desenho inicial do pistão também foi modificado para poder acomodar e travar os ímãs, e impedir que estes sofressem impacto no final do curso. A peça foi dividida em duas partes: um corpo cilíndrico vazado para passagem do eixo e o eixo em si, usinado como uma única peça, com o objetivo de facilitar o alinhamento do conjunto montado. O resultado final aparece nas figuras 25, 26 e 27.

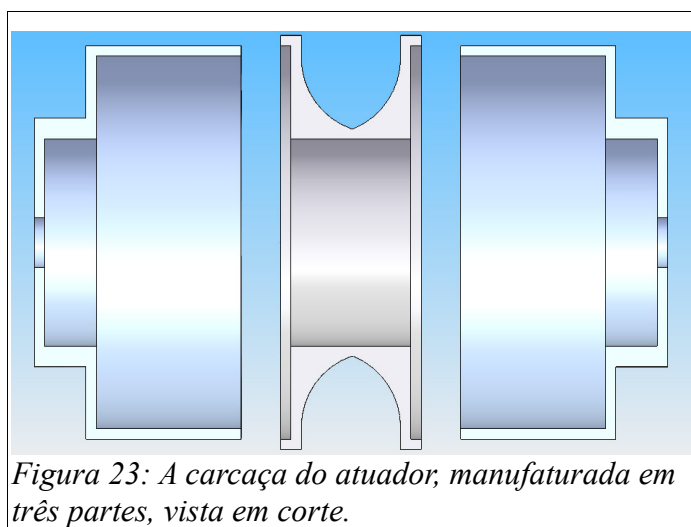


Figura 23: A carcaça do atuador, manufaturada em três partes, vista em corte.

5.3 Montagem do conjunto

Com as peças usinadas, a montagem do protótipo é simples. Primeiramente, as buchas são fixadas nas laterais da carcaça, e em seguida as bobinas são colocadas. Uma das laterais é afixada na parte central da carcaça por quatro parafusos *allen* de 3mm. Os ímãs são colocados no pistão e em seguida o eixo, que é travado com anéis de retenção. O pistão é então colocado no conjunto da parte central da carcaça com uma das laterais. A última lateral com a bobina é afixada à parte central, finalizando a montagem. As figuras 25 e 26 ilustram o procedimento. A figura 27 expõe todos os componentes mecânicos do sistema.

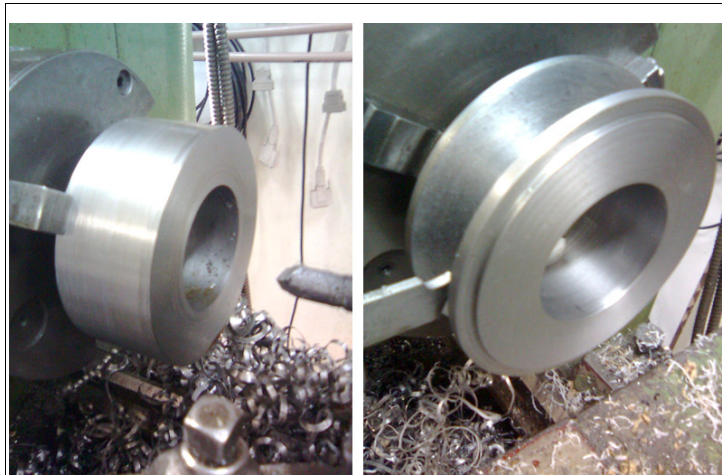


Figura 24: Usinagem da carcaça, parte lateral e central.

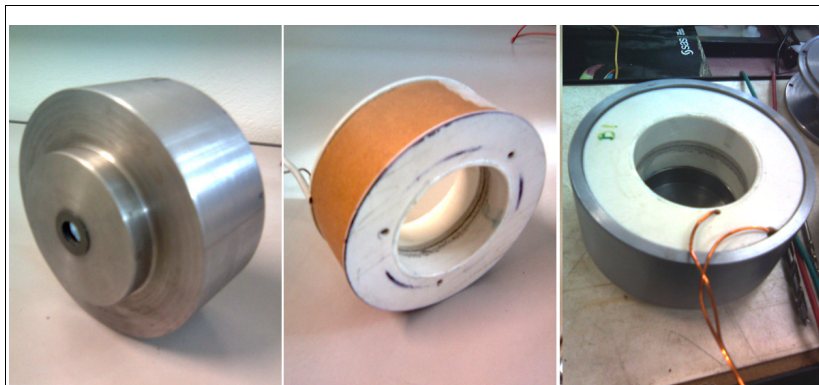


Figura 25: Carcaça lateral e bobina.

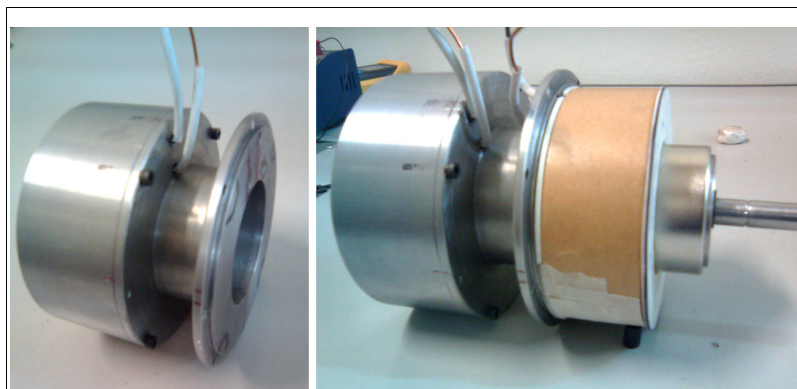


Figura 26: Carcaça lateral e central montadas e após colocação do pistão e da segunda bobina.

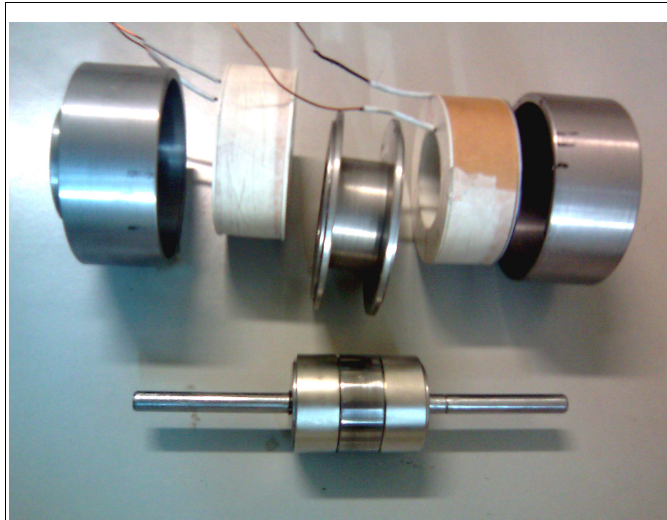


Figura 27: Conjunto desmontado, o pistão já com os ímãs acoplados.

6 Testes e resultados do protótipo I

6.1 Acionamento

O circuito de acionamento, mostrado na figura 28,, foi montado na matriz de contatos com uma ponte H independente para cada bobina com a adição de um temporizador baseado no circuito integrado 555 na sua configuração de monoestável, este acionado por um botão. Após o acionamento, o monoestável gera um pulso de duração de 500ms, condição crítica de acionamento considerada. A figura 29 mostra detalhes do circuito, já com um microcontrolador substituindo os 555.

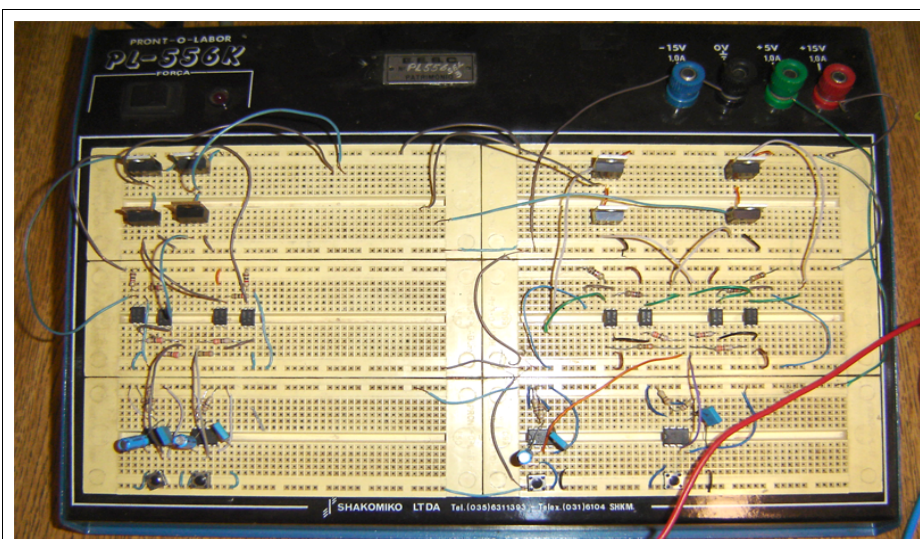


Figura 28: Circuito de acionamento das bobinas.

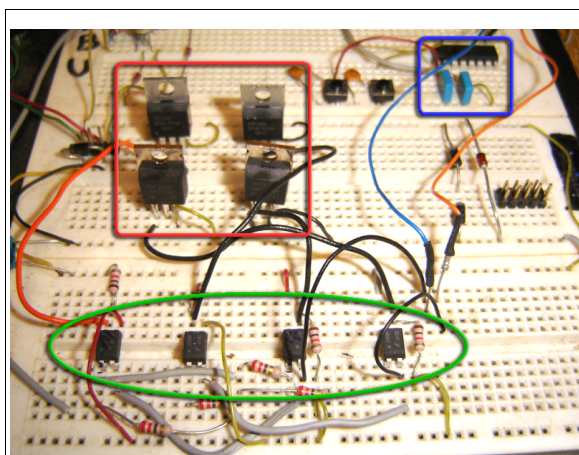


Figura 29: Detalhes do circuito: fotoacopladores em verde, MOSFETs em vermelho, e o microcontrolador em azul.

6.2 Atuador

O atuador foi montado sobre uma calha de alumínio com as extremidades de seu eixo presas com molas às extremidades da calha, mantendo-o em posição neutra. Ao acionar o solenóide, o movimento do pistão traciona uma das molas, que o traz de volta à sua posição neutra. No veículo, um conjunto de acionamento e uma forte mola presentes no interior do motor exercem esta função.

6.3 Procedimento

O circuito de acionamento foi alimentado por uma fonte de bancada capaz de fornecer 3 A . Uma resistência R foi colocada em série com a bobina e variada de modo que o solenóide fosse acionado com valores de correntes diversos. Através da medida de tensão em R, efetuada no osciloscópio por se tratar de um intervalo de apenas 500 ms, a corrente na bobina foi calculada.

O teste teve início com o pistão livre, sem molas. O atuador foi capaz de realizar o movimento somente com a corrente acima de 1,4 A . Com o atuador preso às molas, e utilizando o valor máximo de corrente suportado pela fonte, 3 A, como pode ser visto na figura 30, o movimento foi satisfatório, e com força suficiente para vencer a resistência imposta pelas molas.

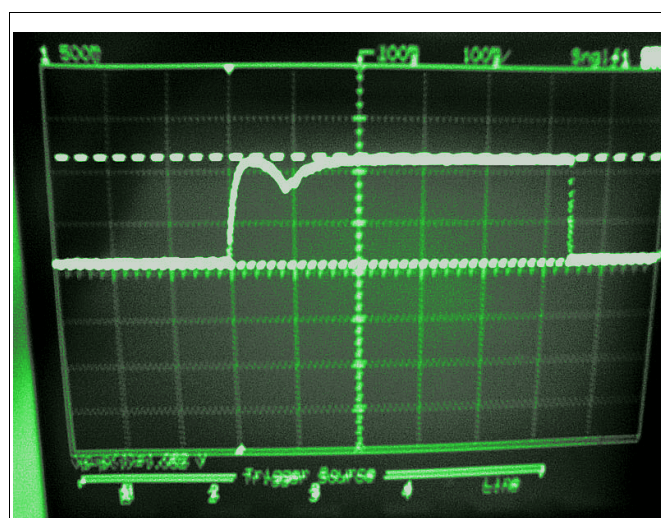


Figura 30: Pulso de acionamento de 500ms, tensão de 1.042 V sobre a resistência $R = 0,33 \text{ ohm}$, o que indica 3 A de corrente.

6.4 Desempenho do protótipo I

O atuador resultante está superdimensionado devido às restrições utilizadas como critério de projeto, pela indisponibilidade de ímãs menores com geometria adequada, e pelo volume excessivo das bobinas. Como consequência positiva, o atuador consumiu menos energia do que o inicialmente previsto. Foi possível vencer a força das molas com 3 A de corrente ao invés dos 5 A estimados de início, mas devido à massa elevada do núcleo, o tempo até que o sistema inicie o movimento prejudica o desempenho do sistema.

Apesar do dispositivo cumprir a função para o qual foi projetado, seu volume e massa estão acima do ideal para um veículo da categoria considerada, e tornam inviável a instalação no carro. No entanto, através da experiência adquirida no projeto, nos conceitos estudados e nos resultados observados, refez-se o projeto e um segundo protótipo foi construído, otimizando as dimensões e desempenho do atuador.

6.5 Custos do protótipo I

Os circuitos e componentes de aço do atuador podem ser encontrados facilmente no mercado a preços acessíveis. Os itens que elevam o preço do projeto são os ímãs de NdFeB, que custaram R\$ 150,00 o par. O aço utilizado foi gentilmente cedido pela oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC. Porém, mesmo se fosse comprado, ao compararmos o custo total deste atuador ao do sistema eletropneumático, que beira os R\$ 800,00, o primeiro ainda é mais vantajoso para a equipe.

7 Otimização e construção do protótipo II

7.1 Projeto do protótipo II

De acordo com BOLDEA [4], a topologia do protótipo I seria das mais eficientes, porém o autor examina excursões e dimensões consideravelmente menores do que as pretendidas neste trabalho. Considerou-se, então, uma topologia alternativa, que possibilitou o uso de ímãs em formato cilíndrico ao invés de anular, disponíveis no mercado em maior variedade de tamanhos. O volume e a massa do atuador poderiam ser reduzidos drasticamente. Um estudo comparativo destas topologias, preservando a idéia da geometria tubular com ímãs no núcleo foi realizado em elementos finitos no *software* Ansys 11. Um guia básico do procedimento de análise ímãstática oferecida em vídeo no site do produtor do *software* foi seguido como referência para as simulações [9].

Resumidamente, a análise é feita seguindo o procedimento: com a geometria definida, o modelo em CAD é importado dentro do módulo de desenho do ANSYS e são criadas as operações de movimento do pistão com sua posição como parâmetro variável na simulação e as bobinas; um envoltório de ar é gerado e também um plano de simetria para o modelo. Já no módulo de modelagem, os materiais e suas propriedades são definidos e as especificações da malha, de acordo com o tipo de simulação, neste caso, ímãstática; as condições de contorno são definidas com o fluxo magnético paralelo ao plano de simetria e as soluções de força resultante sobre o pistão no eixo de movimento e a densidade de fluxo são configuradas como saídas da simulação.

Um novo modelo foi gerado em CAD. Como os ímãs considerados são muito menores do que no protótipo I, o novo pistão possui menor diâmetro externo. Com a carcaça do atuador levemente mais longa, as novas dimensões obtidas para as bobinas permitiram, também, um maior número de espiras nas mesmas. Um estudo preliminar constou de simulações nas quais com dimensões fixas do atuador, várias posições de ímãs foram previstas e comparadas com o primeiro protótipo. Os resultados podem ser vistos na tabela 2 e na figura 31, na qual a região escura representa a posição dos ímãs no núcleo.

Tabela 2: Modelos simulados em elementos finitos.

Design	Corrente B1 (A)	Corrente B2 (A)	Força (N)	Observações	Espiras
0	5	-5	10,76	Protótipo 1	300
1	5	-5	20,69	Protótipo 2	300
2	5	-5	8,01	P2 sem ímãs	300
3	5	-5	20,1	P2 ímãs nas pontas	300
4	5	-5	34,9	P2 ímã no meio	300
5	5	-5	28,14	P2 + ímã no meio	300
4	5	-5	56,53	P2 ímã no meio	500
4	10	-10	109,2	P2 ímã no meio	500

Com os dados mostrados na tabela 2, percebemos que a nova geometria otimizada pode fornecer duas vezes a força da geometria anterior, e ao mesmo tempo ser menor e mais leve. Além disso, se aumentarmos o número de espiras a força resultante é ainda maior.

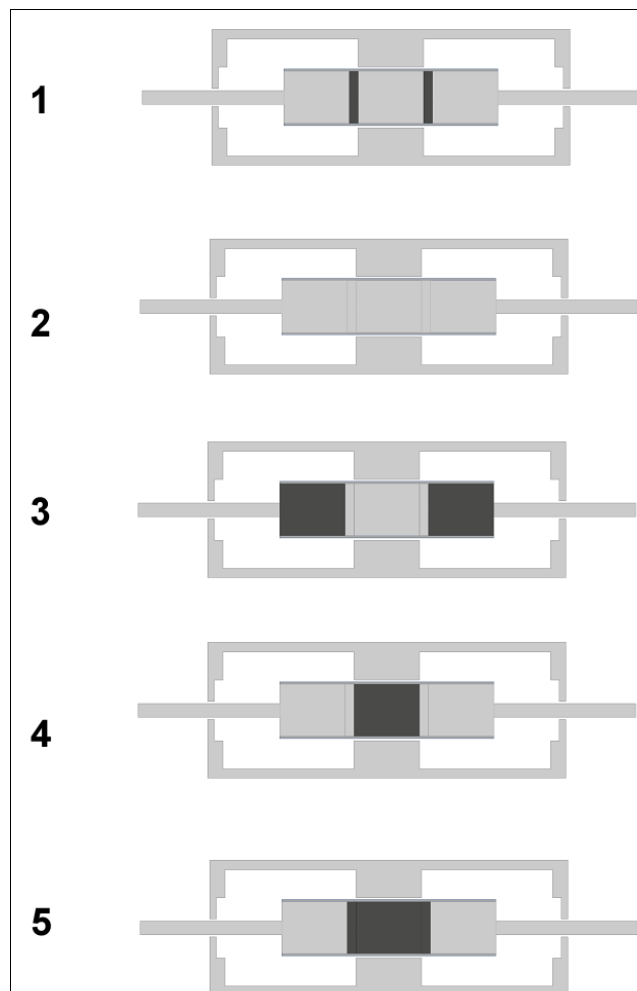
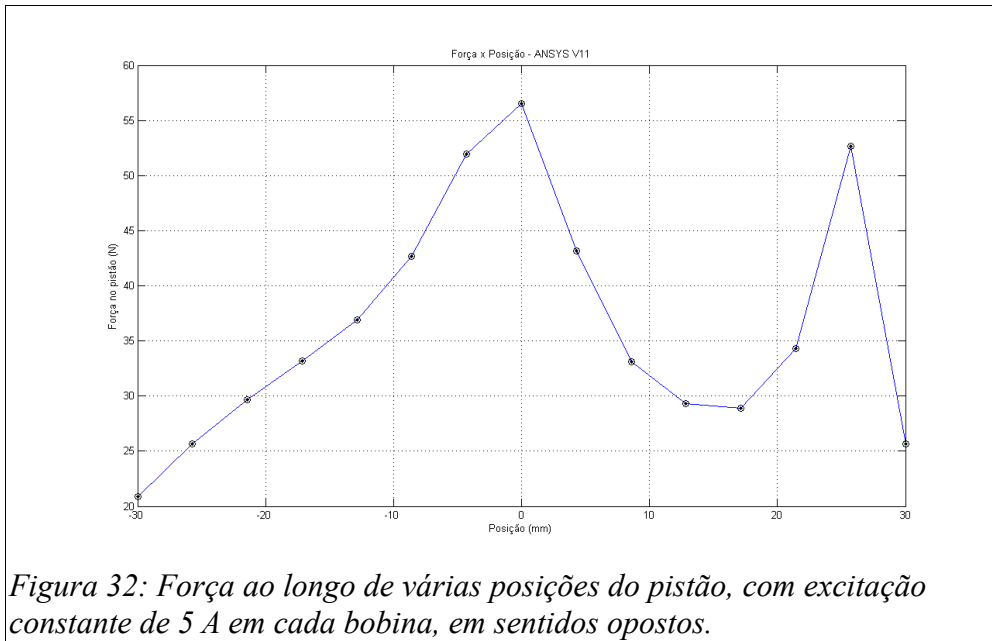
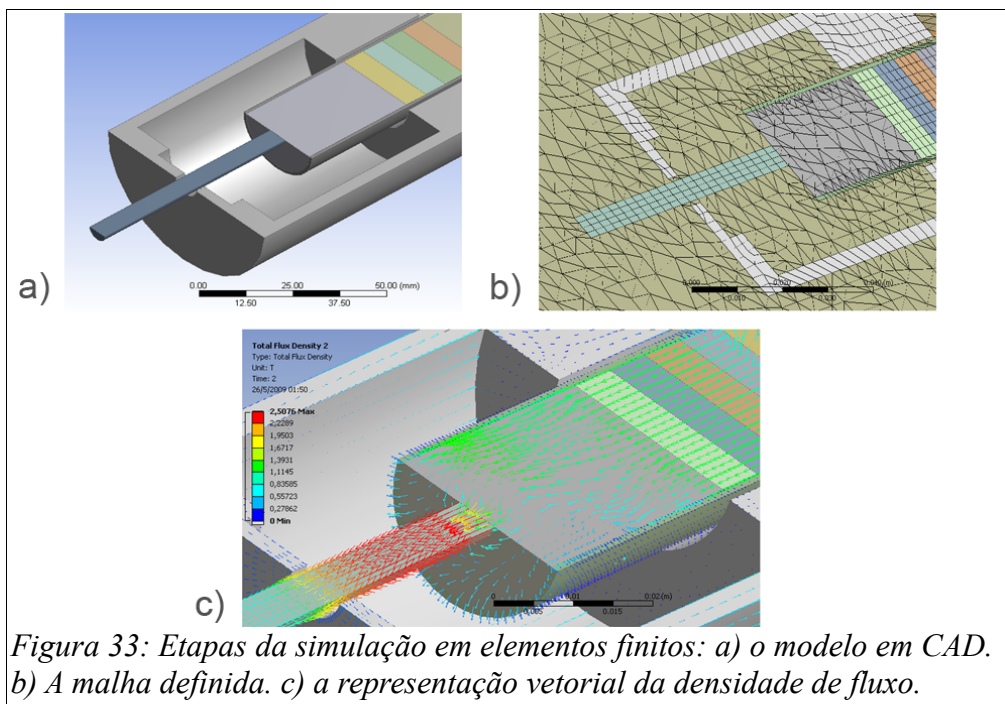


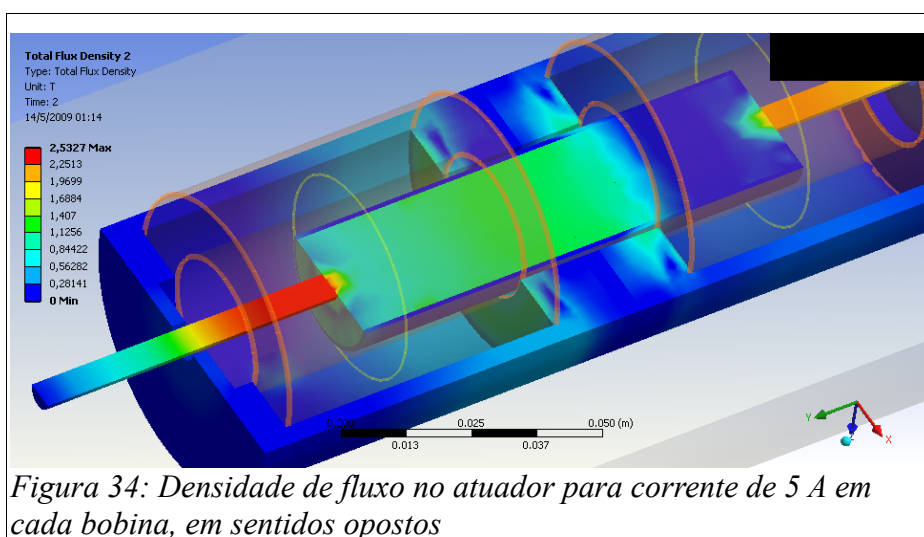
Figura 31: Estudo comparativo das posições dos ímãs.



O perfil observado na figura 32 foi obtido simulando-se a geometria mais eficiente estaticamente, mudando a posição do pistão a cada simulação, de modo que, ao final, toda a excursão do atuador fosse considerada, de ponta a ponta. A força exercida pelo pistão é maior na posição central, o que é adequado à dinâmica do movimento da alavanca, que uma vez retirada da posição de repouso no início do movimento, oferece menos resistência já que uma das molas internas do sistema auxilia no restante do seu curso. A figura 33 ilustra etapas do procedimento de simulação em elementos finitos.



As simulações foram de grande valia para se comparar o desempenho das diferentes topologias examinadas e estimar o número de espiras e corrente nas bobinas, possibilitando testar variações destes parâmetros antes da construção do segundo protótipo. Na figura 34, por exemplo, percebe-se uma distribuição mais uniforme de fluxo no conjunto, nas áreas esverdeadas, indicando um melhor aproveitamento da geometria e volume de material. Este estudo demonstrou claramente a melhora no desempenho do atuador, como pôde ser visto na figura 31. A simples mudança da geometria possibilitou mais que o dobro da força de saída no pistão, quando o número de espiras foi aumentado de 300 para 500, a força exercida é cinco vezes maior, passando de cerca de 10 N para aproximadamente 56 N.



7.2 Construção do protótipo II

O ímã central é composto por quatro ímãs em forma de disco, com 25mm de diâmetro e 7mm de profundidade, de NdFeB, inseridos em um tubo cilíndrico de alumínio, posteriormente usinado para formar uma casca cilíndrica o mais fina possível, cerca de 0,5 mm, apenas com a função de manter o conjunto dos ímãs e peças de aço que compõe o pistão alinhados.

As bobinas tiveram diâmetro do fio reduzido em relação ao primeiro protótipo, o que permitiu o aumento do número de espiras de trezentos para quinhentos. O carretel das bobinas foi usinado em náilon.

A carcaça externa, de aço 1020, é como um copo para alojar a bobina, e as paredes externas possuem espessura apenas suficiente para garantir rigidez estrutural e fluxo magnético de saturação no metal. Duas tampas, inseridas por dentro dos copos e com furo central para saída do eixo fecham o conjunto.

Foi necessária uma peça central para unir os copos, fixar todo o conjunto e prover espaço para manter os ímãs entre as duas bobinas na posição central do pistão. Um pequeno canal foi inserido, com pequenos furos de acesso ao exterior para permitir ao ar que escoe livremente sem frear o movimento do pistão.

Uma visão em corte do conjunto é ilustrada na figura 35. A figura 36 ilustra a sequência de montagem. As partes reais do protótipo construído são mostradas na figura 37 e a figura 38 mostra o protótipo montado.

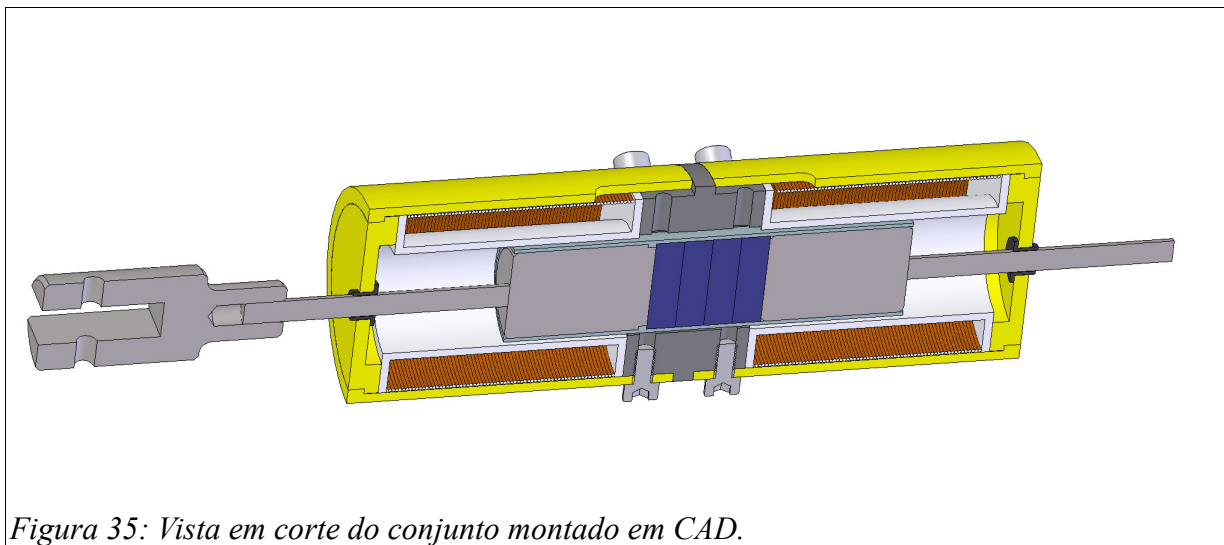


Figura 35: Vista em corte do conjunto montado em CAD.

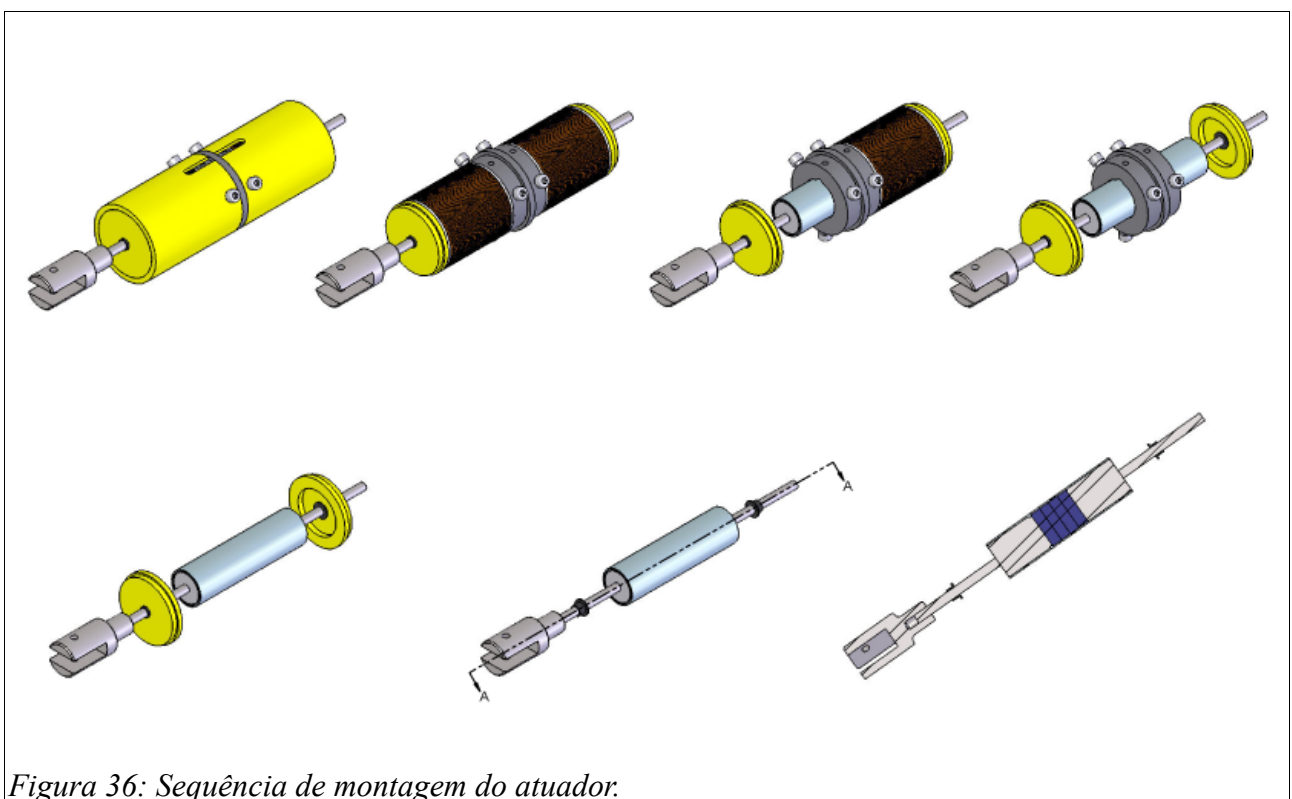


Figura 36: Sequência de montagem do atuador.

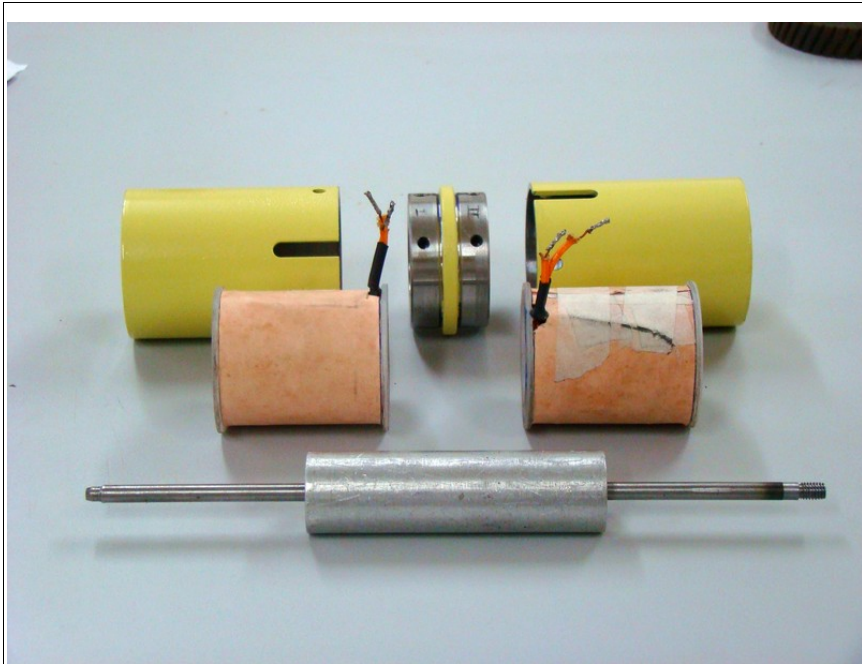


Figura 37: Eixo magnético, bobinas e carcaça.

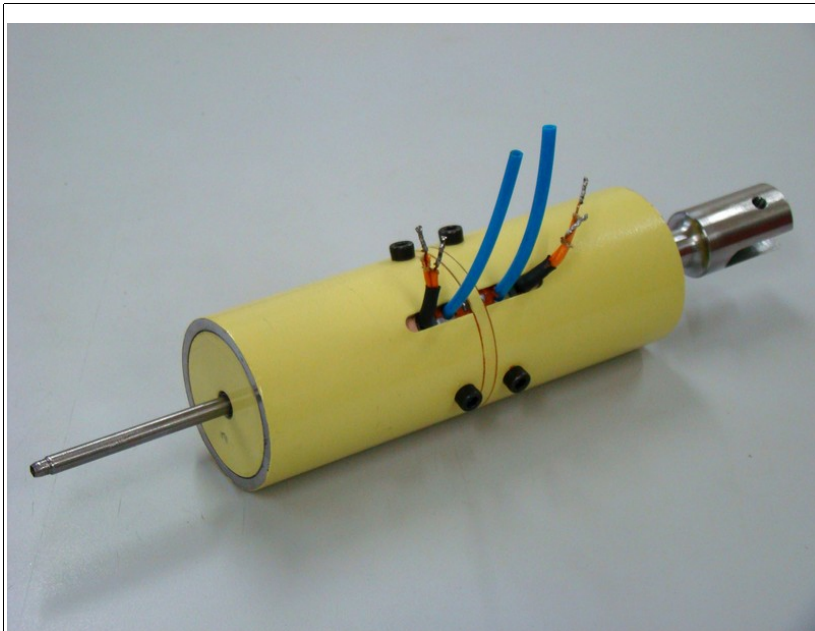


Figura 38: Foto do atuador montado.

As figuras 39 e 40 ilustram as diferenças nas dimensões dos protótipos I e II, relativamente.

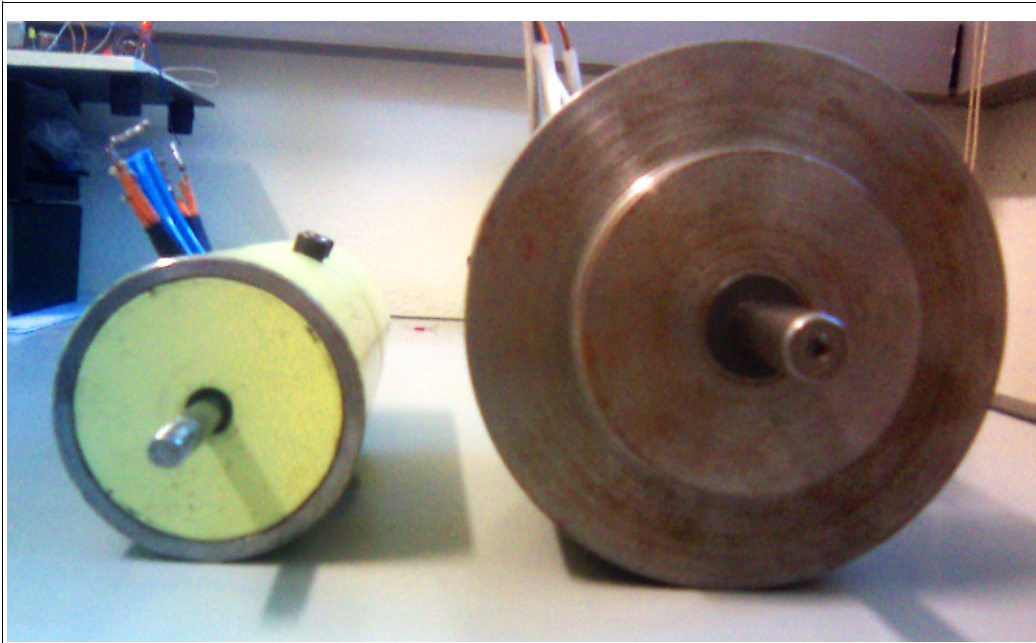


Figura 39: Vista frontal dos atuadores: o protótipo II possui menor diâmetro externo e de eixo do pistão.

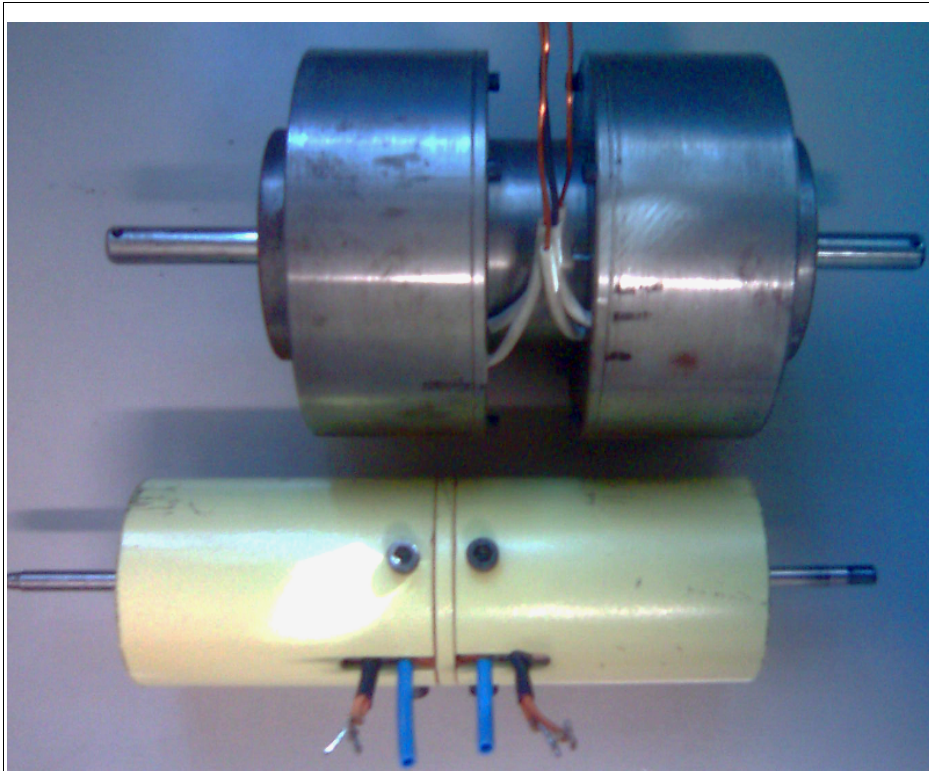


Figura 40: Vista de cima: o protótipo II possui maior comprimento em relação ao protótipo I.

7.3 Testes e desempenho do protótipo II

O atuador foi excitado em bancada, com as duas bobinas trabalhando juntas em oposição, enquanto uma delas cria um campo atraindo o pistão, a outra cria um campo repelindo-o. Não foi utilizada resistência em série com as bobinas para obter-se a máxima corrente possível no sistema. Assim, quando conectado em 12 V, a resistência oferecida por cada bobina é de 2,3 ohms mais R_{dsON} dos *MOSFETs*, totalizando 2,33 ohms. A corrente prevista nesta situação é de 5,15 A em cada bobina. Para os testes em bancada, ilustrados na figura 39, utilizou-se primeiramente uma fonte de 3 A, e posteriormente uma bateria automotiva.

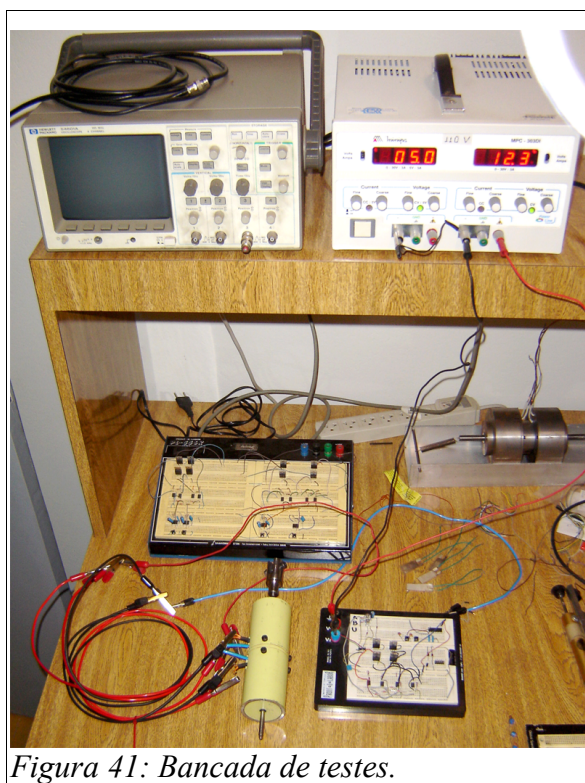


Figura 41: Bancada de testes.

O atuador foi preso a uma morsa e em uma de suas extremidades, foi acoplado um dinamômetro digital, capaz de medir força e força de pico exercidos sobre ele. A outra extremidade do dinamômetro foi fixada na bancada. O sistema de potência foi conectado a uma bateria de automóvel, capaz de fornecer alta corrente. O consumo total medido com um amperímetro ligado em série na bateria, mantendo o atuador acionado por alguns segundos, foi de 10,16 A, sendo aproximadamente 5,8 A em cada bobina. A força máxima registrada no dinamômetro digital foi de 50,7 N, não muito distantes dos 56,5 N previstos na simulação em elementos finitos. A diferença era esperada, pois as geometrias do atuador final e a simulada são ligeiramente diferentes, há um entreferro adicional, ainda que mínimo, em cada uma das junções

do conjunto real, ao passo que na simulação, a carcaça era composta de uma única peça. Além disso, há os vãos deixados para os fios das bobinas e os furos para os parafusos, que interferem ligeiramente no fluxo magnético do conjunto.

Foi realizado um teste com o atuador montado em um motor avulso na oficina da equipe SOLID EDGE. Para este teste, foi utilizada uma alavanca de 100mm de comprimento conectando a extremidade do eixo do atuador ao eixo seletor de marchas. Multiplicando este comprimento pela força exercida pelo atuador, é gerado um torque de 5,11 N.m no eixo seletor, próximos dos 6,05 N.m exercidos pelo atuador pneumático atualmente em uso no veículo. Os testes mostraram que o atuador é capaz de exercer a força necessária e movimentar o eixo seletor de marchas. A figura 38 mostra o atuador em teste no motor.

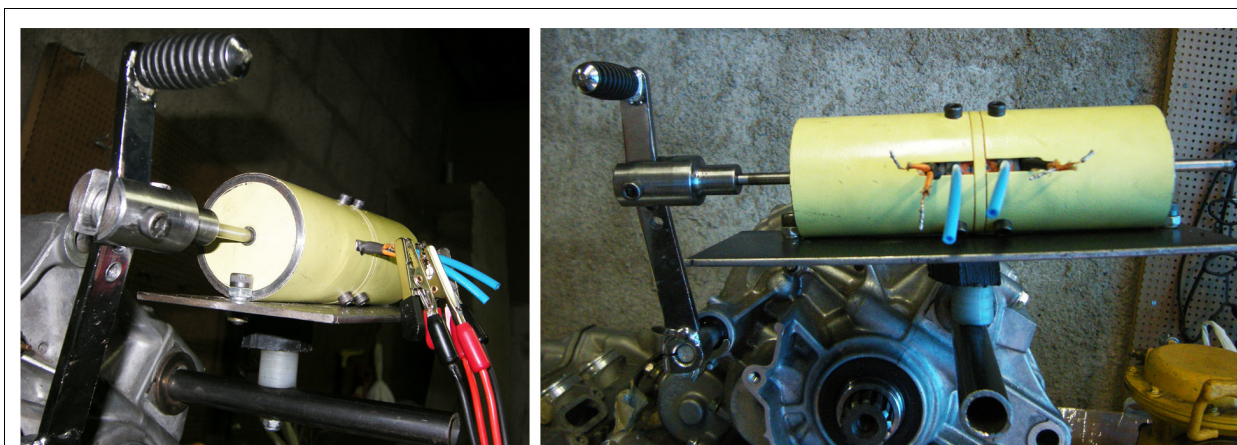


Figura 42: Atuador, alavanca e eixo seletor de marchas

7.4 Custos do protótipo II

O aço e o trabalho de ferramentaria, cedido e realizado por cortesia pela empresa Cestalto não pode ser contabilizada com exatidão, porém uma estimativa do custo pode ser feita baseada nos materiais utilizados. Os ímãs foram obtidos da empresa Metalmag, a um custo de R\$16,00 por peça, totalizando R\$64,00. As bobinas, com aproximadamente 0,4 kg de cobre cada a R\$21,00 o quilo, somam mais R\$16,80. As peças de aço, 1,7 kg, adicionam R\$8,65 a R\$4,50 o quilo (tubo de aço SAE 1020). Excluindo-se o custo de usinagem e mão de obra, temos um total de R\$89,45.

8 Conclusão

Na primeira fase, o objetivo do projeto foi parcialmente atingido, pois chegou-se a um protótipo funcional e de custo razoável a partir de uma sequência lógica de desenvolvimento. Contudo, a implementação no veículo ainda era inviável devido ao volume e massa do protótipo. Na fase seguinte, o projeto e o desenvolvimento do segundo protótipo complementaram o trabalho. O desempenho atingido foi muito satisfatório e muito próximo do previsto em simulações. O objetivo do trabalho foi alcançado e um protótipo funcional construído através de uma estimativa de parâmetros baseados na observação de um sistema já existente e do uso criterioso de ferramentas avançadas de projeto, como *software* para análise em elementos finitos, simuladores de circuitos elétricos, CAD para desenvolvimento de PCB, e CAD mecânico.

A dependência dos aspectos custo, usinagem e dimensionamento, se tornou explícita no decorrer do trabalho. O conhecimento e compreensão destas relações, como elas restringem ou direcionam as outras e as dificuldades encontradas aparecem ao final como experiência prática, que se soma ao conhecimento teórico adquirido ao longo do curso na faculdade.

9 Comentários

O próximo estágio do projeto consiste na implantação final no veículo e testes em campo para analisar velocidade de resposta e consumo de energia em comparação com o sistema anterior. Há a possibilidade de melhorar ainda mais o desempenho com um sistema alternativo utilizando um arranjo com dois atuadores menores, trabalhando em cooperação. Essas possibilidades ficam como sugestão para trabalhos futuros.

O trabalho realizado permitiu que o aluno fizesse uso de conceitos e práticas aprendidas em um grande conjunto de disciplinas do curso de engenharia, como projetos de circuitos eletrônicos analógicos e digitais, eletromagnetismo, técnicas de programação e simulação, ferramentas de projeto como os *softwares* de desenho mecânico e elétrico, e simulação de circuitos que são utilizadas na prática no mercado.

10 Bibliografia

1. TURNER, A. J.; RAMSAY, K.; CLARK, R.E.; HOWE, D. Development of High Force Electromechanical Linear Actuator for Shift-By-Wire Automated Manual Transmissions. SAE 2006 World Congress, April, 2006, Detroit, MI, USA, Session: Transmission & Driveline. SAE Technical Paper Series – 2006-01-0360
2. TURNER, A. J.; RAMSAY, K. Review and Development of Eletromechanical Actuators for Improved Transmission Control and Efficiency. SAE 2004 World Congress & Exhibition, March, 2004, Detroit, MI, USA, Session: Transmission & Driveline Systems Symposium – Components (Part 6 of 7). SAE Technical Paper Series – 2004-01-1322
3. WHEALS, J.C.; CREWE, C.; RAMSBOTTOM, M.; ROOK, S.; WESTBY, M. Automated Manual Transmissions – A European Survey and Proposed Quality Shift Metrics. SAE 2002 World Congress, March 2002, Detroit, MI USA, Session: Transmission & Driveline Systems Symposium (Part C) – AMT/Transmission Systems. SAE Technical Paper Series – 2002-01-0929
4. BOLDEA, I.; NASAR, S. A. Linear Electric Actuators and Generators. IEEE Transactions on Energy Conversion. Sept. 1999, 14(3): 712-17.
5. LEQUESNE, B. Fast-Acting Long-Stroke Bistable Solenoids with Moving Permanent Magnets. IEEE Transactions on Industry Applications. May/June 1990, 26(3)
6. FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, C.; UMANS, S. D. Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência, 6^a Edição, Editora Bookman, 2006 .
7. <http://www.irf.com> (Internationa Rectifier)
8. <http://www.cn-magnet.com>
9. <http://www.ansys.com>