UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Dissertação
de
Mestrado

Guaratinguetá
2012

RICARDO VELOZO MARCONDES DE OLIVEIRA

ESTUDO DA VIABILIDADE ENERGÉTICA DE AMORTECEDORES REGENERATIVOS POR INDUÇÃO COM ÊNFASE NOS CARROS ELÉTRICOS

Dissertação de mestrado apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Geraldo Trani Brandão
Co-Orientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli

Guaratinguetá
2012

Oliveira, Ricardo Velozo Marcondes de
O482e Estudo da viabilidade energética de amortecedores regenerativos por indução com ênfase nos carros elétricos / Ricardo Velozo Marcondes de Oliveira – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
111 f : il.
Bibliografia: f. 100

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Prof. Dr. José Geraldo Trani Brandão
Coorientador: Prof. Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli

1. Amortecedores - Regenerativos 2. Automóveis elétricos 3. Autonomia I. Título

CDU 62-752(043)

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

RICARDO VELOZO MARCONDES DE OLIVEIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ GERALDO TRANI BRANDÃO
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ GRANDINETTI
Unesp-Feg

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CHAVES
UNITAU

Julho de 2012

RICARDO VELOZO MARCONDES DE OLIVEIRA

NASCIMENTO	11.08.1985 – CUNHA/SP
FILIAÇÃO	Paulo Marcondes de Oliveira Maria Antônia Velozo de Oliveira
2010/2012	Curso de Mestrado Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista – Júlio de Mesquita Filho.

De modo especial aos meus pais que me apoiaram e sempre estiveram dispostos a ajudar e dar o apoio necessário. Sendo eles o principal motivo por eu ter concluído este trabalho.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, que pela minha fé, sempre estiveram ao meu lado e sempre foram minha inspiração e força. Juntamente de toda minha família.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. José Geraldo Trani Brandão* e co-orientador *Dr. Durval Luiz Silva Ricciulli*, que sempre me incentivaram e com entusiasmo ajudaram-me nesta conclusão.

À secretária do Departamento de Mecânica, *Rosiléia Ribeiro de Matos*, pela dedicação e alegria no atendimento, e pela paciência pelas constantes perguntas.

Aos técnicos *José Benedito Galhardo, Walter Luiz Medeiros Tupinamba* e *Urbano Gonçalves de Oliveira*, cujo empenho e entusiasmo foram importantíssimos para o andamento da pesquisa. O que seria impossível sem a orientação, dedicação e auxílio dos mesmos.

A *Nathália*, que foi importante companheira em todos os momentos.

Aos meus amigos de república, em especial à *Cláudia.*

A todos os que estiveram presente durante este período, especialmente os funcionários da seção de Pós-graduação.

Este trabalho contou com o apoio da:

CAPES – Coordenação de Apoio de Pessoal de Nível Superior

OLIVEIRA, R. V. M.. **Estudo da viabilidade energética de amortecedores regenerativos por indução com ênfase nos carros elétricos.** 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Os conhecidos automóveis elétricos tem seu desenvolvimento datado do início do século XIX, porém ainda não possuem a autonomia e o preço condizentes com a realidade da atual sociedade motora. Baseando-se na teoria desenvolvida no trabalho *Estudo de amortecedores regenerativos por indução*, que se objetiva na possibilidade teórica de geração de energia elétrica pelos amortecedores automotivos, o presente trabalho dá continuidade ao proposto com a finalidade de se verificar experimentalmente a exatidão deste método de referência e a viabilidade desta alternativa como sistema regenerativo para os carros elétricos, de modo a auxiliar sua autonomia e contribuir com o seu desenvolvimento sustentável. Assim, procura-se definir uma base de referência para que esta realidade seja mais promissora com o uso cotidiano de solicitação da suspensão do automóvel. Esta proposta vem inspirada também pela atual necessidade de que formas alternativas de geração de energia sejam exploradas, objetivando a administração sustentável dos combustíveis fósseis e o desenvolvimento da tecnologia de transporte. Salientando que sistemas regenerativos já são uma realidade nos dias atuais, como as células fotovoltaicas e o KERS já equipando alguns modelos. A análise e conclusão deste trabalho abre espaço para futuros estudos a fim de que os amortecedores produzam energia elétrica, e confirma a viabilidade desta proposta, com um potencial sustentável promissor para geração de energia limpa; esta energia pode ser armazenada e utilizada para regenerar baterias ou até mesmo acionar comandos elétricos, de modo a ser mais uma alternativa para os veículos que se utilizam de eletricidade, procurando balancear a oferta e demanda de energia para o transporte.

PALAVRAS-CHAVE: Amortecedor regenerativo. Automóveis elétricos. Autonomia. Sustentabilidade.

OLIVEIRA, R. V. M.. **Study of the viability of regenerative shock absorbers by inductively with focus on electric cars**. 2012. 110 f. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

The electric cars have known its development dating from the early nineteenth century, but still lack the autonomy and the price commensurate with the reality of actual motor society. Based on the theory developed in the work "*study regenerative shock induction*", which aims at the theoretical possibility of generating electricity for automotive shock absorbers, this work continues to the one proposed in order to experimentally verify the accuracy of the reference method and viability of this alternative as a regenerative system for electric cars, in order to help their autonomy and contribute to its sustainable development. Thus we seek to establish a baseline so that this reality is more promising with the everyday use of the request for suspension of the car. This proposal is also inspired by the current call for alternative forms of energy generation, aiming at sustainable management of fossil fuels and transport technology development. It should be emphasized that regenerative systems, such as photovoltaic cells and the KERS already equipping some models are a reality today. The analysis and conclusion of this work paves the way for future studies so that the shock absorbers produce electricity, and confirm the viability of this proposal, with a promising potential for sustainable clean energy generation. This power generated can be stored and used to regenerate batteries or even to trigger electrical devices, besides being one more alternative to vehicles that use electricity, competing to balance the supply and energy demand for transports.

KEYWORDS: Regenerative shock absorber. Electric cars. Autonomy. Sustainability

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 –	Ônibus elétrico da cidade do Rio de Janeiro em 1918	18
FIGURA 2 –	Veículo elétrico *La Jamais Contente*	18
FIGURA 3 –	Ford T de 1909	19
FIGURA 4 –	Veículo da primeira guerra mundial	20
FIGURA 5 –	Vanguard-Citicar *(esquerda)*, ev1 *(direita)*	20
FIGURA 6 –	Ônibus elétrico movido a energia solar	22
FIGURA 7 –	Fisker Karma	23
FIGURA 8 –	Tesla Roadster	23
FIGURA 9 –	Motorização ilustrada de um veículo híbrido.	24
FIGURA 10 –	Motorização ilustração de um veículo totalmente elétrico	25
FIGURA 11 –	Componentes de propulsão elétrica	26
FIGURA 12 –	Modelo da pilha de Volta	27
FIGURA 13 –	Bateria de lítio	27
FIGURA 14 –	Carro solar intitulado Solaris	31
FIGURA 15 –	KERS	32
FIGURA 16 –	Amortecedor telescópico	35
FIGURA 17 –	Analogia de movimento utilizada	39
FIGURA 18 –	Modelo de indução como adotado na teoria	40
FIGURA 19 –	Modelos de amortecedores populares	44
FIGURA 20 –	Modelo para indução eletromagnética	45
FIGURA 21 –	Imã de neodímio	46
FIGURA 22 –	Seção do tubo de fibra de carbono	48
FIGURA 23 –	Seção com bobinas em série de fios AWG – 24	48
FIGURA 24 –	Projeto inicial do componente biela (abaixo) manivela (acima)	50
FIGURA 25 –	Ilustração da bancada de ensaio	51
FIGURA 26 –	Imã de neodímio cilíndrico com furo interno	52
FIGURA 27 –	Componentes guias para o movimento da haste	52
FIGURA 28 –	Componentes da haste interna	53
FIGURA 29 –	Haste magnética finalizada com imãs de 20 mm de comprimento	54
FIGURA 30 –	Modelo indutivo finalizado com imãs de 20 mm de comprimento	54
FIGURA 31 –	Ilustração da bancada de ensaio	55
FIGURA 32 –	Roda manivela *(esq.)*, biela com arruela de nylon *(dir.)*	56
FIGURA 33 –	Caixa de redução *(esq.)*, polia ligada ao eixo *(dir.)*	56
FIGURA 34 –	Acoplamento de PVC. Vista lateral *(esq.)*, perspectiva *(dir.)*	57

FIGURA 35 – Base de madeira presa à bancada 58
FIGURA 36 – Componentes mecânicos da bancada de ensaio 58
FIGURA 37 – Sistema de aquisição Spider 8, fabricado pela HBM 59
FIGURA 38 – Circuito para redução de tensão no sistema de aquisição de dados 61
FIGURA 39 – Circuito de resistores 61
FIGURA 40 – Componentes montados da bancada de ensaio 62
FIGURA 41 – Configuração 1. Sinal com amplitude de 50 mm a 2,43 Hz 66
FIGURA 42 – Configuração 1. Sinal no resistor com amplitude de 70 mm a 6,00 Hz 66
FIGURA 43 – Configuração 1. Tensão na bobina com amplitude de 70 mm a 6,00 Hz com resistor 67
FIGURA 44 – Porcentagem de queda de tensão pelo resistor 69
FIGURA 45 – Configuração 1. Sinal no resistor com amplitude de 90 mm a 2,43 Hz 70
FIGURA 46 – Configuração 2. Sinal com amplitude de 50 mm a 2,43 Hz 70
FIGURA 47 – Configuração 2. Sinal no resistor com amplitude de 70 mm a 5,00 Hz 71
FIGURA 48 – Configuração 3. Sinal com amplitude de 50 mm a 2,42 Hz 72
FIGURA 49 – Configuração 3. Sinal no resistor com amplitude de 50 mm a 5,00 Hz 72
FIGURA 50 – Equacionamento da configuração 1 75
FIGURA 51 – Sinais plotados para amplitude de 50 mm a 5,00 Hz. Experimental *(esq.)* e teórico *(dir.)* 75
FIGURA 52 – Sinais plotados para amplitude de 70 mm e 2,43 Hz. Experimental *(esq.)* e teórico *(dir.)* 76
FIGURA 53 – Equacionamento da configuração 2 77
FIGURA 54 – Sinais plotados para amplitude de 50 mm e 4,00 Hz. Experimental *(esq.)* e teórico *(dir.)* 77
FIGURA 55 – Sinais plotados para amplitude de 70 mm a 6,00 Hz. Experimental *(esq.)* e teórico *(dir.)* 78
FIGURA 56 – Equacionamentos da configuração 3. Imã unitário (acima). Espaçamento nulo (abaixo) 79
FIGURA 57 – Sinais plotados para amplitude de 70 mm e 4,00 Hz com imã unitário. Experimental *(esq.)*. Teórico *(dir.)* 80
FIGURA 58 – Sinais plotados para amplitude de 70 mm e 4,00 Hz sem espaçamento. Experimental *(esq.)*. Teórico *(dir.)* 80
FIGURA 59 – Gráfico de correspondência da primeira configuração de haste 83
FIGURA 60 – Gráfico de correspondência da segunda configuração de haste 83
FIGURA 61 – Gráfico de correspondência da terceira configuração de haste. Com o primeiro equacionamento (esq.) e segundo equacionamento (dir.) 84

FIGURA 62– Gráfico de correlação completo do ensaio 3 85
FIGURA 63 – Sinal teórico do modo de ensaio 3, para 110 mm e 2,43 Hz 86
FIGURA 64 – Comparação entre os modos de ensaio. Experimental *(esq.)*. Teórico *(dir.)* 86
FIGURA 65 – Gráfico de potência gerada segunda a Tabela 4 88
FIGURA 66 – Gráfico de potência gerada segunda a Tabela 5 88
FIGURA 67 – Gráfico de potência gerada segunda a Tabela 6 88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	Modos de excitação do sistema	62
TABELA 2 –	Diferença em porcentagem da queda de tensão no circuito resistivo	68
TABELA 3 –	Resultados para o primeiro modo de ensaio (* Valores medidos no resistor)	73
TABELA 4 –	Resultados para o segundo modo de ensaio (* Valores medidos no resistor)	73
TABELA 5 –	Resultados para o terceiro modo de ensaio (* Valores medidos no resistor)	73
TABELA 6 –	Comparação de tensão para a configuração 1	81
TABELA 7 –	Comparação de tensão para a configuração 2	81
TABELA 8 –	Comparação de tensão para a configuração 3, com imã unitário	81
TABELA 9 –	Comparação de tensão para a configuração 3, com ausência de espaçadores	82
TABELA 10 –	Autonomia baseada em um módulo de bateria de íon-lítio	89
TABELA 11 –	Equivalência de consumo individual	92
TABELA 12 –	Equivalência de consumo de frota	93

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Objetivo 16
1.2 Estrutura da dissertação 16
2 RETROSPECTIVA E A HISTÓRIA DO CARRO ELÉTRICO 17
2.1 Uma breve história dos carros elétricos 17
2.2 Cenário atual 21
3 PRINCÍPIOS BÁSISOS DOS CARROS ELÉTRICOS 24
3.1 O uso das baterias e seu desenvolvimento 26
3.2 Sistemas de regeneração 29
3.3 Células fotovoltaicas 30
3.4 KERS 31
4 DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA DO TRABALHO 34
4.1 Suspensão automotiva e amortecedores 34
4.2 Solicitações de terreno 35
4.3 O amortecimento regenerativo 37
4.4 Apresentação do método teórico e correlação de variáveis 39
5 MATERIAIS E MÉTODOS 44
5.1 Projeto do modelo de indução eletromagnética 45
5.2 Imãs de neodímio e haste magnética 46
5.3 Tubo externo e enrolamento de bobinas 47
5.4 Sistema de acionamento 49
5.5 Finalização do modelo indutivo e montagem da bancada 51
5.6 Cuidados nas operações da bancada 58
5.7 Captação de dados 59
6 RESULTADOS E ANÁLISES 65
6.1 Resposta indutiva da configuração 1 de ensaio e cálculo da queda de tensão 65
6.2 Resposta indutiva da configuração 2 de ensaio 70
6.3 Resposta indutiva da configuração 3 de ensaio 71
6.4 Tabelas de resultados e análise 72
6.5 Comparação dos dados teóricos com os experimentais 74
6.6 Potência gerada e análise de autonomia 87
6.7 Análise financeira e energética 90

7 CONCLUSÃO 95
REFERÊNCIAS 96
BIBLIOGRAFIA 100
APÊNDICE – Sinais de tensão gerados pelos ensaios 101
ANEXO A – Catálogo de amortecedores 108
ANEXO B - Power-Generating Shock Absorber 111

1 INTRODUÇÃO

No presente momento, testemunha-se o fortalecimento da filosofia de cuidado do meio ambiente, controle de gases poluentes e as fontes renováveis de energia tem cada vez maior importância, criando uma alternativa, quem sabe em longo prazo, para a não dependência total dos combustíveis fósseis com sua administração de modo bem mais sustentável.

Dentro deste cenário de preservação ambiental, o setor de transportes não ficou de fora, pelo contrário, é neste setor que a ideia de sustentabilidade se reflete de forma ainda mais forte. Tornam-se cada vez mais comuns hoje em dia automóveis com motores puramente elétricos, ou mesmo os que levaram a um nível baixíssimo o consumo de combustível fóssil, o que torna o desenvolvimento neste sentido de fato muito necessário. E é objetivando este desenvolvimento que a proposta deste trabalho é apresentada.

Diante das dificuldades ainda existentes para uma maior adequação dos carros elétricos para os costumes da sociedade atual, que há décadas depende do petróleo, o trabalho estuda a possibilidade da suspensão do automóvel gerar energia. Ou seja, seguindo propostas como a do sistema KERS (TONI, 2009), que converte a energia cinética das rodas em energia elétrica, o que aqui será desenvolvido procura converter a energia que é dissipada na suspensão pelo funcionamento dos amortecedores, já que o princípio e forma de funcionamento mantém o que há anos é empregado nos diversos modelos.

Estas tecnologias de aproveitamento de energia, chamadas aqui de sistemas regenerativos, num todo já podem ser consideradas como uma ótima alternativa para que a realidade do veículo elétrico seja cada vez mais concreta. E por isto o estudo da viabilidade da geração por diferentes formas e naturezas de modo sustentável se torna promissor. É importante ressaltar ainda, que estas diferentes tecnologias se somam, ou seja, o trabalho aqui analisa as solicitações de um veículo que causa a excitação da suspensão para geração de energia, porém, não exclui a possibilidade de que sistemas de diferentes naturezas trabalhem juntos, como o mencionado KERS ou o aproveitamento da energia solar. Dando já o próximo passo no aperfeiçoamento na tecnologia de transporte.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo analisar a viabilidade energética do desenvolvimento de um gerador elétrico indutivo que tem seu acionamento por meio das oscilações de uma suspensão automotiva, oscilações estas que o amortecedor é sujeito; para um benefício da autonomia dos carros elétricos e seu desenvolvimento.

1.2 Estrutura da dissertação

No prosseguimento deste trabalho, a partir do Capítulo 2, é apresentada uma breve história do carro elétrico no mundo, com seus altos e baixos, durante as décadas, citando alguns nomes importantes e modelos que marcaram o desenvolvimento tecnológico da época.

Segue-se no Capítulo 3 uma explicação sucinta dos princípios básicos de funcionamento dos veículos elétricos, com ênfase no entendimento das baterias, ainda considerada o obstáculo tecnológico para o carro elétrico hoje em dia; algumas considerações sobre a suspensão automotiva também se faz necessário. Ainda neste capítulo terão breve explicação o já mencionado sistema regenerativo KERS, e a utilização da energia solar por células fotovoltaicas.

No Capítulo 4 é apresentando de modo definitivo a proposta de desenvolvimento, expondo as considerações importantes para o entendimento da metodologia adotada, tendo por fim a exibição do método teórico desenvolvido por Oliveira (2010), utilizado como referência. O processo de implantação do método experimental se segue no Capítulo 5, definindo os procedimentos utilizados, com a utilização de dados e referências para o início do projeto e montagem de uma bancada de ensaios para a geração dos dados de análise, esta última feita no Capítulo 6.

No Capítulo 7 é apresentada a conclusão fundamentada na proposta do trabalho e no desenvolvimento dos demais capítulos.

2 RETROSPECTIVA E A HISTÓRIA DO CARRO ELÉTRICO

No final do século XX, um ressurgente interesse pelo carro elétrico veio a definir as bases para uma nova realidade dos nossos meios de transporte. Isso consequentemente reavivou a necessidade de que maiores esforços se faziam necessário para inovar e viabiliza-lo de fato, procurando sua adequação para os dias atuais. Um fruto disto foi o desenvolvimento na década de 1990, de carros híbridos, que mesclam as duas tecnologias de propulsão, elétrica e por combustão. Outra consequência direta foi que se reabriu o espaço para a promoção do carro elétrico, que até então mal existia.

Embora o conceito do carro elétrico parecer algo totalmente novo, não o é de fato. A ideia de se usar eletricidade como fonte de energia para carros é pelo menos tão antigo como o conceito próprio de automóvel. As inovações mais recentes e a atenção voltada aos motores de combustão interna podem fazer com que pareça o contrário, contudo há um longo caminho percorrido até os atuais veículos elétricos.

2.1 Uma breve história dos carros elétricos

No final do século XIX, o carro totalmente elétrico já se encontrava bastante popular, porém no começo do século XX e a partir daí ao longo dos anos, a produção em massa de veículos movidos à gasolina suplantou a sua popularidade.

O carro elétrico, portanto, foi desenvolvido antes dos carros movidos à gasolina. A invenção do primeiro carro movido à eletricidade é atribuída ao inglês Robert Davidson, possivelmente no ano de 1838, que se aproveitou dos estudos do húngaro Ányos Jedlik, que inventou o motor elétrico em 1828.

Nesta época havia nas ruas mais carros elétricos do que carros à gasolina. No apogeu dos veículos elétricos, mesmo o transporte coletivo utilizava-se deste tipo de energia, especialmente na Europa, e também no Brasil. A Figura 1 exibe o ônibus utilizado na primeira linha de transporte coletivo elétrico do país, gerenciada pela antiga empresa Light, na década de 1910, na cidade do Rio de Janeiro.



Figura 1 – Ônibus elétrico da cidade do Rio de Janeiro em 1918 (DECOURT, 2004).

Todo este progresso tomou novo impulso graças às pesquisas dos franceses Gaston Plante em 1865, e Camille Faure em 1881, que desenvolveram melhor a tecnologia das baterias recarregáveis.

Alguns carros se destacaram neste cenário, como o *La Jamais Contente*, que pode ser observado na Figura 2, o primeiro carro a ultrapassar a barreira dos 100 km/h (SHERMAN, 2011). E o *Baker eletrics*, que rodava até 50 km com uma carga na bateria, atingindo 32 km/h de velocidade. Os carros elétricos assim já eram considerados práticos, silenciosos e charmosos, e ganhavam em disparada dos com motor à combustão nos quesitos beleza e versatilidade. Os últimos modelos construídos na década de 1910 já atingiam a incrível autonomia de mais de 120 km com uma carga das baterias.



Figura 2 – Veículo elétrico *La Jamais Contente* (SHERMAN, 2011).

Apesar de tantas qualidades, algumas barreiras ainda existiam a indústria do automóvel elétrico para torná-lo mais popular; sendo elas principalmente o tempo de recarga

das baterias e a autonomia do veículo para longas distâncias. Entretanto, antes que esses problemas pudessem ser resolvidos para os padrões da época, foi lançado no ano de 1909 o Ford T, carro movido à gasolina que se tornou um ícone do início do século. No ano seguinte, em 1910, a Cadillac lançou a partida elétrica por pedal, fazendo com que agora não fosse mais preciso girar a manivela de partida, pesada e causadora de muitos acidentes. Isso foi uma verdadeira revolução na indústria automobilística, e viabilizou de vez o carro com motor a combustão (GOLDEMBERG. 2005).



Figura 3 – Ford T de 1909 (SAMY, 2008).

Somado a estes avanços teve-se o ingresso das grandes empresas petrolíferas no cenário, que perceberam que seria um ótimo negócio investir no ramo automobilístico e passaram a incentivar e financiar tecnologias para o motor movido a combustível derivado do petróleo. A Texaco foi um exemplo que já no ano de 1902, nos Estados Unidos, oferecia suporte para o desenvolvimento da indústria automobilística, apostando nas pesquisas de Rudolf Diesel, que havia inventado o motor cujo ciclo receberia o seu nome.

Em continuidade no caminho de ascensão do petróleo, o último grande marco da transição dos motores elétricos para os movidos à gasolina ou diesel foi a 1ª Guerra Mundial, onde estes se militarizaram e se desenvolveram consideravelmente, movendo tanques, aviões e barcos, como mostra a Figura 4. Com o uso militar desses veículos a transição se firmou e tornou-se definitiva, indicando o declínio, ou mesmo o esquecimento dos veículos elétricos por várias décadas.

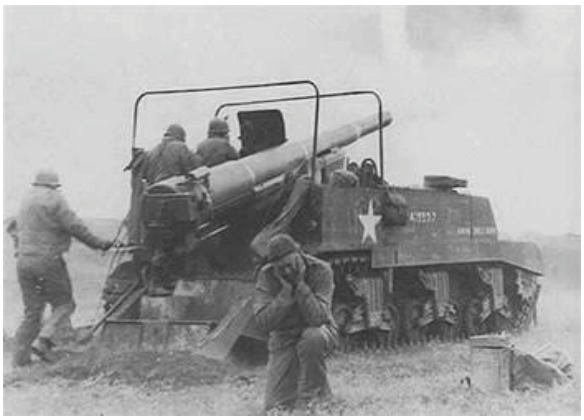


Figura 4 – Veículo da primeira guerra mundial (PERCÍLIA, 2010).

Isso poderia ter sido considerado como o fim dos carros elétricos, porém chegando ao final do século passado, depois de anos dependendo exclusivamente do petróleo, a sociedade começou a se preocupar com o visível aumento da poluição, qualidade do ar e a dependência das reservas fósseis estrangeiras. Somando-se a esta emergente filosofia, nas últimas décadas quando os preços dos combustíveis e derivados de petróleo subiram devido a um embargo, inicialmente da década de 1970, começou-se a reavivar o interesse por fontes alternativas de energia, e consequentemente pelos veículos elétricos.

Em 1974, a empresa Vanguard Citicar-Sebring foi lançada e já no ano seguinte foi a sexta maior montadora dos Estados Unidos por um breve período. No ano de 1990, a General Motors exibiu um novo carro conceito totalmente elétrico, o *Impacto*, no Los Angeles Auto Show. E em 1996 eles tinham transformado o protótipo no *ev1*, que teve um lançamento limitado para o público.



Figura 5 - Sebring Vanguard-Citicar *(esquerda)*, ev1 *(direita)*, (CAGLE, 2010).

Sendo assim, atualmente no auge dos debates sobre preservação do ambiente e da procura por fontes alternativas, os veículos elétricos ressurgiram. Mesmo as grandes empresas

automobilísticas, fabricantes de veículos convencionais, estão realizando pesquisas e desenvolvendo modelos de carros elétricos.

2.2 Cenário atual

Segundo artigo (O GLOBO, 2012), para os próximos anos os Estados Unidos investirão U$ 1 bilhão de dólares para o desenvolvimento dos carros elétricos, cujas vendas já superavam a marca de quatrocentos mil unidades. Outros incentivos também se fazem presente na Europa, e em países como o Japão e a Austrália. E repetindo a história, esta tecnologia com ares de ainda nova mesmo considerando quase dois séculos, também teve ótima aceitação e ascensão no transporte coletivo. Só em Nova Iorque, por exemplo, já são mais de mil ônibus elétricos e híbridos em circulação. Na Grande São Paulo são mais de duzentos veículos, um número ainda pequeno, mas suficiente para reduzir consideravelmente a emissão de gases poluentes, poluição sonora e consumo de combustível. E o crescimento não pára por aí.

Na Austrália já é realidade o primeiro ônibus movido à energia solar, Figura 6, em funcionamento desde o começo de 2010. A propulsão é puramente elétrica, sendo recarregado através de um sistema de células fotovoltaicas. O ônibus fabricado pela empresa Designline International, da Nova Zelândia, tem capacidade de viajar aproximadamente 200 quilômetros entre as recargas, transporta até 40 passageiros e foi batizado *Tindo*, palavra aborígene australiana que significa *sol*. De acordo com o governo local, desde que começou a operar, o veículo já rodou mais 55 mil quilômetros e teria economizado mais de 14 mil litros de diesel. Calcula-se que em um ano, o ônibus movido à energia solar teria evitado que setenta toneladas de CO_2 fossem jogadas no meio ambiente, além de contribuir muito para a poluição sonora, (FERRO, 2008), sendo um veículo bem silencioso.



Figura 6 – Ônibus elétrico movido à energia solar (FERRO, 2008).

A Europa deu ainda outro passo, e prevendo o considerável aumento da circulação dos veículos elétricos, está investindo em um projeto audacioso para desenvolver postos de recargas seguros, silenciosos e baratos, bem como um sistema rodoviário totalmente sustentável para os próximos anos.

O Brasil não está de fora da corrida. Em 2006, a Itaipu Binacional deu continuidade ao projeto de veículos elétricos brasileiros com a meta de desenvolver um veículo com autonomia de 450 km, velocidade máxima de 150 km/h e tempo de recarga das baterias de 20 minutos. Além da produção nacional, a montadora chinesa Jinxlang Fang Neng Eletromobile também pretende desenvolver veículos elétricos baratos no Brasil, a cidade de Rolante, no Rio Grande do Sul, receberá a primeira fábrica da América Latina que construirá automóveis populares de energia limpa, o *E-car*.

Mundialmente, tem-se já mais de um exemplo de que os carros elétricos também podem atender bem aos costumes da sociedade sobre rodas mais exigente, e investimento em pesquisas tornam cada vez mais possível a criação de modelos que vão além de algumas expectativas, como o Fisker Karma, Figura 7, carro híbrido de tração traseira para quatro pessoas, considerado um esportivo de luxo que atinge os 200 Km/h, e o já consagrado Tesla Roadster, Figura 8, este último integralmente elétrico utilizando-se das mesmas baterias de íon-lítio utilizadas em celulares e notebooks.



Figura 7 - Fisker Karma (TRINDADE, 2009).



Figura 8 – Tesla Roadster (BUENO, 2008a).

Em vista desta expectativa, pode-se afirmar que os carros elétricos já têm seu espaço garantido, precisando apenas de tempo e investimento para que a cultura atual absorva estas inovações que inevitavelmente proporcionarão o avanço tecnológico em termos de sociedade motora, muito ofuscado pelas décadas de predomínio do petróleo, além de se contar agora com aproximadamente duzentos anos de história para servir de exemplo.

3 PRINCIPIOS BÁSISOS DOS CARROS ELÉTRICOS

Tendo em mente que esta realidade está bem presente, cabe um entendimento simples desses veículos, e suas limitações atuais.

Existem muitas diferenças entre o carro elétrico do passado e o do presente. Na verdade, o termo *carro elétrico*, hoje é utilizado para designar diferentes tipos de tecnologias utilizadas para mover um veículo. Desta forma, chama-se genericamente de carro elétrico os citados veículos híbridos, os exclusivamente à bateria e os ainda em desenvolvimento por célula de combustível (fuel-cell vehicles).

Os veículos híbridos são assim denominados por usarem, além da eletricidade, unidades de combustão interna adicionais, que também funcionam como geradores elétricos, como ilustra a Figura 9, o que aumenta a autonomia de percurso e a potência total. Por serem híbridos não podem ser considerados não poluentes. Entretanto, são uma opção bastante viável e promissora, pois poluem e consomem bem menos do que os veículos só à combustão convencionais, e possuem a versatilidade de rodar com ambos os meios, sem a necessidade da dependência total de postos de recarga elétricos, minimizando as desvantagens que ainda existem provenientes da deficiência dos modelos atuais a baterias (GONÇALVEZ, 2002). Tanto automóveis como ônibus híbridos já são comercializados no mundo, inclusive no Brasil.

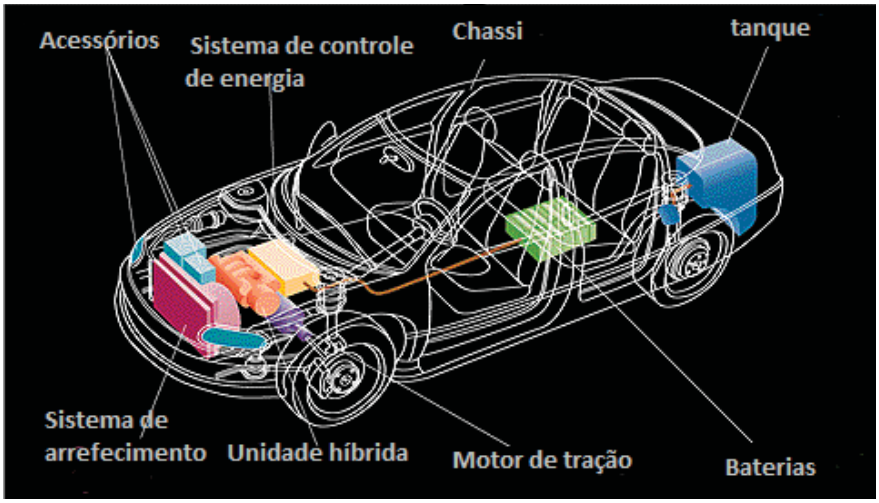


Figura 9 – Motorização ilustrada de um veículo híbrido (GONÇALVES, 2002).

Os veículos elétricos puros, como o próprio nome diz utilizam só a eletricidade provinda das baterias para se moverem, como ilustrado na Figura 10. São, portanto, totalmente não emissores de gases poluentes, atendendo à classificação de emissão zero.

Esses veículos podem também utilizar de diversas formas de geração elétrica disponível para recarregar sua bateria (como energia hidroelétrica, eólica, termoelétrica, solar e etc.), o que também se verifica nos modelos híbridos. Contudo, as barreiras que frearam o desenvolvimento a mais de um século, ainda podem ser consideradas atualmente, salvo as devidas proporções, como o tempo de recarregamento e peso das baterias, o preço, e a pequena quantidade de postos de recarga, que ainda são obstáculos reais para longas viagens ou trabalho. Contudo o ponto mais fraco é justamente a autonomia de percurso. E apesar destes veículos serem considerados não poluentes, as baterias quando atingem sua vida útil devem ser trocadas, e merecem um extremo cuidado neste processo, pois elas mesmas possuem componentes perigosos, que se descartados de qualquer maneira se tornam ainda mais perigosas que os gases de uma combustão que vão para a atmosfera.

Porém, tomado como referência os avanços nas pesquisas mais recentes, em breve estará o desempenho e a capacidade de percurso compatível com as necessidades pelo menos dos grandes centros urbanos atualmente, possibilitando assim a comercialização crescente ao longo do tempo, possuindo ainda a vantagem de serem os carros mais silenciosos, menores e fáceis de manobrar.

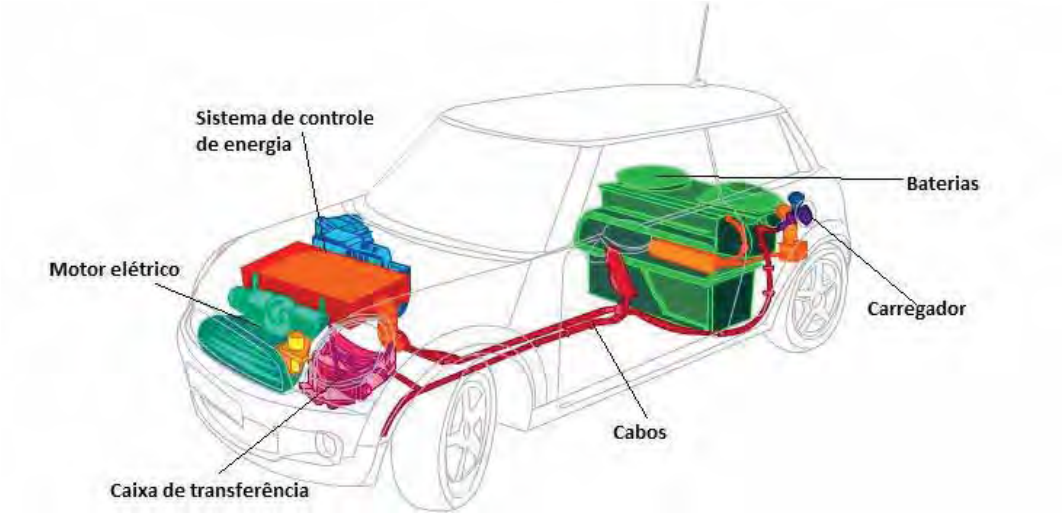


Figura 10 – Motorização ilustrada de um veículo totalmente elétrico (GOULART, 2010).

Um pouco mais em fase de desenvolvimento, mas que merecem serem citados, são os carros por células de combustível. Nestes a geração de energia vem da eletricidade proveniente de uma célula eletroquímica em que são consumidos um agente redutor (combustível) e um agente oxidante (comburente). Nestas, ao contrário das baterias ou das pilhas, os agentes químicos são fornecidos e consumidos continuamente. O modelo que se encontra mais desenvolvido tecnologicamente utiliza como reagentes o hidrogênio e

o oxigênio. Mas há ainda diversos problemas práticos a serem superados. Embora o uso de células de combustível por consumidores para mover seus veículos seja promissora num futuro próximo, os projetos atuais ainda estão em plena fase de descobertas. Há modelos que já funcionam com esta tecnologia, porém necessitam ainda de anos de pesquisa e desenvolvimento para serem comercializados, bem como a tecnologia para reabastecimento seguro das células que praticamente não existe, salvo testes em ambiente controlado que vêm sendo feitos com o uso de células alimentadas com álcool metanol.

3.1 O uso das baterias e seu desenvolvimento.

O conjunto padrão que compõe um carro elétrico baseia-se principalmente na combinação de motor elétrico, baterias e um pedal ligado ao controle de energia, nos híbridos além do motor elétrico, tem-se o motor a combustão, ou propriamente chamado de unidade híbrida. Contudo, o conjunto básico elétrico é mais bem ilustrado no exemplo da Figura 11 (BRAIN, 2008).

Entretanto, a bateria, que foi uma grande inovação do carro elétrico, é ainda seu maior problema.

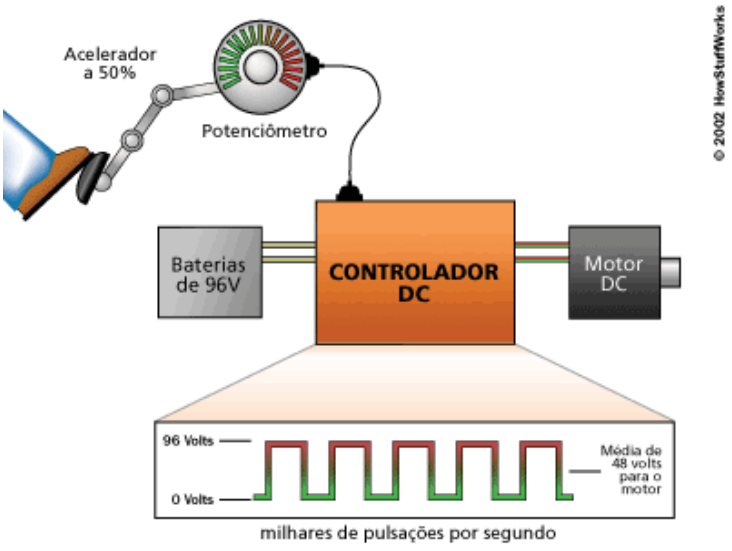


Figura 11 – Componentes de propulsão elétrica.

Ao italiano Alessandro Volta é atribuída a invenção da primeira bateria. Seu trabalho foi publicado pela Royal Society em 1799, onde foi apresentado o modelo exibido na Figura 12 (SANTANA, 2008). Conhecida como pilha de Volta, essa bateria é constituída por discos de Zn e Cu, separados por discos de papelão embebido em água salgada. Deste modo era gerado um fluxo estável de corrente elétrica por meio de uma reação química, forçando o

disco de zinco (pólo negativo) a liberar um elétron, e o disco de cobre (pólo positivo) a capturá-lo.

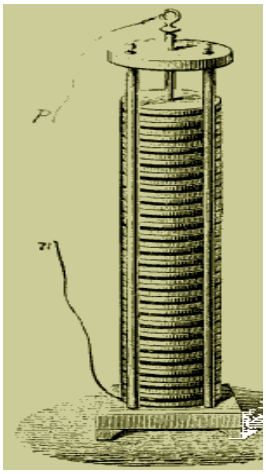


Figura 12 – Modelo da pilha de Volta.

Hoje, as baterias não se parecem mais com o recipiente de Volta, mas funcionam com os mesmos princípios básicos. E dois séculos de progressos em química geral, design e materiais propiciou o desenvolvimento da bateria de lítio, Figura 13, considerada por muitos o *estado da arte* em sistemas de conversão de energia.

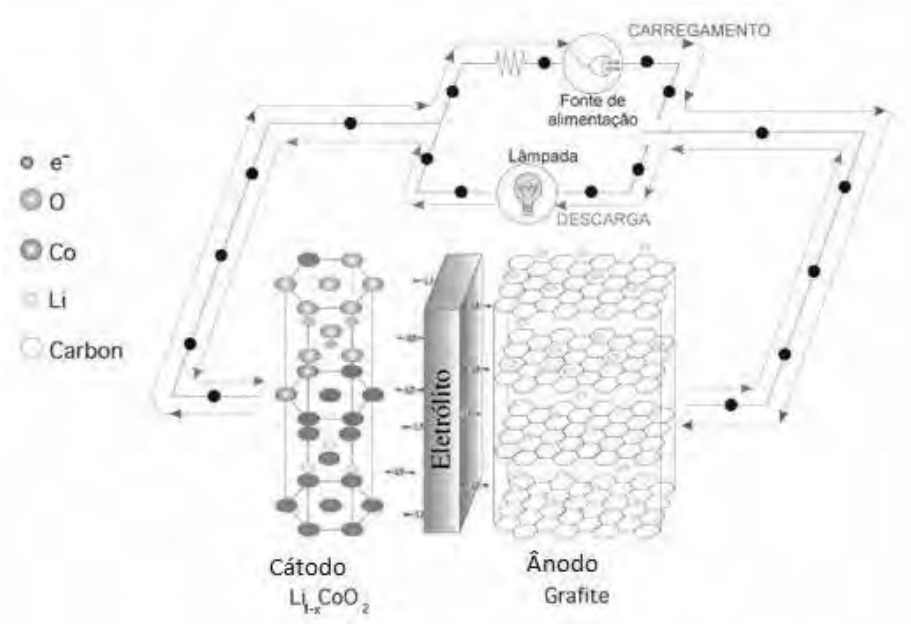


Figura 13 – Bateria de lítio (PESQUERO, 2008).

Seu princípio de funcionamento baseia-se no fenômeno de intercalação iônica. Este fenômeno é descrito pela difusão dos íons de lítio (Li^+) através da rede cristalina tanto do

cátodo como do ânodo, ou seja, quando intercala em um, desintercala do outro, e vice-versa, forçando os elétrons a agirem da mesma forma por circuitos externos, constituindo assim um ciclo de oxiredução entre as partes. Por esse movimento iônico esta bateria recebeu originalmente o nome de *cadeira de balanço*.

Quando este tipo de bateria é confeccionado o cátodo se encontra repleto de íons de lítio e o ânodo vazio dos mesmos. A primeira reação possível é a desintercalação dos íons Li^+ do cátodo para o eletrólito e a consequente intercalação destes do eletrólito para o ânodo. Concomitantemente um elétron deve deixar o cátodo e migrar para o ânodo, via circuito externo. Este processo (carga) não é espontâneo, sendo necessária a utilização de uma fonte de energia elétrica para sua realização, ilustrado na Figura 13 pelas setas em sentido horário no circuito. A tensão elétrica inicial entre os eletrodos (dependendo da composição do cátodo) é de aproximadamente 3,00V indo para 4,20V quando a bateria atinge sua carga máxima. O processo inverso (descarga) é espontâneo. Nele os íons Li^+ desintercalam do ânodo intercalando no cátodo, desde que um elétron siga a mesma direção, mas pelo circuito externo (utilização da bateria), (CHAGAS, 2006), ainda na Figura 13 este processo corresponde às setas em sentido anti-horário.

Entretanto, esses modelos ainda possuem uma capacidade limitada para uma adaptação definitiva no ramo automobilístico; a indústria está tentando solucionar esses problemas para tornar o carro elétrico mais viável e acessível, e os resultados estão sendo promissores. As novas tecnologias estão conseguindo diminuir o tempo de recarga e o peso nos modelos, mas ainda é preciso mais investimento, tanto de dinheiro como de tempo, para se chegar a um modelo ideal. Também é necessária a experiência de campo, ou seja, a real utilização a fim de que possam proporcionar variáveis de referência que auxiliem no desenvolvimento geral, baseado nas conclusões dos maiores fabricantes e desenvolvedores.

> Todos os veículos mais recentes disponíveis que têm a eletricidade como fonte principal de energia, como o Nissan Leaf ou o Chevrolet Volt, usam alguma forma química de íon de lítio em suas baterias. E esse sistema deve predominar ao menos pelas próximas duas décadas, ainda com muito espaço para inovações, declarou Jeffrey P. Chamberlain, chefe do grupo de Armazenamento de Energia Eletroquímica no Laboratório Nacional Argonne.
>
> Sem possuir décadas de testes de estrada com carros elétricos, os fabricantes são obrigados a exagerar na fabricação das baterias, agregando materiais e recursos de segurança para garantir sua adequação às exigências da garantia de tração, segundo Alex. A. Molinaroli, presidente do grupo de Soluções de Energia da Johnson Controls, fabricante de baterias de

> íon de lítio para BMW, Daimler e Ford. Sua estimativa é que essa supercompensação corresponda a 50% dos materiais usados nas baterias atuais.
>
> (REVISTA VEJA, 2011).

Frente a toda esta realidade, tem-se também que o desenvolvimento das baterias deve ser acompanhado do desenvolvimento das possibilidades de recarga, como centros para ‘reabastecimento’ em contraste com os postos de gasolina, e da possibilidade da autonomia das baterias ser aumentada não só por sua própria tecnologia, mas também por meio de motores híbridos em sistemas cada vez mais eficientes, bem como sistemas de regeneração agregados aos veículos como um todo.

3.2 Sistemas de regeneração

Um pouco do progresso dos veículos elétricos e de seu desenvolvimento foi mostrado até aqui, e enfatizou-se a dependência do avanço dos mesmos quanto à autonomia proporcionada pelos componentes de armazenamento atualmente utilizados. Deste modo, entendendo sensivelmente melhor sua natureza e funcionamento, o foco seguinte vem a ser as tecnologias que podem proporcionar maior sustentabilidade por diferentes processos interligados ao funcionamento total do automóvel às baterias, conferindo uma maior capacidade de percurso para os mesmos.

Uma medida comum das baterias é a densidade de energia, que vem a ser o número de Watts-hora (Wh) de eletricidade que a mesma pode gerar frente ao seu peso, que na bateria de íon-lítio atual está por volta de 150 Wh/kg, (IMPINNISI, 2009); em comparação isso corresponde a três vezes uma bateria de níquel e metal, presente em alguns dos primeiros carros híbridos, como o Toyota Prius. Porém, sua recarga completa frente a um conjunto para mesma potência demora cerca de quatro horas nos processos mais seguros.

Dentre as áreas de desenvolvimento para melhora dos veículos elétricos e busca desta sustentabilidade, uma de grande destaque é a de conversão das energias que já estão presentes e que geralmente são perdidas, como auxílio de rendimento, autonomia e consequentemente exigindo menos recargas com o veículo parado. Estes sistemas, que podem ser chamados de regeneradores, são tecnologias para trabalhar em conjunto com a totalidade do sistema do automóvel e que estão contribuindo, e podem contribuir ainda mais, para o avanço definitivo de fontes alternativas de energia, e ultrapassar a barreira atual existente neste sentido. Alguns

destes sistemas já estão sendo utilizados e sua funcionalidade comprovada, como os citados a seguir.

3.3 Células fotovoltaicas

Carros movidos por energia solar se encontram em grande desenvolvimento, apesar de ainda terem sua utilização inviável economicamente e um futuro cheio de incertezas para a regeneração de baterias, ou plena utilização para ganho de autonomia nos carros elétricos. Entretanto, além dos carros solares propriamente ditos, que armazenam a energia solar convertida, como o mencionado ônibus Tindo, há também o conceito de utilização nos protótipos de híbridos a base de células de combustível, que combinam a tecnologia de conversão através de células fotovoltaicas. Assim, a energia obtida além de poder ser armazenada, pode ser utilizada para a produção de hidrogênio (através da eletrólise da água), o qual alimentará a célula de combustível que acionará o motor. Apesar de ainda estar em fase de pleno desenvolvimento, esta alternativa por muitos já é considerada o caminho pelo qual o carro totalmente não poluente e sustentável se estabelecerá de fato.

Atualmente, já são utilizadas células fotovoltaicas no teto dos veículos para captação da energia solar, mais comum nos ônibus híbridos que possuem uma grande área exposta, a cada ano se destacando pela melhora do rendimento, principalmente em dias ensolarados. Mesmo que a quantidade de energia seja baixa, os modelos mais modernos possuem circuitos que acumulam estas parcelas de energia em supercapacitores até um limite pré-estabelecido, onde a partir daí são utilizadas para a regeneração de específicos conjuntos de armazenamento ou para acionamentos elétricos variados, aproveitando desta forma o máximo possível da energia captada.

A chamada World Solar Challenge é uma iniciativa ligada ao incentivo do desenvolvimento destes carros. Esta é uma competição realizada na Austrália em que várias equipes competem em uma corrida de carros solares, tentando obter os melhores resultados e a melhor eficiência do veículo. Os modelos possuem potência de aproximadamente 1000 W e chegam a velocidades de 160 km/h. Totalmente alimentos pelo sol percorrem mais de 3000 km em pouco mais de uma semana (BUENO, 2003). A Figura 14 mostra o *Solaris*, carro conceito da Associação de Veículos Solares Aurora, principal organização que tem participado das corridas em parceria com a montadora Mazda. A expectativa é de que o modelo além de ter autonomia e rendimento compatível com os melhores da competição, carregue duas pessoas.



Figura 14 – Carro solar intitulado Solaris (MACHADO, 2011).

Portanto, mesmo com a utilização da energia solar para mover os veículos frente às necessidades dos centros urbanos, ainda exigir pelo menos dez anos de desenvolvimento, esta forma de energia como alternativa já está bem presente. Tem-se como exemplo casas, estações de ônibus e trens, aviões e até prédios que são majoritariamente abastecidos pelo sol. E esta realidade se torna cada vez mais presente também para os carros comerciais. Em alguns veículos a energia solar já pode ser utilizada junto de outras formas de geração; os carros citados Toyota Prius e Fisker Karma, já possuem o opcional de teto fotovoltaico, ligado ao sistema de climatização interna.

No mercado já existe o Eclectic (RUFFO, 2007), carro urbano para três pessoas fabricado pela Venture e vendido pelo preço de aproximadamente U$ 20.000 dólares. Segundo o fabricante, o veículo tem capacidade para 50 km, e cada 0,8 m^2 de placas fotovoltaicas competem diariamente um ganho de dois quilômetros, o que renderia um litro de gasolina semanal nos carros mais econômicos.

3.4 KERS

O sistema regenerativo mais conhecido é o chamado KERS *(Kinetic Energy Recovering System)*, que realmente marcou a inovação neste segmento. Como o próprio nome sugere, se utiliza da energia cinética do automóvel, mais especificamente das rodas, para produzir energia elétrica. Ele foi mostrado pela primeira vez no campeonato automobilístico mundial de Fórmula-1 no ano de 2009, proporcionando ao carro ganho instantâneo de potência.

O funcionamento se baseia no fato de que a energia não pode ser criada ou destruída, mas pode ser transformada. Quando você diminui a velocidade de um carro, as rodas passam

a girar por pura inércia do veículo, contendo grande energia cinética, os freios quando utilizados dissipam esta energia em forma de calor de modo a parar o veículo. O sistema adota maneiras para captar uma parcela desta energia que seria normalmente dissipada, da forma mais eficiente possível.

Existem diferentes tecnologias envolvidas no sistema KERS por diferentes fabricantes. Um deles é a Flybrid, que pode ser observado na Figura 15 (TONI, 2009), cujo sistema é baseado em um volante acoplado por embreagem a um câmbio CVT, ligado ao câmbio do carro. O volante, feito de aço e fibra de carbono, gira a mais de 60.000 rpm no vácuo, graças a uma câmara selada para diminuir o atrito. O equipamento completo pesa 24 kg e é capaz de gerar até 60 kW (pouco mais de 81,5 cv). É o controle da relação das polias do câmbio CVT (Continuously Variable Transmission) que define quando o sistema armazena ou libera energia. Na desaceleração, o movimento é dirigido ao volante, que acumula energia cinética.

A tecnologia da Flybrid não é exatamente nova. A própria empresa explica que alguns veículos híbridos, como ônibus e alguns protótipos, já empregaram algo semelhante. No entanto, para a utilização em competições, o sistema foi melhorado, devido o uso de um volante muito leve que compensa a falta de massa com a altíssima rotação.

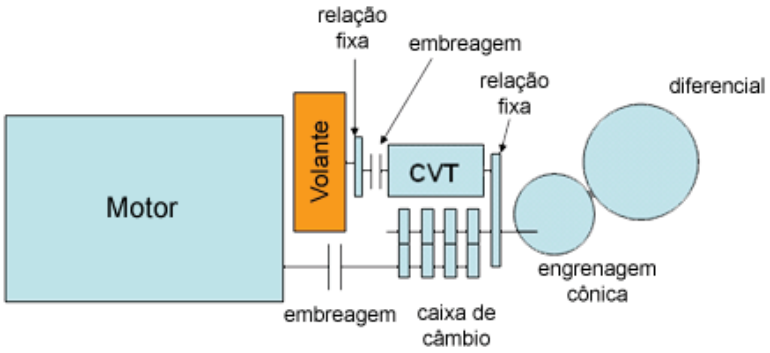


Figura 15 – Sistema KERS da Flybrid (TONI, 2009).

Outros sistemas podem usar de tecnologias diferentes, como o emprego de geradores, baterias (de íon-lítio) ou supercapacitores e motor elétrico para respectivamente produzir, armazenar e despejar potência extra.

Nos carros comerciais, o sistema KERS não é projetado como os de Fórmula-1 para despejar potência extra, e sim para levar esta potência às baterias buscando o aumento da autonomia total de uso, porém se utilizam de princípios semelhantes, já empregados na maioria dos modelos mais recentes. Entre eles estão o Nissan Leaf, o Chevrolet Volt, o Ford

Fusion Hybrid, outros já citados como o Tesla Roadster, o Fisker Karma e diversos protótipos em desenvolvimento, sendo ainda mais comuns em veículos de transporte coletivo. De modo que, sempre que mencionado o desenvolvimento de um carro elétrico, o sistema KERS de regeneração se faz presente, com alguns fabricantes prometendo até 40 % de maior sustentabilidade urbana.

4 DESENVOLVIMENTO DA PROSPOSTA DO TRABALHO

Tendo como referência a necessidade da criação de formas alternativas de energia e inspirado nas tecnologias mais recentes, cujas algumas foram citadas no capítulo anterior, o presente trabalho desenvolve um estudo da proposta de se aproveitar a energia dissipada por conjuntos de suspensão automotiva, objetivando-se na viabilidade destas de se tornarem também meios a favorecer os veículos elétricos de forma limpa e sustentável. Sendo esta possibilidade explorada a fim de se conceber um ponto de partida para o desenvolvimento de um sistema regenerativo, mais especificamente proveniente dos componentes de amortecimento destas suspensões, que são exaustivamente solicitados, para também agirem como geradores.

Em vista disto, toma-se como referência o trabalho intitulado *Estudo de amortecedores regenerativos por indução*, onde Oliveira (2010), exibe um método teórico baseado na indução eletromagnética proposta por Faraday-Lenz em meados do século XIX, aplicado a este objetivo pelo modo de operação dos amortecedores modernos. Desta forma, tem-se aqui para a presente proposta, adotado como procedimento um método experimental de mesma natureza; competindo, posteriormente ao término do mesmo, uma análise tanto do experimento, quanto da utilização da teoria até então elaborada, realizando por meio dos dados a conclusão em vista do objetivo apresentado.

Contudo, cabe agora entender melhor o que será aqui também chamado de amortecimento regenerativo, que tem seu modo de funcionamento básico por meio das solicitações dos amortecedores em consequência das vibrações e perfis de pista a eles submetidos. Com isso faz-se conveniente a este ponto uma breve definição dos modelos convencionais, de modo a introduzir a sua função e importância, e como suas características podem ser utilizadas objetivando a proposta aqui apresentada.

4.1 Suspensão automotiva e amortecedores

Apesar de todos os avanços ocorridos e esperados na área automobilística, muito focado no tipo de propulsão que impulsionaria as rodas, não menos importante e comum aos modelos de diferentes motores foram os sistemas de suspensão e amortecimento.

Com a evolução do automóvel no decorrer das décadas, este passou a ganhar grandes velocidades e as suspensões automotivas também precisaram evoluir para absorver as saliências da pista de rolagem e desníveis naturais, mantendo a segurança e conforto. Porém,

o sistema de suspensão continuou tendo sua funcionalidade simples, e os amortecedores, juntamente com as molas, são os componentes principais neste quadro.

Focando-se no amortecedor, componente chave da proposta do trabalho, sua principal função consiste na dissipação da energia que provém das molas, sendo que até a mais uniforme rolagem, ou a mais perfeita pista faça com que seja necessário este controle da energia vibracional. Isto se deve ao trabalho que a suspensão do automóvel exerce para manter as rodas em contato direto com o solo, sem deixar que as imperfeições deste sejam transferidas para a carroceria do veículo e mesmo para que perfis de respostas dinâmicas sejam considerados seguros para os ocupantes. Esta característica, além do conforto, é crucial para a estabilidade e adequada resposta em frenagens e acelerações.

Hoje, são mais difundidos os amortecedores telescópicos, conforme ilustrado em corte na Figura 16, onde o sistema de dissipação compreende uma haste com êmbolo, com fase de distensão e de compressão, prevenindo que o conjunto atinja frequências ou até mesmo amplitudes que comprometeriam o funcionamento adequado e a segurança frente aos espectros de perfil e excitação do solo.



Figura 16 – Amortecedor telescópico (HARRIS, 2007).

4.2 Solicitações de terreno

Todo movimento de um veículo sobre uma superfície define um espectro de excitação. Em uma suspensão, a partir dos parâmetros considerados para o projeto, pode-se pré estabelecer que o conjunto possa aceitar ou rejeitar diferentes faixas de frequências desses

espectros. Logo, a suspensão moderna, além de componente indispensável à segurança e desempenho, também atua como filtro mecânico.

Um veículo passando sobre um terreno está sujeito a um grande número de vibrações que podem ser transmitidas de forma visual ou auditiva (ruído). Segundo Hernalsteens (2006), os espectros de frequência visual que comumente são verificados correspondem de zero até 25 Hz e os espectros de ruído, são compreendidos entre 25 e 20000 Hz. Porém ambas as categorias estão normalmente interrelacionadas, tornando difícil considerá-las separadamente em uma só análise. Entretanto, as vibrações na faixa de ruído não têm o modo de amplitude como variável tão importante como na faixa visual.

A amplitude de oscilação varia de projeto para projeto, influenciada pela aplicação do veículo, peso envolvido e conforto ou estabilidade desejada. Geralmente ela está diretamente relacionada à amplitude do amortecedor, de modo que a deste último é projetada para ser seguramente maior, de forma que seja evitado um curso de distensão ou compressão menor que o exigido, causando o mau funcionamento frente às fontes de excitação.

As diversas fontes de excitação geralmente resultam de duas classes: perfil da pista e fontes internas. Dar-se-á ênfase aqui à primeira opção, já que fontes internas de vibração são um efeito de uniformidades do conjunto de suspensão que compreende roda e pneu, eixos, etc.; e não aplicável a finalidade deste trabalho.

Já o perfil de pista, considerado alguns aspectos, engloba desde buracos e lombadas resultantes de imperfeições localizadas a variações randômicas provenientes da imperfeição natural do solo. Por exemplo, um impacto em uma marcação de pista, ou sobre o conhecido *olho de gato*, podem ser modelados por excitação em onda quadrada. Um solo de calçamento ou de terra define um perfil totalmente randômico podendo ser de alta amplitude. A passagem por um obstáculo mais suave, como uma lombada, pode ser modelada por um período de uma cosenoide deslocada, com a vantagem de não haver descontinuidades. Outros perfis, como por exemplo, o do asfalto ou concreto, também podem ser modelados a partir de pontos interpolados, tendo seus espectros padronizados.

Uma das técnicas mais utilizadas para se obter este perfil é o PSD (Power Spectral Density), onde a elevação medida em uma distância pode ser decomposta pela série de Fourier em várias ondas senoidais que variam as amplitudes e fases. Entretanto este método não representa de modo satisfatório distúrbios localizados, geralmente obtendo-se uma distribuição normal da elevação de forma geral (HERNALSTEENS, 2006).

Contudo, para o objetivo deste trabalho, individualmente torna-se aceitável a modelagem dos perfis das solicitações comuns por senoides defasadas, já que podem ser

representados por característica de onda periódica, correlacionando os modos de excitações de solo, distúrbios e comportamento dinâmico, que se somam na excitação de uma suspensão dentro dos parâmetros possíveis de movimentação. Sendo assim, baseado no princípio de PSD e conhecendo-se as amplitudes e frequências envolvidas, diferentes perfis individuais podem ser criados, considerando os possíveis componentes de uma real solicitação, tornando crível adotar-se o método por ondas de diferentes frequências e amplitudes dentro dos limites verificados do conjunto.

> Em automóveis pode-se considerar o veículo como corpo rígido para frequências de até 15 Hz, acima disto há a possibilidade de que o sistema de suspensão não mais consiga isolar o chassi, onde o mesmo também começa a vibrar influenciando os resultados por esta vibração remanescente (HERNALSTEENS, 2006).

4.3 O amortecimento regenerativo

Dada a característica de um ímã permanente gerar campo magnético, movimentando-o pelo interior de um circuito, de forma a variar o fluxo deste campo pelo mesmo, segundo Oliveira (2011a), a lei de indução eletromagnética proposta por Faraday-Lenz pode ser atendida utilizando-se como excitação o movimento de amortecedores; e deste modo uma força eletromotriz, ou tensão, será gerada. Este é o princípio básico aqui utilizado para amortecedores regenerativos.

> Quando um fluxo magnético atuante varia no tempo de modo a modificar sua intensidade e sentido dentro de um solenoide, este apresenta uma força eletromotriz que corresponde à variação deste fluxo e às propriedades dos componentes, gerando uma corrente induzida, (OLIVEIRA, 2010).

Sendo assim, resumindo o que foi dito até aqui sobre suspensão automotiva, pode-se dizer de um modo sucinto que a característica principal de seu funcionamento consiste no movimento de vai e vem de seus componentes, ou vibração, pelo qual parte da energia que seria transferida à carroceria é absorvida pelas molas e dissipada pelos amortecedores, sendo mais comuns hoje em dia os conjuntos molas helicoidais e amortecedores telescópicos. Este último que como resposta apresenta um movimento relativo entre sua haste interna e o tubo externo, ou tubo de pressão, o que se verifica voltando à Figura 16. Essa característica, somada aos perfis de excitação proporcionados pela utilização de um veículo em um terreno,

permite que a hipótese de variação de fluxo magnético por deslocamento de componentes magnéticos seja possível, sendo adotada aqui experimentalmente. Ou seja, para um método de ensaio, uma haste com elementos magnéticos, se comportando como a haste de um amortecedor terá um movimento relativo a um circuito externo, este em analogia ao tubo de pressão do amortecedor, de forma a atender as possíveis relações de variações necessárias para ocorrer tensão induzida. Pela conclusão apresentada em Oliveira (2010), esta possibilidade é real e foi inicialmente considerada, como mencionado, por um modelo matemático, que pelo mesmo princípio de PSD, aproximou a movimentação de oscilação de um amortecedor com diversos componentes magnéticos e verificou-se teoricamente, mediante algumas considerações, que é possível gerar uma voltagem considerável.

Fundamentado nesta alternativa, o trabalho em questão exigirá um modelo de indução experimental baseado em um amortecedor telescópico, de modo a ser possível a excitação do primeiro semelhante ao do último, a fim de que, conhecendo melhor os sistemas de armazenamento de energia e o rumo pelo qual a indústria do automóvel e de fontes alternativas está tomando, seja verificada a viabilidade do método dentro das frequências e amplitudes envolvidas, analisando em princípio a possibilidade na função de geração de energia elétrica objetivando a sustentabilidade energética para os carros elétricos.

Para ilustrar o método do ensaio, na Figura 17 é exemplificado o procedimento utilizado de uma maneira mais intuitiva. À esquerda tem-se o movimento do amortecedor indicado pela seta dupla; percebe-se que a mesma característica de movimento se aplica à ilustração do lado direito, que se constitui o modelo indutivo. A parte inferior de ambos é considerada como componente fixo do sistema, ou seja, o tubo de pressão à esquerda e a bobina à direita não se movem e são tidos como referência ao movimento, cujos pelos interiores passam a haste interna e a haste magnética, ou magneto, respectivamente.

Deste modo, as características de movimento de um amortecedor aplicado ao modelo de indução gerará um sinal elétrico que será analisado por um sistema de captação adequado.

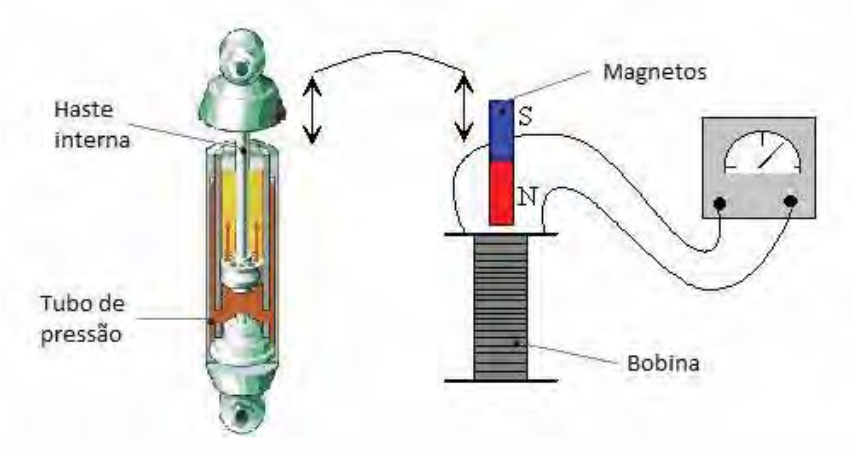


Figura 17 – Analogia de movimento utilizada.

Verifica-se assim se esta característica apresentada por um conjunto de amortecimento torna-se efetiva para a indução eletromagnética em solicitações teóricas de pista, de modo a se constituir um sistema de regeneração, ou fonte alternativa de energia, com a abordagem adotada dentro de um projeto voltado a este objetivo.

4.4 Apresentação do método teórico e correlação de variáveis

Portanto, no método apresentado por Oliveira (2010), intitulado *Estudo de amortecedores regenerativos por indução*, é desenvolvido uma série de equações objetivando o cálculo dinâmico da tensão induzida por modelos de amortecedores regenerativos de forma também análoga ao exibido na Figura 17, a fim de concluir que as mesmas possuem intensidades suficientes para serem utilizadas para regenerar baterias, dentre outras possíveis aplicações; para isto foram adotadas pelo método algumas variáveis como dados de entrada, de acordo com a Figura 18, com o mesmo princípio que é aqui adotado nos processos práticos a serem efetuados.

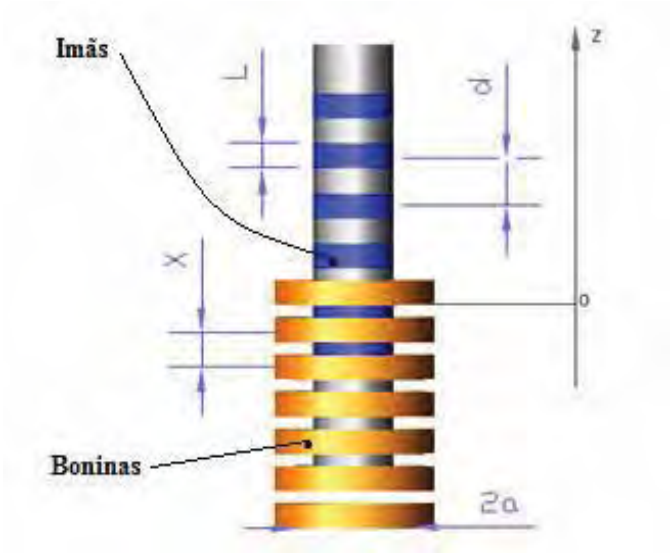


Figura 18 – Modelo de indução como adotado na teoria (OLIVEIRA, 2010).

Percebe-se que o modelo que pode ser obervado na Figura 18 possui a correlação citada no item 4.3. Logo, baseado neste, como conclusão do método teórico tem-se a equação (1), desenvolvida para um imã gerando um fluxo magnético captado por uma quantidade de bobinas ligadas em série, atribuindo como excitação o perfil de movimentação do amortecedor, em sua amplitude e frequência competindo o movimento relativo entre as partes.

$$V_z = \left(\frac{3\mu_0 N.m.a^2}{2}v\right)\left(\frac{z}{\left(a^2+z^2\right)^{5/2}}+\frac{z+X}{\left(a^2+(z+X)^2\right)^{5/2}}+\frac{z+2X}{\left(a^2+(z+2X)^2\right)^{5/2}}+\ldots+\frac{z+nX}{\left(a^2+(z+nX)^2\right)^{5/2}}\right) \quad (1)$$

Deste modo, para um melhor entendimento entre a teoria utilizada e a prática aqui executada, faz-se necessário uma leve introdução às variáveis presentes, já as relacionando aos dados de modo de excitação e de conjunto da bancada a serem utilizadas no método experimental.

No primeiro parênteses têm-se os dados de entrada referentes ao componentes magnéticos que compõem a haste oscilante.

- *d:* distância dos imãs entre seus centros, medida de modo similar às bobinas.
- *m*: Dipolo magnético. Segundo a literatura, esta grandeza depende da dimensão dos imãs e possui respaldo fundamentado na utilização de cargas elétricas gerando corrente em bobinas simples. Deste modo, para demais cálculos, *m* terá um valor adotado segundo tentativas junto dos dados experimentais, cuja

justificativa será apresentada no item 6.5, de modo que esta grandeza não é um valor definido pelo sistema ou pela literatura.

Ainda no primeiro parênteses, tem-se que uma das variáveis que define o fluxo de campo magnético pela bobina é a velocidade *v*, esta provinda do movimento de oscilação contínua da haste magnética, ou seja, da excitação adotada, tomada uma bobina como referência fixa; esta referência citada pode ser observada ainda na Figura 18, feita a partir da base da primeira bobina, ou seja, na origem do eixo *z*. Portanto, *v* é definida pela derivada no tempo do deslocamento, considerado como movimento harmônico simples (MHS), de acordo com a equação (2).

$$v(t) = - \omega.A.sen(\omega.t + \Phi_0) \quad (2)$$

Onde:

$\omega = 2\pi f$ e f é a frequência de excitação atribuída ao sistema.

A: Amplitude do movimento da haste magnética relativo às bobinas.

Φ_0: Ângulo inicial do movimento. Este pode ser considerado como zero, pois a mudança de valor deste modificaria somente a fase do sinal gerado.

Também é levado em consideração para o cálculo desenvolvido, o posicionamento dos imãs individualmente, compondo a haste magnética, com a posição instantânea de cada um em função do deslocamento no tempo, a partir de um ponto inicial. Esta verificação se torna importante mais para que se defina a equação (2) por derivada. Porém, uma escolha de posicionamento inicial inadequado pode conferir ao método uma movimentação que na prática seria impraticável, como por exemplo, a haste ultrapassando o limite físico real do modelo, ou ocasionar um fluxo magnético comprometido pelo distanciamento exagerado de alguns imãs.

Contudo, o deslocamento ao longo do tempo também é função da amplitude de movimento, e da velocidade angular de excitação.

$$x(t) = A.\cos(\omega t) \quad (3)$$

A aplicação ao longo do tempo da equação (3) considerando o posicionamento mencionado, define na teoria z(t), na equação (4).

$$z(t) = z_0 - x(t) \quad (4)$$

Esta corresponde à posição instantânea, valor de entrada z, referente a um dado imã em relação ao centro de uma dada bobina, termo presente no segundo parênteses da equação (1), de modo que z_0 corresponde à posição inicial do mesmo, tido a mesma bobina como referência. A nomenclatura z faz menção ao eixo que foi adotado, pois no desenvolvimento teórico este é o eixo por onde o modelo de indução se movimenta que na prática corresponde ao eixo axial do mesmo.

Logo, dá-se continuidade aos dados de entrada utilizados no equacionamento:

- *n = número de bobinas – 1*. Pelo exemplo do modelo da Figura 18, adotam-se sete bobinas, que corresponde a um *n = 6*.
- *N*: Número de voltas de cada bobina.
- *X*: Distância entre as bobinas, que compreende a distância entre os centros de duas bobinas.
- a: Raio da bobina.

Para o término das variáveis necessárias, tem-se:

- μ_0: Permeabilidade magnética. Quando o meio é o ar adota-se este valor em $4\pi.10^{-7}$ H/m.

Vale mencionar que a equação (1) é aplicada o número de vezes de acordo com o número de imãs. Por exemplo, para uma haste magnética que possui um total de dez imãs, o equacionamento corresponde a dez cálculos baseados na equação (1) e nos dados definidos, tendo cada um uma posição inicial z_o diferente, gerando uma voltagem V_z que se soma ao todo, ou seja:

$z_o, z_o^{I}, z_o^{II}, z_o^{III}, z_o^{IV}, z_o^{V}, z_o^{VI}, z_o^{VII}, z_o^{VIII}, z_o^{IX}$, proporcionando:

$$V_{total} = V_z + V'_z + V''_z + V'''_z + V^{IV} + V^{V} + V^{VI} + V^{VII} + V^{VIII} + V^{IX}$$

A fórmula base então, para a tensão induzida por um imã em sete bobinas passa a ser:

$$V_z = \left(\frac{3\mu_0 N.m.a^2}{2} v\right)\left(\frac{z}{\left(a^2+z^2\right)^{5/2}} + \frac{z+X}{\left(a^2+(z+X)^2\right)^{5/2}} + \frac{z+2X}{\left(a^2+(z+2X)^2\right)^{5/2}} + \frac{z+3X}{\left(a^2+(z+3X)^2\right)^{5/2}} + \ldots\right)$$
$$\left(\ldots + \frac{z+4X}{\left(a^2+(z+4X)^2\right)^{5/2}} + \frac{z+5X}{\left(a^2+(z+5X)^2\right)^{5/2}} + \frac{z+6X}{\left(a^2+(z+6X)^2\right)^{5/2}}\right) \quad (5)$$

Onde para cada equação desta, $z = z_0 - x(t)$. Com z_0 correspondendo a posição inicial do imã em questão em relação à referência. Deste modo, no processo de cálculo teórico os valores de posicionamento inicial devem ser adotados, ou conhecidos.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Fundamentado então no já citado trabalho de Oliveira (2010), cujas principais disposições compõem o item 4.4, dá-se prosseguimento ao método experimental, de modo que um modelo é aqui desenvolvido para análises por ensaios de bancada, proporcionando as reações e respostas indutivas dinamicamente.

Para a execução dos ensaios, todo o procedimento foi estudado a fim de que se tenha uma referência frente aos limites das solicitações reais de uma suspensão e do equipamento utilizado. O perfil de solicitação adotado corresponde as oscilações em movimento harmônico simples (MHS), com as frequências consideradas com limite de 15 Hz, segundo as disposições do item 4.2. O tamanho físico do modelo de indução será baseado no tamanho de alguns amortecedores convencionais, consultados de carros populares, sendo alguns como mostra a Figura 19.



Figura 19 – Modelos de amortecedores populares.

Deste modo, com base em medições efetuadas diretamente em alguns destes modelos, conclui-se que as dimensões utilizadas para a confecção do modelo de indução experimental seriam:

- Haste interna de aproximadamente 150 mm de comprimento e de 16 a 26 mm de diâmetro,

- Tubo externo com comprimento útil em média, semelhante ao comprimento da haste, porém com diâmetro de 33 a 54 mm.

- Amplitude máxima de movimento da haste de 120 a 130 mm.

As amplitudes que serão utilizadas como fonte de excitação, de modo a conferir uma gama maior de perfis ao procedimento sem fugir ao que realmente ocorre em uma solicitação real, foram consultadas por meio de um catálogo da empresa fabricante de amortecedores Monroe (Anexo B), com a devida permissão da mesma. Verificou-se que os valores correspondentes ao curso dos modelos se encontram na faixa de aproximadamente 110 mm para veículos mais baixos até por volta de 260 mm para veículos de grande porte. Tendo isto como referência, primeiramente se concluirá o desenvolvimento do modelo de indução, e posteriormente os componentes de acionamento para conferir o movimento ao mesmo e a bancada de ensaio.

5.1 Projeto do modelo de indução eletromagnética

Inicialmente, a ideia de um amortecedor trabalhando deve ser transportada para a bancada de ensaio de uma forma simples e conclusiva. De acordo com Oliveira (2010), para maximizar a força eletromotriz induzida, é necessário uma série de imãs compondo a haste interna, chamada aqui de haste oscilante ou haste magnética, que por sua vez terá a liberdade de se mover axialmente dentro de um conjunto de bobinas, conforme ilustra a Figura 20. Os espaçadores são elementos móveis não magnéticos da haste que proporcionarão aos imãs ficarem a uma distância predefinida um dos outros ou não, conferindo a versatilidade de se obter diferentes configurações. Também servem de complemento para o comprimento escolhido da haste.

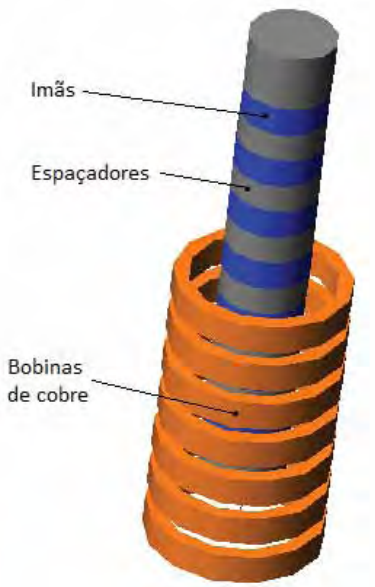


Figura 20 – Modelo para indução eletromagnética (OLIVEIRA, 2010).

Tendo as bobinas como referência fixa, a haste magnética é livre para oscilar axialmente; o passo seguinte então foi a escolha do tipo de imã que seria utilizado. Após algumas pesquisas, foram escolhidos imãs de *neodímio*, dado a sua natureza extremamente forte como magnetos, possuindo a possibilidade de dimensões e formatos variados, não havendo o risco de que as solicitações nos ensaios quanto à temperatura e esforço mecânico ultrapassassem os limites que os mesmos podem suportar; para os quais cabe uma breve introdução.

5.2 Imãs de neodímio e haste magnética.

De acordo com Wikipedia (2010), o ímã de neodímio (também chamado de ímã de neodímio-ferro-boro, ou imã de terras raras) é um imã feito a partir de uma combinação destes mesmos elementos, com configuração $Nd_2Fe_{14}B$, e são muito utilizados em motores elétricos, fones de ouvido e discos rígidos. Estes imãs possuem um forte campo magnético em comparação a sua massa, mas também são mecanicamente frágeis e perdem seu magnetismo de modo irreversível em temperaturas acima de 120 °C. Devido ao seu custo mais baixo, eles têm substituído os imãs de samário-cobalto na maioria das aplicações, que são ligeiramente mais fracos, porém bem mais resistentes em maiores temperaturas. Sua intensidade pode ser medida pelo seu produto energético máximo, em megagauss-oersteds (1 MG.Oe = 7,957 kJ/m³). Essa intensidade varia de 12 a 15, nos ímãs aglomerados de neodímio (bonded magnets) e de 24 a 54 nos ímãs sinterizados, e há um constante trabalho para aumentar essa energia até que um limite de cerca de 60 MG.Oe seja alcançado. Comparativamente, para alcançar a mesma força de um imã de neodímio, como o exibido na Figura 21, usando imãs de cerâmica é necessário um volume 18 vezes maior de material deste último.



Figura 21 – Imã de Neodímio (INOVAÇÃO TECNOLOLÓGICA, 2011).

Dando prosseguimento à confecção do modelo, cabe a escolha das dimensões da haste magnética. Seguindo o tamanho das hastes internas apresentadas pelos amortecedores de referência, optou-se por fazê-la com comprimento de aproximadamente 150 mm, mas com a possibilidade de pelo menos três configurações diferentes de posicionamento dos imãs. Deste modo, por meio da empresa "Equipamentos Magnéticos Veria", especializada na fabricação destes imãs, optou-se pela compra de dois conjuntos, ambos cilíndricos com 22,4 mm de diâmetro externo e um furo interno de 4 mm de diâmetro, cuja necessidade será mostrada mais adiante.

Sendo:

- 6 imãs com comprimento de 20 mm
- 10 imãs com comprimento de 10 mm

Cujas propriedades magnéticas correspondem a:

- Remanência, Br = 12800 Gauss
- Coercividade, Hc = 11500 Oersted
- Energia, BHmáx = 42 MG.Oe

Os espaçadores foram feitos de polímero de nylon, com comprimento de 5 mm e diâmetro externo e interno iguais aos dos imãs, o que utilizados na mesma quantidade dos mesmos conferem 150 mm de haste.

Tendo-se definido estas dimensões, pode dar-se prosseguimento na parte externa para indução.

5.3 Tubo externo e enrolamento de bobinas

Para a construção externa, se faz necessário um segmento cilíndrico oco com a máxima permeabilidade magnética, que é importante para que o máximo de linhas do campo magnético chegue às bobinas que serão enroladas pelo lado de fora do mesmo; bem como possuir boa resistência mecânica para que o conjunto tenha rigidez suficiente para fixação.

Optou-se então por um segmento de tubo de fibra de carbono de aproximadamente 150 mm de comprimento, 34 mm de diâmetro externo e 33,2 mm de diâmetro interno, onde os solenoides serão enrolados e por onde passará a haste magnética respectivamente, semelhando ao exibido na Figura 22.

A fibra de carbono não possui propriedades magnéticas podendo ser considerada transparente para o campo dos imãs. Assim a bobina teria diâmetro interno já definido de iguais 34 mm e o máximo de fluxo magnético durante os ensaios.



Figura 22 – Seção do tubo de fibra de carbono.

Por conseguinte inicia-se o processo de enrolamento das bobinas, que para o experimento foi adotado sete solenoides com 250 voltas cada um, comprimento individual de 20 mm e espaçados entre si em 5 mm, ligados em série coforme ilustra a Figura 23. Baseando-se no que o método teórico utiliza.

Os fios utilizados foram AWG-24, que têm diâmetro próximo de 0,5 mm, o que proporciona um bom tamanho total da bobina e resistência elétrica interna razoável, por volta de 85 Ohms/km.



Figura 23 – Seção com bobinas em série de fios AWG – 24.

5.4 Sistema de acionamento

A haste magnética do modelo deve ter a liberdade de oscilar dentro do tubo de fibra de carbono, contudo seu movimento deve ser restrito ao eixo axial, não podendo haver a possibilidade de apresentar componentes de movimento muito diferente do que é verificado em um amortecedor convencional. O passo seguinte foi tornar isso o mais executável possível utilizando-se de uma só bancada, definindo o sistema para conferir o movimento esperado por dentro do tubo ao modelo. Para isto, optou-se por um sistema de biela e manivela, que confere um movimento oscilatório harmônico como considerado no item 4.3 e de acordo com o inicio deste capítulo. Permanecendo as bobinas e o tubo de fibra de carbono imóvel e como referência, presos à bancada.

Para o movimento dos modos de excitação, levou-se em consideração a literatura e à introdução do capítulo quatro, de modo que haja a possibilidade de se utilizar diferentes amplitudes para diferentes frequências até o limite pré-definido. Sendo que demais restrições poderão ser verificadas em bancada após ensaios preliminares.

Deste modo, para as amplitudes definiu-se que o valor mínimo e máximo corresponderia aproximadamente à metade do curso dos que foram encontrados em média segundo o catálogo de amortecedores anexo. Sabendo que um amortecedor é raramente exigido em todo o seu curso, consideração esta que se torna fundamentada diante de uma utilização normal.

O sistema contará com a possibilidade de excitação então em amplitude mínima de 50 mm, tendo no máximo 130 mm, o que é aceitável para as dimensões do modelo de indução construído. A Figura 24 ilustra o sistema de biela e manivela que inicialmente foi projetado.

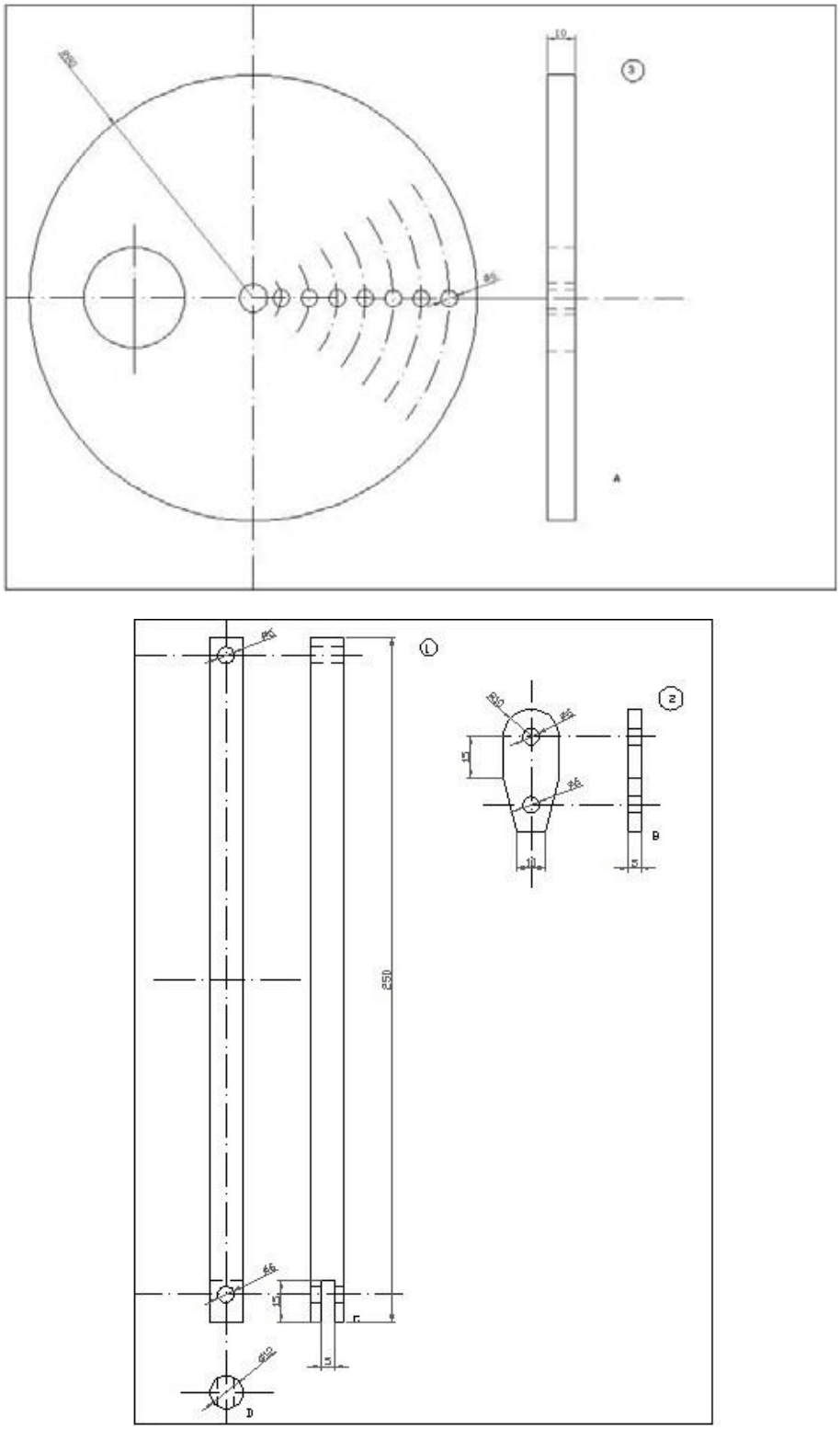


Figura 24 – Projeto inicial do componente biela (*abaixo*) manivela (a*cima*).

Este sistema além de conferir o movimento ao modelo de indução nas frequências adotadas, pois é composto de uma roda manivela que se ligará a um eixo girante, terá como característica principal a possibilidade de modificação das amplitudes como necessário, por

meio de furos na roda manivela, que se distanciam radialmente de seu centro aumentando deste modo o raio de giro; transferindo este movimento por meio da biela à haste, que por sua vez terá seu movimento oscilatório dentro do tubo fixo à bancada, competindo às bobinas a variação de fluxo magnético consequente do movimento.

A Figura 25 ilustra o projeto inicial da bancada, vista em três dimensões.

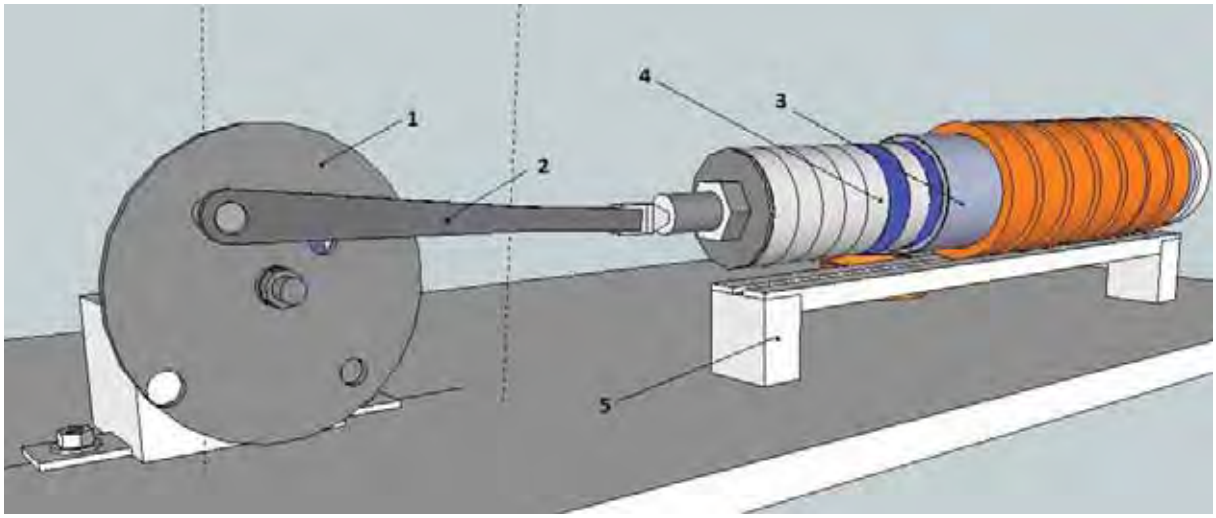


Figura 25 – Ilustração da bancada de ensaio.

Os números correspondem a:

1. Roda manivela com controle de amplitude e frequência.
2. Biela, que se liga a haste magnética.
3. Tubo das bobinas, por onde a haste efetua seu movimento e onde as bobinas são enroladas externamente.
4. Haste magnética composta por imãs e espaçadores.
5. Base de alinhamento do conjunto, onde o modelo se fixa.

5.5 Finalização do modelo indutivo e montagem da bancada

Tendo o projeto definido, cabe agora a construção do mesmo.

A haste oscilante deve ter característica rígida o suficiente para suportar os esforços de vai e vem dentro do tubo, logo, se optou pelos imãs com furo central, Figura 26, que é por onde passará um componente interno, que tracionado servirá para prender todos os componentes adequadamente e conferir a rigidez conveniente.

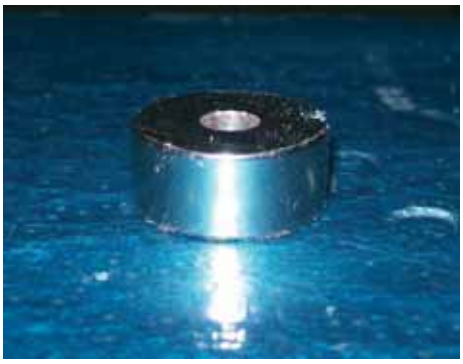


Figura 26 - Imã de neodímio cilíndrico com furo interno.

Para guiar o movimento por dentro do tubo, é importante que o espaço existente entre o diâmetro externo da haste e o interno do tubo não torne o movimento caótico, como citado no início do item 4.2. Para isso confeccionou-se dois componentes não magnéticos. Um pistão/êmbolo, que se faz necessário para que o deslizamento do mesmo pelo interior restrinja o movimento da haste no sentido axial, evitando assim que sua extremidade inferior fique solta demasiadamente; e um anel guia que se encaixará na extremidade superior do tubo, com diâmetro interno próximo do diâmetro externo dos imãs, entretanto ligeiramente maior para permitir a livre passagem dos mesmos, conforme ilustra a Figura 27.

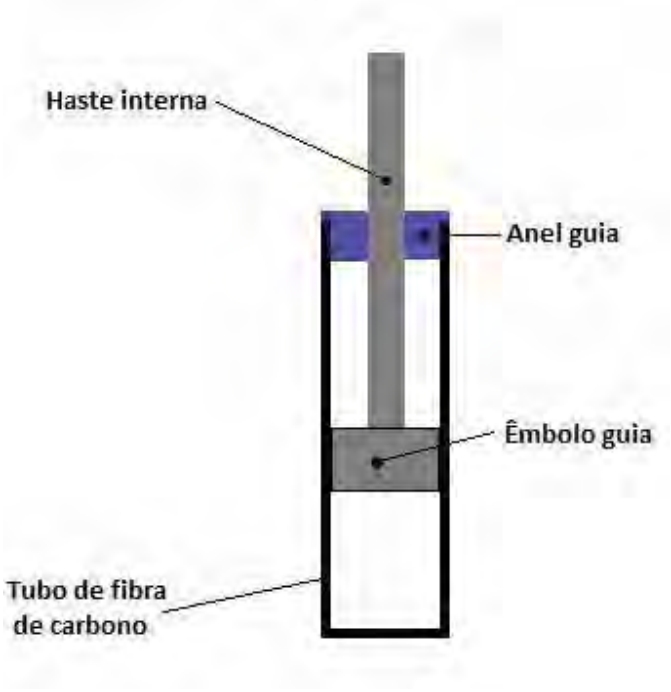


Figura 27 – Componentes guias para o movimento da haste.

O material utilizado em ambos foi o PVC (Policloreto de Vinila), tido como referência o diâmetro interno do tubo no qual serão enroladas as bobinas. Deste modo o êmbolo foi

usinado com diâmetro externo de 32 mm, para permitir o movimento adequado, e comprimento de 20 mm. O anel guia por sua vez possui diâmetro externo de também aproximadamente 33,2 mm para que se prenda bem à extremidade do tubo e com furo interno de 22,5 mm, o que permitiu uma livre passagem da haste magnética, limitando seu movimento até o encontro com o êmbolo, o que evita o desmonte do modelo.

O componente de tração interna para a haste magnética foi construído em aço, por meio de dois parafusos nas extremidades unidos por um segmento de cabo de aço, de modo a interferir o mínimo possível com o campo magnético dos imãs; além de obter em uma das pontas um terceiro parafuso que servirá de pino perpendicular para se ligar à biela, protegido por um cilindro confeccionado em nylon, que também confere um ponto de apoio aos imãs e seus espaçadores. Uma porca de material não magnético trava todo sistema.

Na Figura 28 está uma foto dos parafusos internos de tração ligados pelo cabo de aço (1), o êmbolo de PVC (2) e o parafuso que prende o sistema (3).

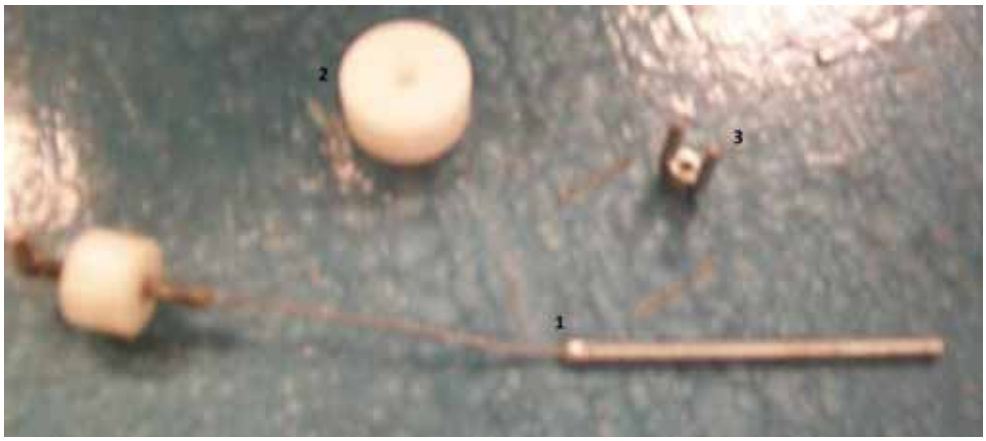


Figura 28 – Componentes da haste interna.

Com a montagem destes componentes, tem-se uma haste magnética que permite mudança de comprimento total, número e natureza dos imãs e ligação com a biela por meio de um parafuso soldado na perpendicular, como mostra a Figura 29.



Figura 29 – Haste magnética finalizada com imãs de 20 mm de comprimento.

A Figura 30 mostra o modelo indutivo montado, com visão em destaque para o anel de polímero na extremidade do mesmo, por onde a haste magnética é guiada e que impede que saia devido ao êmbolo interno inferior.

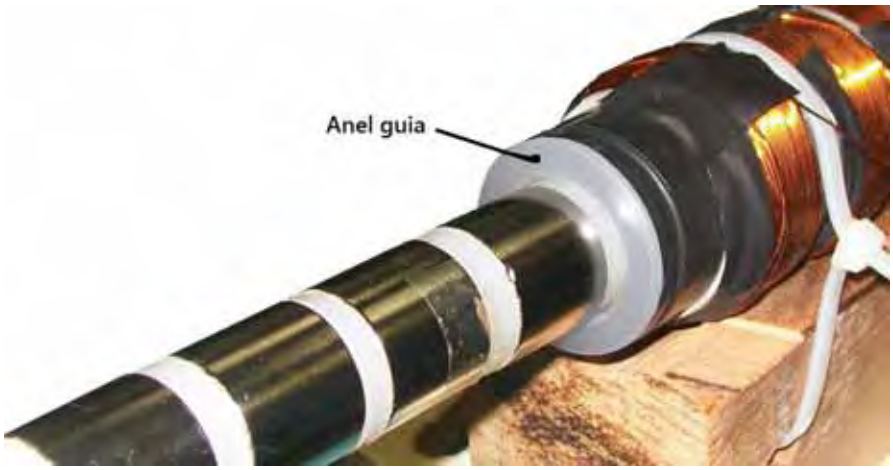


Figura 30 – Modelo indutivo finalizado com imãs de 20 mm de comprimento.

O processo posterior foi a construção e término do conjunto de acionamento, baseado no movimento da manivela, de acordo com as Figuras 24 e 25.

Para conferir o movimento a todo o sistema, a escolha mais prática foi o acionamento por meio de um motor elétrico com controle de frequência, que deverá proporcionar as excitações de forma adequada, sendo indicado como exemplo pelo número 1 ilustrado na Figura 31.

Devido a utilização de imãs no sistema, de forma óbvia o material para a biela e para a roda manivela não pode ser ferromagnéticos, escolhido assim o alumínio.

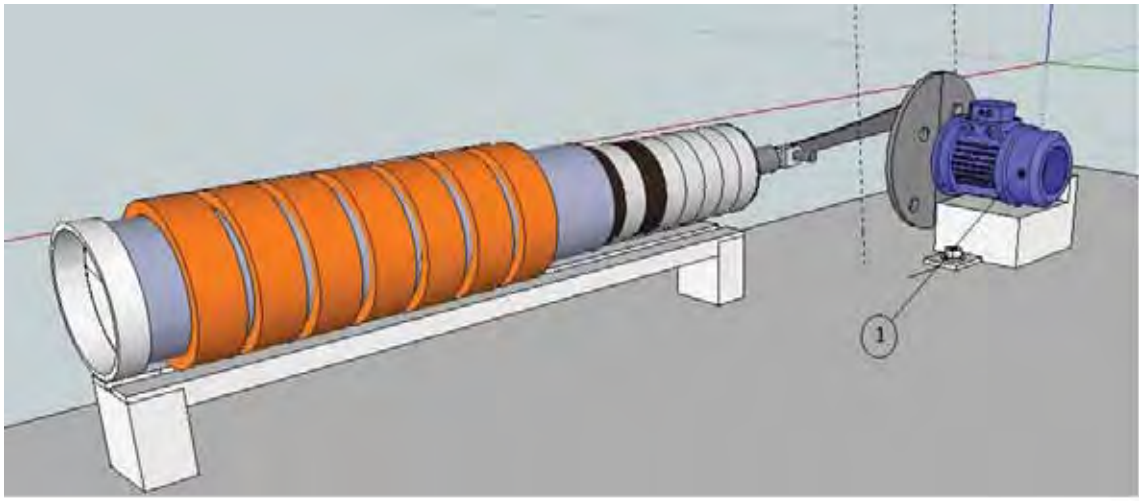


Figura 31 – Ilustração da bancada de ensaio.

Partindo deste pequeno projeto e analisando o funcionamento mais profundamente, ocorreram algumas mudanças em cima do desenho de projeto da Figura 24. No desenho referenciado *(abaixo)* na respectiva Figura, fez-se desnecessária a confecção da peça de número dois, que inicialmente foi projetada para a ligação da haste à biela, pois além de poder trazer problemas na fase de compressão do modelo, teria certa complexidade de construção perante o que se tem disponível; a peça número um foi confeccionada a partir de uma chapa de alumínio ao invés de um tarugo cilíndrico, o que se faz fiel à Figura 25 que ilustra de modo mais abrangente a bancada; No desenho referenciado *(acima)*, a roda de manivela passou a ter cinco ajustes ao invés dos sete, proporcionando a mudança de amplitude para 50, 70, 90, 110 e 130 mm respectivamente, com diâmetro total de 150 mm, 10 mm a menos que no desenho real em escala; também foi desnecessário o balanceamento da roda pela usinagem de um furo equivalente aos furos de amplitude. Com isso, além de ser mais simples de construir, todo o sistema de acoplamento ao protótipo de indução seria mais robusto.

Para finalizar a parte mecânica, arruelas de desgaste de polímero de nylon, iguais aos espaçadores que foram feitos para a haste, foram colocadas nos pinos de ligações para que não houvesse o desgaste de metal raspando em metal e também para diminuição dos ruídos no laboratório.

A Figura 32 mostra a montagem do sistema biela à roda manivela.

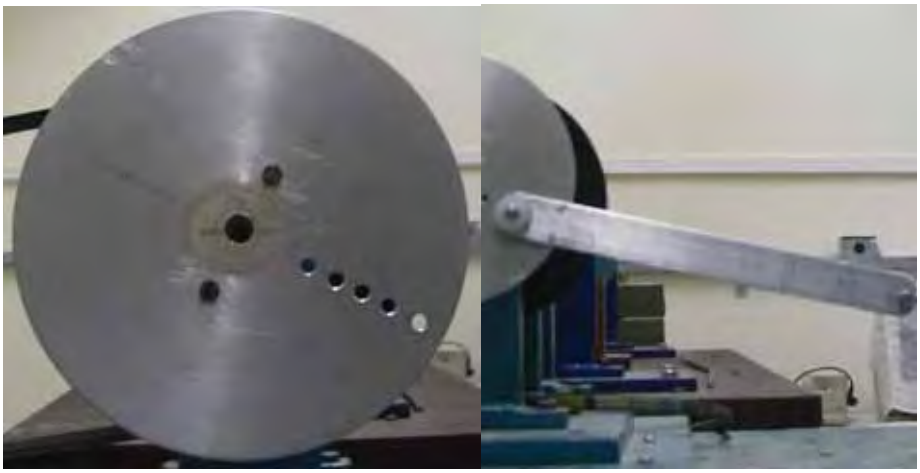


Figura 32 – Roda manivela *(esq.)*, biela com arruela de nylon *(dir.)*.

Com o sistema de transferência de movimento definido, desenvolveu-se o acoplamento do mesmo ao eixo motor que seria utilizado para acionamento. Este eixo liga-se por meio de uma polia a uma caixa de redução, que por sua vez está acoplada a um motor elétrico, sistema que não se fez presente na Figura 31, contudo, exibido na Figura 33. Este conjunto já estava disponível no laboratório e proporciona o ajuste da frequência para qualquer valor desde poucos hertz, que se faz muito necessário, até muitas revoluções por segundo, bem mais até que os 15 Hz de limite deste trabalho.



Figura 33 – Caixa de redução *(esq.)* polia ligada ao eixo *(dir.)*.

Medindo-se o diâmetro do considerado eixo motor da bancada, foi confeccionada uma bucha em PVC para acoplar a roda manivela ao eixo, e que se ajusta perfeitamente por leve interferência. Para prender a bucha à roda foram utilizados dois parafusos passantes presos

por porca que conferiram bastante confiabilidade ao sistema depois de alinhados e bem apertados, como se segue na Figura 34.



Figura 34 – Acoplamento de PVC. Vista lateral *(esq.)* perspectiva *(dir.).*

O acoplamento por simples interferência foi escolhido, pois as forças presentes são baixas em consequência da baixa resistência ao movimento que o modelo indutivo proporciona, tendo desta forma uma ínfima probabilidade do sistema ‘escorregar’ por excesso de torque ou outra variável qualquer no funcionamento, salvo por travamento do modelo, de modo a preservar a bancada, que se por algum motivo travar, o conjunto biela manivela se desacopla automaticamente do eixo evitando assim que forças extremas à bancada danifiquem os componentes principais.

Por fim, torna-se necessário o alinhamento do modelo para que tudo funcione eficientemente, por meio de uma base de dupla fixação, o que corresponde ao número cinco do projeto inicial da Figura 25. Depois de algumas medidas optou-se por uma base diferente a ali sugerida, feita em madeira, foi fabricada em ângulo que alinha-se ao eixo da manivela, contendo ainda uma ranhura para prender melhor as bobinas por meio de prendedores de plástico para qualquer eventual manutenção. A fixação à bancada foi feita por meio de dois parafusos de 15 polegadas, bancada esta de aço, própria para os ensaios de vibração, ficando a disposição final como se segue na Figura 35.



Figura 35 – Base de madeira presa à bancada.

Com os componentes de bancada montados conforme está na Figura 36, tudo foi ligado e a bancada testada. Revelando que todas as amplitudes da manivela e as frequências ajustáveis da caixa de redução respondem de maneira muito satisfatória. Sendo que para as maiores amplitudes, acima dos 90 mm, somente baixas frequências seriam utilizadas.

Contudo o sistema apresentou muita vibração acima de 6 Hz de modo geral, exigindo o limite superior ao máximo neste valor; já o limite mínimo foi definido em 2,43 Hz, número este por limitação própria da caixa de redução.

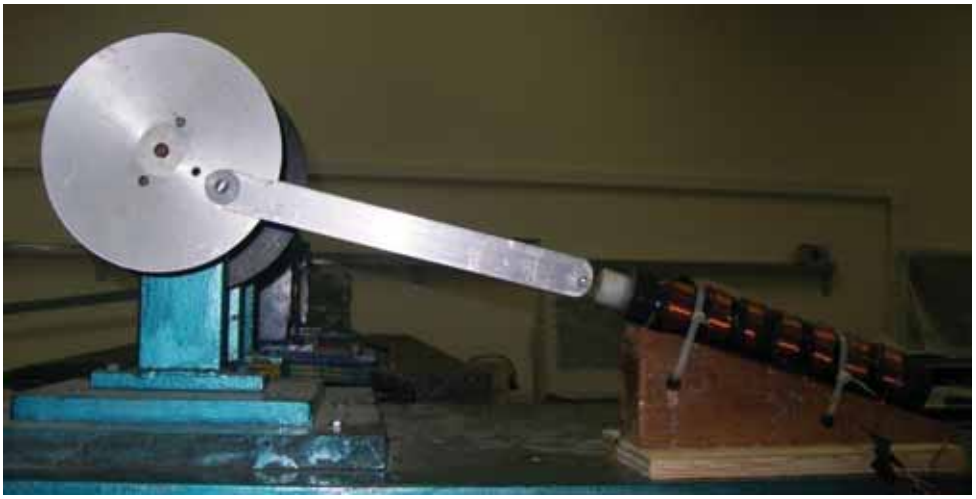


Figura 36 – Componentes mecânicos da bancada de ensaio.

5.6 Cuidados nas operações da bancada

Algumas questões devem ser levantadas nas operações da bancada, principalmente pela natureza dos imãs utilizados. Mesmo um pequeno imã é capaz de destruir o conteúdo de um disco magnético de modo que seja irrecuperável. Esses imãs são normalmente fortes o

suficiente não apenas para magnetizar as cores de televisores e monitores a base de CRT (Cathode Ray Tube), mas também para deformar fisicamente partes do monitor. Tipo de dano tipicamente irreparável simplesmente por desmagnetização.

Os imãs devem ser sempre manipulados cuidadosamente. Dependendo do tamanho podem ser considerados perigosos, sendo capazes de prensar a pele ou dedos quando atraídos por um objeto magnético. Por serem feitos por grãos e folheações, são frágeis e podem se partir em temperaturas superiores a 80 °C (WIKIPEDIA, 2010), ou se sujeitos a impactos com outro imã podem se quebrar. Quando eles quebram pedaços podem voar e causar danos aos olhos e pele, sem mencionar o prejuízo financeiro. Imãs desse tipo devem ser mantidos longe de aparelhos elétricos, cartões magnéticos, principalmente monitores, e manuseados longe de metais e outros imãs.

Em adição a isso, como o funcionamento da bancada é por meio de polias e correias ligadas a um motor elétrico, faz-se muito importante também o cuidado com os mesmos, já que as primeiras não possuem cobertura protetora.

5.7 Captação de dados

Para o sistema de captação dos dados, definiu-se a tensão como a grandeza de referência, sendo a partir dela calculada as outras grandezas importantes à análise deste trabalho, de modo que é conhecida a resistência interna da bobina utilizada, ou seja, o sistema de captação utilizado será utilizado com o objetivo de medir a tensão induzida a fim de se calcular a potência. Para isto foi empregada uma placa de aquisição da marca HBM, modelo Spider 8, que pode ser observada na Figura 37, aferida em voltagem pelo próprio fabricante.



Figura 37 – Sistema de aquisição Spider 8, fabricado pela HBM.

Para leitura e exposição dos dados adquiridos, tem-se o Software Catmaneasy AP 2.2, também desenvolvido pela empresa HBM, próprio para leitura correta dos sinais enviados pela referida placa de captura, além de proporcionar a possibilidade de juntar os dados em formatos variados, inclusive em Excel, aqui escolhido para apresentação dos dados e construção dos gráficos.

Para controle e visualização da frequência de excitação provinda da caixa de redução, foi utilizado um multímetro Minipa True RMS ET-2907, número de patrimônio 026294, devido a sua funcionalidade de trabalhar como frequencímetro em função do sinal captado, sendo ligado às extremidades da bobina. Para verificar a veracidade destas medições, também foi empregado um Tacômetro Eberly, número de patrimônio 13253, ótico e por contato, de modo que seus valores em RPM sirvam de comparação às rotações em hertz do frequencímetro, sempre que este último apresentar alguma incerteza quanto aos valores medidos.

Logo, as duas extremidades da bobina foram ligadas a um conector adequado que fornece o sinal induzido a um dos canais da placa de aquisição, e deste os dados são enviados ao software instalado em um notebook por meio de um cabo de conexão USB 2.0; o software por sua vez foi pré-programado para captar os dados de voltagem instantânea em intervalos de cinco segundos e salvá-los em formato Excel. Desta forma deu-se início aos ensaios. Entretanto, logo se percebeu que a voltagem máxima dos canais de entrada da placa de aquisição, que é limitada a 10 volts, poderia ser insuficiente para a tensão gerada pelo modelo de indução em alguns momentos; para isto fez-se necessário a montagem de um pequeno circuito de resistores, com a finalidade de ser utilizado quando a tensão induzida de pico estivesse a este nível, preservando assim o equipamento, como ilustra a Figura 38.

Sendo R_1= 6,8 Ohms e R_2 = R_3 = 8,2 Ohms, e ε correspondendo à bobina, fonte de tensão.

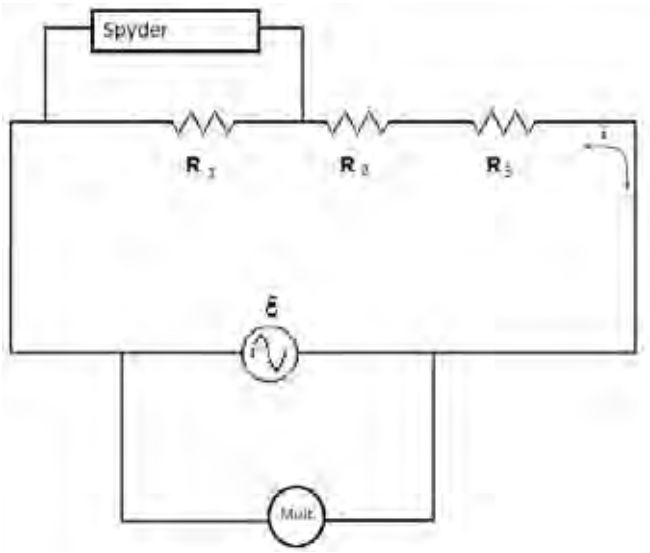


Figura 38 – Circuito para redução de tensão no sistema de aquisição de dados.

Quando necessário a utilização do circuito mostrado na Figura 38, optou-se por ligar a placa de aquisição as extremidades do resistor de menor valor, diminuindo assim consideravelmente a tensão avaliada. Sendo a partir daí necessário para análise, definir uma correlação de proporção da tensão nos resistores para obter-se o valor total de tensão gerado pela bobina, objetivo deste ensaio.

O circuito foi montado na base de madeira, como está mostrado na Figura 39.



Figura 39 – Circuito de resistores.

No processo de aquisição de dados, para todas as amplitudes de ensaio foi utilizada a faixa de frequência possível pelo equipamento. Sendo assim, para normalizar os resultados, foram utilizadas as frequências iniciais de 2,43 Hz, subindo para 4,00, 5,00, e 6,00, Hz respectivamente, verificando sempre a integridade do conjunto. Entretanto, uma vez necessário o uso do circuito de resistores, os mesmos continuam a serem usados até o fim do ensaio da configuração em questão, sendo dispensados somente no início de uma nova configuração de ensaio. A Tabela 1 apresenta as amplitudes e frequências que serão utilizadas para se verificar os dados de indução eletromagnética e a Figura 40 mostra os componentes até então citados, montados na bancada.

Tabela 1 – Modos de excitação do sistema.

Amplitude (mm)	**Frequência (Hz)**
50	2,43
	4,00
	5,00
	6,00
70	2,43
	4,00
	5,00
	6,00
90	2,43
	4,00
	5,00
110	2,43
	4,00
130	2,43

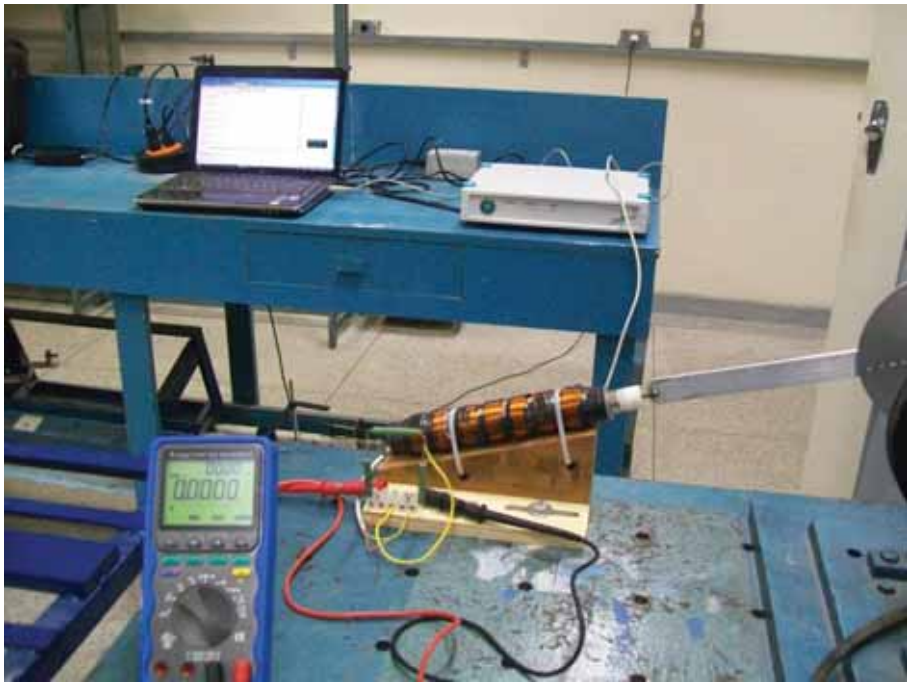


Figura 40 – Componentes montados da bancada de ensaio.

O tamanho de uma bobina influencia diretamente na corrente que é induzida, ou seja, uma maior área com mais enrolamentos por onde o fluxo magnético pode atravessar consequentemente gera maior energia (OLIVEIRA, 2010). Por este motivo, no presente trabalho a bobina será sempre a mesma, modificadas serão as implicações de movimento ao sistema, o tamanho dos imãs e espaçamento dos mesmos, a fim de se analisar dentro do aqui apresentado o comportamento para a aplicação desejada.

Logo, além dos modos de excitação definidos na Tabela 1, serão três as configurações utilizadas da haste magnética, todas totalizando uma haste de 150 mm de comprimento, definindo assim três modos ensaio:

1. Um composto pelos imãs de 10 mm de comprimento espaçados em 5 mm.
2. Um composto pelos imãs de 20 mm de comprimento espaçados em 5 mm.
3. Um último com os imãs sem espaçamento, se comportando como um só imã de 150 mm comprimento.

Para todas as configurações os modos de excitação seguem o definido na Tabela 1, salvo quando as frequências ou amplitudes envolvidas não sejam compatíveis com a rigidez do modelo ou mesmo do sistema como um todo.

Para o procedimento teórico, o posicionamento de cada imã deve ser conhecido de acordo com as considerações do item 4.4, que no presente caso estão exibidos abaixo, como mencionado cada um referenciado à primeira bobina. Para a primeira configuração de ensaio têm-se os posicionamentos iniciais:

z_o = -15 mm (-0,015 m)
z_o^{I} = 0 cm (-0,020 m)
z_o^{II} = 15 mm (0,015 m)
z_o^{III} = 30 mm (0,030 m)
z_o^{IV} = 45 mm (0,045 m)
z_o^{V} = 60 mm (0,060 m)
z_o^{VI} = 75 mm (0,075 m)
z_o^{VII} = 9,0 mm (0,090 m)
z_o^{VIII} = 10,5 mm (0,105 m)
z_o^{IX} = 12,0 mm (0,120 m)

Para os cálculos das demais configurações, este posicionamento será exibido diretamente no exemplo de exibição no layout do software wxMaxima (item 6.5), correspondendo respectivamente a z1, z2, z3, z4 e etc..

Devido à utilização dos imãs de neodímio, o valor de dipolo magnético de referência é adotado como *m* igual a 2,5 C.m para os imãs com o comprimento *L* de aproximadamente 10 mm.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

De acordo com o que foi definido no item 5.7, o primeiro modo de ensaio será efetuado pela configuração com os imãs de 10 mm; entende-se que esta configuração se comportará como a menos potente.

Os sinais captados pelo sistema em geral compõem um conjunto de aproximadamente 250 números, o que correspondeu aos cinco segundos de medição adotados e aplicados ao software, isto possibilita a análise por meio de dados numéricos e gráficos para visualização do perfil de solicitação e exposição eficaz dos valores medidos de tensão, grandeza de referência. Posteriormente ao ensaio dos imãs menores, o mesmo ensaio será efetuado para a configuração dois, terminando obviamente com a configuração três, que não se utiliza dos espaçadores.

Portanto, para cada modo de excitação medido será exibido um gráfico de tensão (V) por tempo (s), que corresponde ao perfil senoidal de resposta e de onde são verificadas a tensão de pico induzida no sistema.

Para análise, antes que seja efetuada uma avaliação conclusiva dos dados, a teoria apresentada no estudo de referência será comparada aos valores apresentados por meio do sistema de aquisição aqui empregado, de modo a entender melhor o método utilizado e a correspondência do mesmo aos ensaios de bancada.

Segue-se então a partir do próximo item a apresentação dos resultados para as diferentes configurações. Os perfis dos sinais induzidos para todos os ensaios compõem o Apêndice A, ao final deste trabalho, de modo que para cada configuração na presente análise, não se faz necessário exibir todos os perfis captados do padrão de resposta indutiva alcançado pelos ensaios.

6.1 Resposta indutiva da configuração 1 de ensaio e cálculo da queda de tensão

Pelo sinal exibido pela Figura 41, percebe-se o comportamento da tensão induzida, com valores de pico regulares devido à excitação em MHS do sistema.

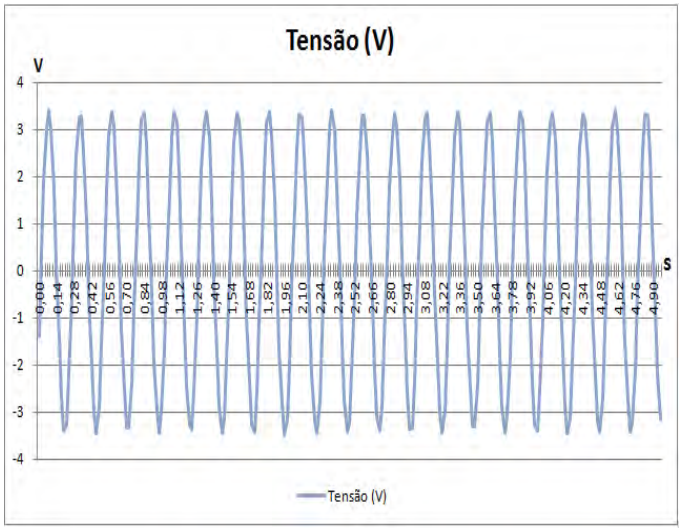


Figura 41: Configuração 1. Sinal com amplitude de 50 mm a 2,43 Hz.

Contudo, a partir da excitação de 70 mm a 5,00 Hz neste modo de ensaio, se verifica que o aumento da frequência ou da amplitude acarretaria o aumento da tensão de pico possivelmente além do limite pelo qual o sistema de aquisição é projetado e aferido. Em vista disto, para término das medições, o circuito resistivo passa a ser empregado, como já mostrado no item 5.7, definindo um sinal de menor amplitude captado conforme é exibido na Figura 42.

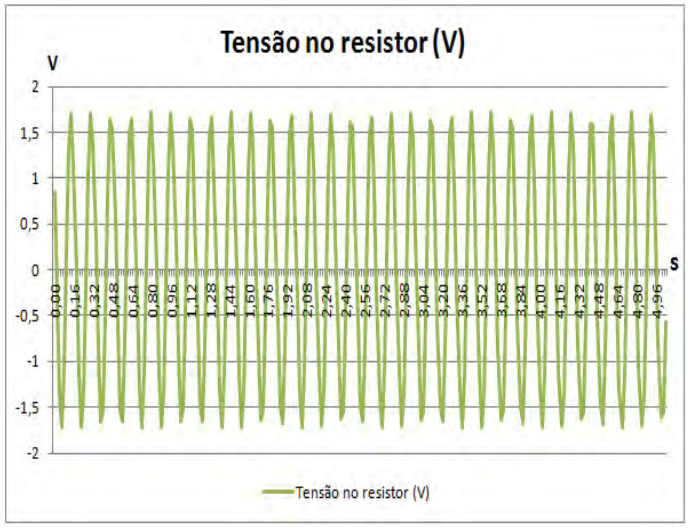


Figura 42 – Configuração 1. Sinal no resistor com amplitude de 70 mm a 6,00 Hz.

Com a utilização do circuito resistivo, é necessário mensurar a tensão real que a bobina está gerando, tendo como referência o sinal que provém do resistor de medição.

Para isto, basta saber que a corrente induzida (i) é a mesma nos resistores que se ligam em série, como já ilustrado na Figura 38. Deste modo, fundamentado na lei de Ohm, e

sabendo qual a tensão (V) e a resistência (R) do resistor em questão onde se faz a medição do sinal, a relação $i = V/R$ fornece a corrente do circuito, que por sua vez pela mesma relação fornece a tensão nos demais resistores, que somadas correspondem à tensão total na bobina.

Logo, conhecendo os valores da resistência dos resistores e qual deles se liga a placa de aquisição, com a aplicação da relação de Ohm citada acima, é possível a obtenção de uma simples equação onde a tensão na bobina tem como única variável a tensão medida no resistor. Sendo assim, sabe-se que se utilizou de um total 23,2 Ohms divididos em três resistores; dois de 8,2 Ohms e um no qual são efetuadas as medições, de resistência igual a 6,8 Ohms. Cuja equação se faz abaixo, onde V corresponde a tensão da bobina e V_{medido} a do resistor.

$$V = V_{medido} \times \frac{23,2}{6,8} \tag{6}$$

$$V = V_{medido} \times 3,41 \tag{7}$$

Tendo esta proporção estabelecida, a sua aplicação em todos os pontos do sinal de tensão no resistor fornece o sinal calculado para a bobina. Como se segue na Figura 43.

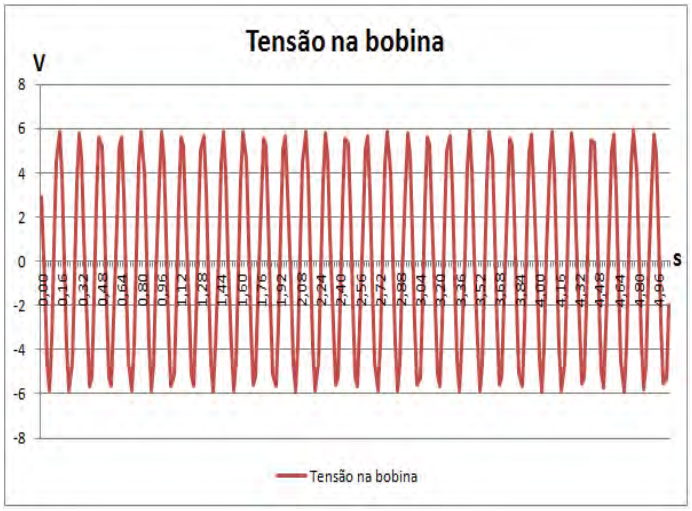


Figura 43 – Configuração 1. Tensão na bobina com amplitude de 70 mm a 6,00 Hz com resistor.

Porém, analisando os dados do sinal, verifica-se que o valor que se esperava perto dos dez volts foi na verdade ainda menor que seis volts, concluindo que a adição do circuito diminuiu consideravelmente a corrente induzida, que pela lei de Ohm, de modo recíproco diminui a tensão total no sistema. Deste modo, torna-se importante definir também uma relação desta queda de tensão sempre que as medições sejam feitas com a utilização do

circuito resistivo. Para isto os cálculos são efetuados tendo como referência a tensão efetiva direta do sinal, devido à característica senoidal dos mesmos, que por sua vez permite que outras grandezas possam ser calculadas. Vale mencionar que o mesmo procedimento poderia ser feito diretamente com o valor de pico do sinal primário, ou seja, do resistor, o que mudaria apenas a ordem dos cálculos sem modificar o resultado.

Dando prosseguimento à análise, na finalidade de se mensurar a queda de sinal que os resistores atribuem de forma mais prática, toma-se aqui a utilização do multímetro, agora particularmente utilizado para medição também de voltagem, de modo que para a configuração em uso e para os mesmos modos de excitação, sejam registrados os dados de indução na ausência dos resistores, e posteriormente com o uso dos mesmos. Isso permitirá uma relação da queda de tensão associada quando há o emprego destes comparado à tensão efetiva registrada na bobina.

A Tabela 2 mostra os resultados em função de sete medições, efetuadas nas duas primeiras amplitudes.

Tabela 2 – Diferença em porcentagem da queda de tensão no circuito resistivo.

Medições	**Amplitude (mm)**	**Freq. (RPM)**	**Freq. (Hz)**	**Tensão Efetiva (V)***	**Tensão Efetiva c/ Resistor (V)***	**Diferença %**
1	50	145,70	2,43	0,66	0,38	42,42
2		240,00	4,00	1,06	0,63	40,57
3		300,00	5,00	1,43	0,83	41,96
4		360,00	6,00	1,65	0,96	41,81
5	70	145,70	2,43	0,93	0,52	44,08
6		240,00	4,00	1,50	0,91	39,33
7		300,00	5,00	1,93	1,08	44,04

* Medição efetuada pelo multímetro.

Verifica-se que a diferença entre o circuito simples e com resistor apresenta um valor de aproximadamente 42%, o que é considerável. E deste modo não podendo ser desprezada nas medições.

Como o sistema de aquisição utilizado para análise dos dados de forma mais completa neste trabalho corresponde a um aparelho diferente. O mesmo raciocínio é utilizado agora para com o mesmo, a fim de que o erro associado utilizando-se deste tenha relação ao multímetro, de modo a se normalizar um valor padronizado de queda de tensão atribuída, conhecido e conveniente.

O gráfico mostrado na Figura 44 compara as medições feitas da mesma maneira e mostra que a perda que os resistores atribuem ao sinal de tensão com a placa de aquisição também conferem aproximadamente 40%. Uma linha de tendência demonstra também que o aumento da queda percentual é proporcional ao aumento da tensão que o sistema induz. Linha esta de tendência obtida por função pré-definida para isto no aplicativo Microsoft Office Excel, versão de 2007.

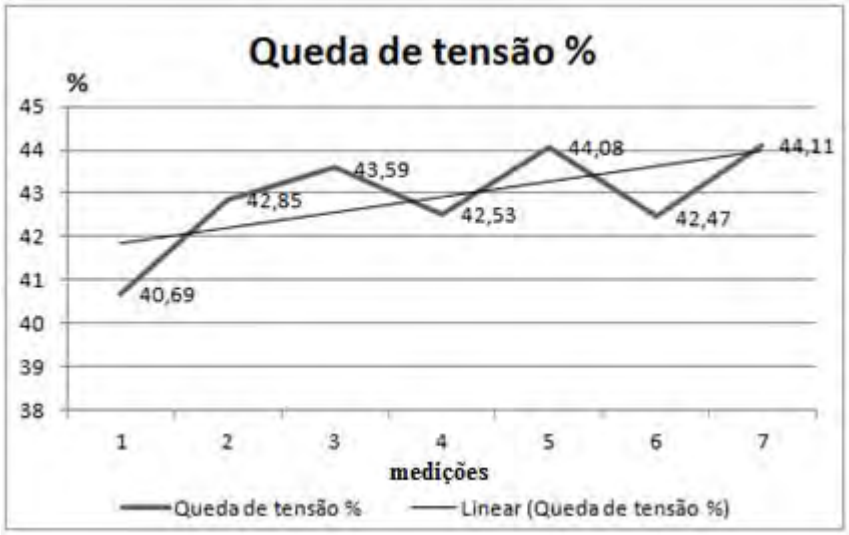


Figura 44 – Porcentagem de queda de tensão pelo resistor.

Analisando os dois métodos, é de se concluir que a perda no circuito resistivo até as medições analisadas corresponde a exatamente 42,03% pela referência do multímetro e 42,90% quando pela placa de aquisição Spyder, aumentando sensivelmente com o aumento da tensão induzida. Levando em consideração que este valor seguindo a linha de tendência linear alcançará no máximo 46% seguindo à máxima solicitação neste trabalho, considera-se a perda fixada em 44%, valor este a partir daqui considerado padrão para término dos ensaios. Isto corresponde a um coeficiente de erro muito baixo de queda real, sem afetar deste modo a análise dos dados experimentalmente na finalidade de conclusão dos ensaios.

A fim de facilitar a visualização conclusiva dos dados, após a exibição de todos os sinais obtidos, os dados pertinentes para a análise constituirão uma tabela para cada modo de ensaio, contendo as correções necessárias do sinal do resistor aos:

- Valores de tensão de pico
- Tensão efetiva
- Corrente induzida efetiva
- Potência

Logo, a Figura 45 exibe o sinal de menor amplitude pelo uso dos resistores.

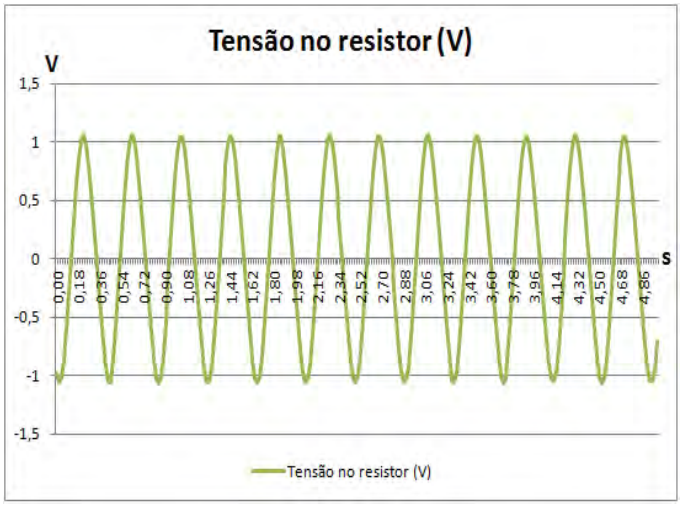


Figura 45 – Configuração 1. Sinal no resistor com amplitude de 90 mm a 2,43 Hz.

6.2 Resposta indutiva da configuração 2 de ensaio

Após o término dos ensaios do item anterior, prossegue-se ao da segunda configuração, com o sinal da primeira excitação mostrado no gráfico da Figura 46. Percebe a princípio que para uma mesma excitação, esta configuração proporciona uma tensão de pico relativamente maior que ao do ensaio anterior.

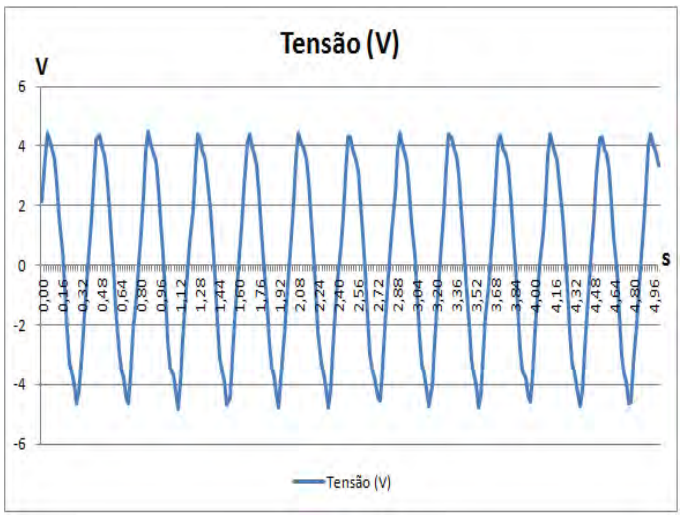


Figura 46 – Configuração 2. Sinal com amplitude de 50 mm a 2,43 Hz.

A partir da excitação em 70 mm a 5,00 Hz, faz-se necessário a utilização do circuito resistivo, assim como no item anterior, sendo o sinal gerado exibido na Figura 47.

Deste modo confirma-se que com a utilização de imãs maiores em comprimento, a resposta indutiva confere maior tensão, competindo como verificado, a utilização do circuito resistivo mais precocemente.

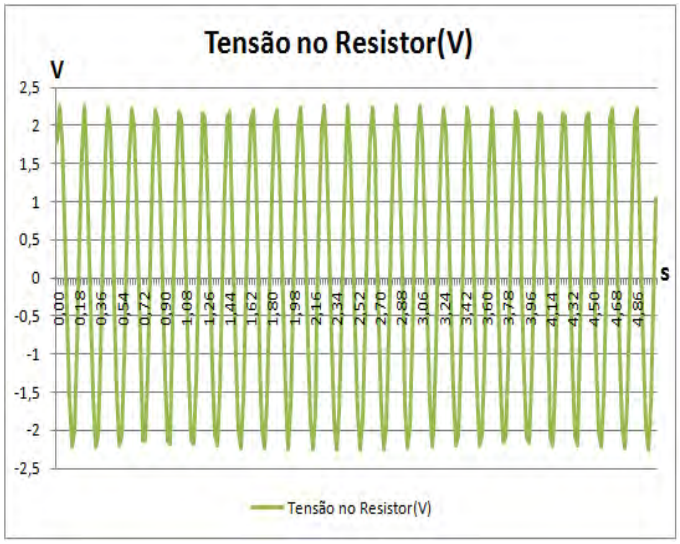


Figura 47 – Configuração 2. Sinal no resistor com amplitude de 70 mm a 5,00 Hz.

6.3 Resposta indutiva da configuração 3 de ensaio

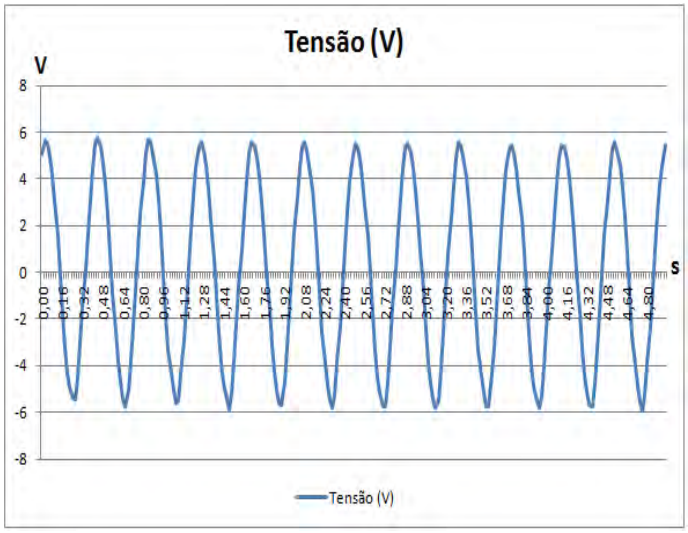


Figura 48 – Configuração 3. Sinal com amplitude de 50 mm a 2,43 Hz.

Nesta última configuração dos ensaios, a tensão induzida em menores frequências apresenta valores bem significativos, como mostra a Figura 48. Contudo, percebe-se a necessidade do circuito de resistores logo no início, a partir da excitação a 50 mm a 5,00 Hz, com o sinal gerado no resistor exibido na Figura 49, o que demonstra a princípio, que este modo de ensaio proporciona a resposta indutiva de maior intensidade.

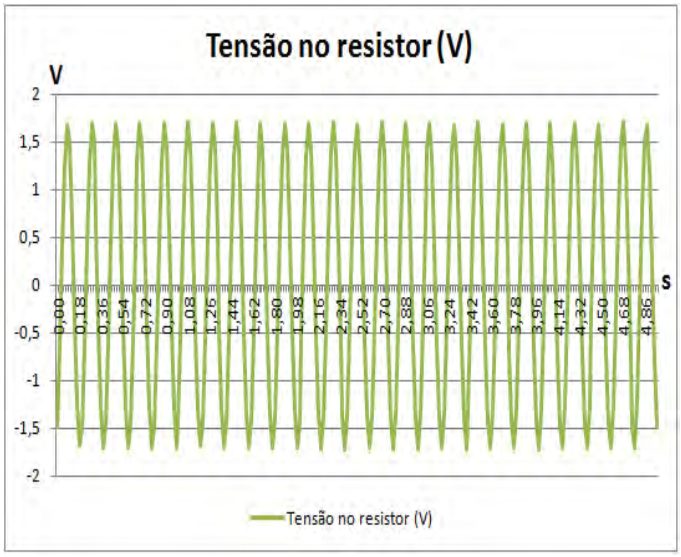


Figura 49 – Configuração 3. Sinal no resistor com amplitude de 50 mm a 5,00 Hz.

6.4 Tabelas de resultados e análise

Tendo agora os sinais induzidos apresentados para os três diferentes modos de ensaio, prossegue-se à exposição dos dados e cálculo das grandezas elétricas necessárias para uma análise mais completa.

Nas Tabelas abaixo, sempre que a *Tensão de pico* medida corresponder à medição no resistor, a equação (7) será utilizada, conforme exposição do item 6.1, item este que também define a compensação da queda de tensão, padronizada em 0,44 para todos os modos de excitação que se fizerem necessário. O resultado desta conversão e ajustes corresponderá a *Tensão de pico corrigida*, que se refere a real tensão na bobina induzida.

A resistência interna da bobina foi medida com a utilização do multímetro chaveado para esta operação, apresentando o valor 19,5 Ohms. Com isto a corrente induzida pode ser calculada também pela relação definida por Ohm, e por fim a potência gerada, pela equação (8).

$$P = V.i \tag{8}$$

Ambos os valores de corrente e de potência são relativos ao valor efetivo, de forma que a tensão efetiva é obtida pela razão (Tensão de pico/ $\sqrt{2}$) aplicada aos sinais de resposta.

Tabela 3 – Resultados para o primeiro modo de ensaio (* Valores medidos no resistor).

Amplitude (mm)	Freq. (Hz)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico corrigida (V)	Tensão Efetiva (V)	Corrente Efetiva (mA)	Potência Gerada (W)
50	2,43	3,39	3,39	2,40	123,07	0,30
	4,00	5,45	5,45	3,85	197,43	0,76
	5,00	6,60	6,60	4,66	238,97	1,11
	6,00	7,31	7,31	5,17	265,13	1,37
70	2,43	5,01	5,01	3,54	181,54	0,64
	4,00	7,81	7,81	5,52	283,08	1,56
	5,00	9,25	9,25	6,54	335,38	2,19
	6,00	1,73*	8,48	5,99	307,18	1,84
90	2,43	1,06*	5,20	3,68	188,72	0,69
	4,00	1,62*	7,95	5,62	288,20	1,62
	5,00	1,91*	9,37	6,62	339,49	2,25
110	2,43	1,29*	6,33	4,47	229,23	1,02
	4,00	2,00*	9,82	6,94	355,90	2,47

Tabela 4 – Resultados para o segundo modo de ensaio (* Valores medidos no resistor).

Amplitude (mm)	Freq. (Hz)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico corrigida (V)	Tensão Efetiva (V)	Corrente Efetiva (mA)	Potência Gerada (W)
50	2,43	4,51	4,51	3,19	163,59	0,52
	4,00	6,63	6,63	4,69	240,51	1,13
	5,00	7,86	7,86	5,56	285,13	1,59
	6,00	9,09	9,09	6,42	329,23	2,11
70	2,43	6,17	6,17	4,36	223,59	0,97
	4,00	9,42	9,42	6,65	341,03	2,27
	5,00	2,26*	11,13	7,86	403,07	3,17
	6,00	2,57*	12,64	8,93	457,94	4,09
90	2,43	1,55*	7,61	5,38	275,90	1,48
	4,00	2,45*	12,04	8,51	436,41	3,71
110	2,43	1,97*	9,67	6,83	350,26	2,39
	4,00	2,89*	14,19	10,03	514,36	5,16

Tabela 5 – Resultados para o terceiro modo de ensaio (* Valores medidos no resistor).

Amplitude (mm)	Freq. (Hz)	Tensão de pico (V)	Tensão de pico corrigida (V)	Tensão Efetiva (V)	Corrente Efetiva (mA)	Potência Gerada (W)
50	2,43	5,72	5,72	4,04	217,18	0,84
	4,00	8,48	8,48	5,99	307,18	1,84
	5,00	1,71*	8,38	5,92	303,59	1,80
	6,00	1,94*	9,52	6,73	345,13	2,32
70	2,43	1,29*	6,33	4,48	229,74	1,03
	4,00	2,03*	9,97	7,05	361,54	2,55
	5,00	2,44*	11,98	8,47	434,36	3,68
	6,00	2,62*	12,86	9,09	466,15	4,24
90	2,43	1,66*	8,15	5,76	295,38	1,70
	4,00	2,56*	12,57	8,89	455,89	4,05
	5,00	2,95*	14,48	10,24	525,12	5,38
110	2,43	2,02*	9,92	7,01	359,48	2,52
	4,00	3,02*	14,82	10,48	537,43	5,63
130	2,43	2,44*	11,98	8,47	434,35	3,68

* Valores medidos no resistor

Como prévia conclusão, verifica-se pelo método utilizado, que uma quantidade razoável de potência efetiva é gerada, principalmente pela segunda e terceira configuração de haste. Logo, demonstrando que diferentes modos de excitação, evidentemente proporcionarão diferentes níveis de potência, evidenciando que o emprego da configuração e da aplicação adequada torna possível uma melhor resposta e níveis de potência efetiva consideráveis.

Pelos dados de voltagem que foram exibidos, pode-se já adiantar também que os valores são em muitos casos, individualmente já capazes de servir para regeneração de baterias, com retificação em sinal contínuo da voltagem atingindo o limite mínimo necessário para os conjuntos de íon-lítio, de acordo com a voltagem média nas exposições do item 3.1. Já tornando o método apto como referência para se explorar esta tecnologia.

Cabe lembrar aqui, que maiores frequências de excitação até o limite definido pela literatura não puderam ser utilizadas pela limitação da bancada, onde um sistema de maior capacidade poderia tornar ainda mais completa a análise aqui efetuada, favorecendo a conclusão desta proposta com níveis ainda maiores de indução, o que seria possível somente pelo método de referência, dado as circunstâncias já citadas.

Entretanto, embora o estudo teórico usado tido como base não tivesse como objetivo a potência gerada, e sim a tensão induzida objetivando um valor mínimo aceito pelas baterias, lá chamada de força eletromotriz, no item seguinte cabe uma comparação dos valores deste método usado como referência em contraste com os mesmos obtidos pelo experimento, de modo que seja verificada a exatidão da teoria que foi desenvolvida e sua confiabilidade, definidas suas limitações.

6.5 Comparação dos dados teóricos com os experimentais

Será utilizado aqui para o cálculo e plotagem dos dados o mesmo software utilizado no trabalho de Oliveira (2010), wxMaxima, porém aqui a versão 12.01.0.

A Figura 50 mostra o equacionamento matemático desenvolvido no software utilizado para se obter a tensão induzida para o caso da configuração de ensaio número um, sendo todos os dados introduzidos no sistema internacional de unidades (SI). Como parâmetro de medição é adotado o mesmo tempo de 5 s.

Após a demonstração de cada equacionamento, serão colocados lado a lado o sinal obtido pelo método teórico comparado ao sinal de tensão de pico a pico do método experimental.



Figura 50 – Equacionamento da configuração 1.

Visto que todo o desenvolvimento da modelagem teórica se faz presente na literatura consultada, o foco aqui não será a explicação da linguagem utilizada nas linhas de programação definidas pelo software como mostra a Figura 50, porém cabe mencionar que a equação (5) corresponde a linha de programação (/Equação de 1 imã e 7 bobinas/), linha esta que corresponderá também aos demais modos de ensaio, respeitando é claro as devidas configurações, que posteriormente fazem menção aos mesmos de forma a também mostrar a quantidade de imãs utilizados. Nas Figuras 51 e 52 tem-se o sinal proveniente deste primeiro modelamento em contraste ao experimental.

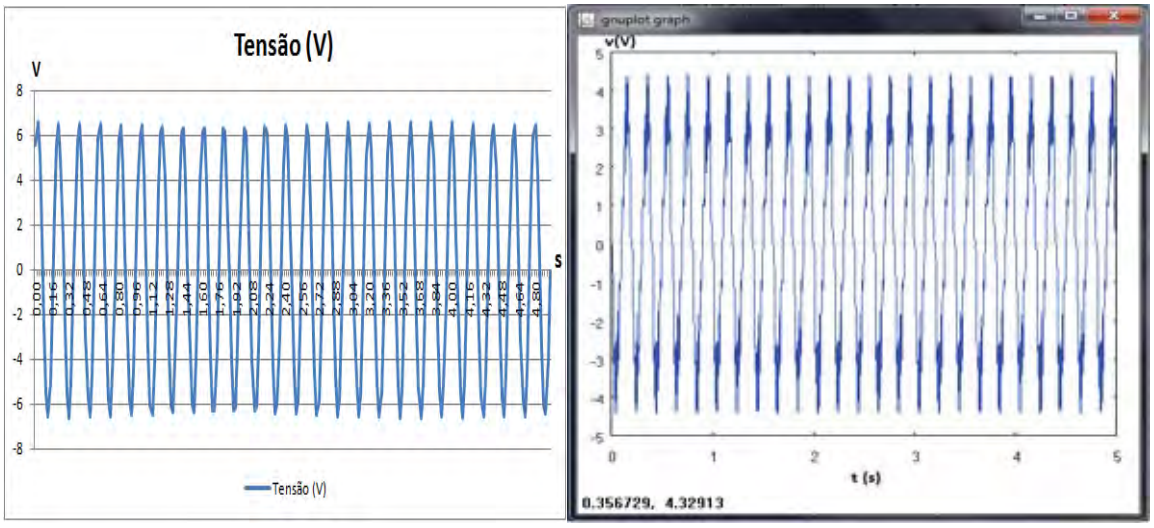


Figura 51 – Sinais plotados para amplitude de 50 mm a 5,00 Hz. Experimental *(esq.)* e teórico *(dir.).*

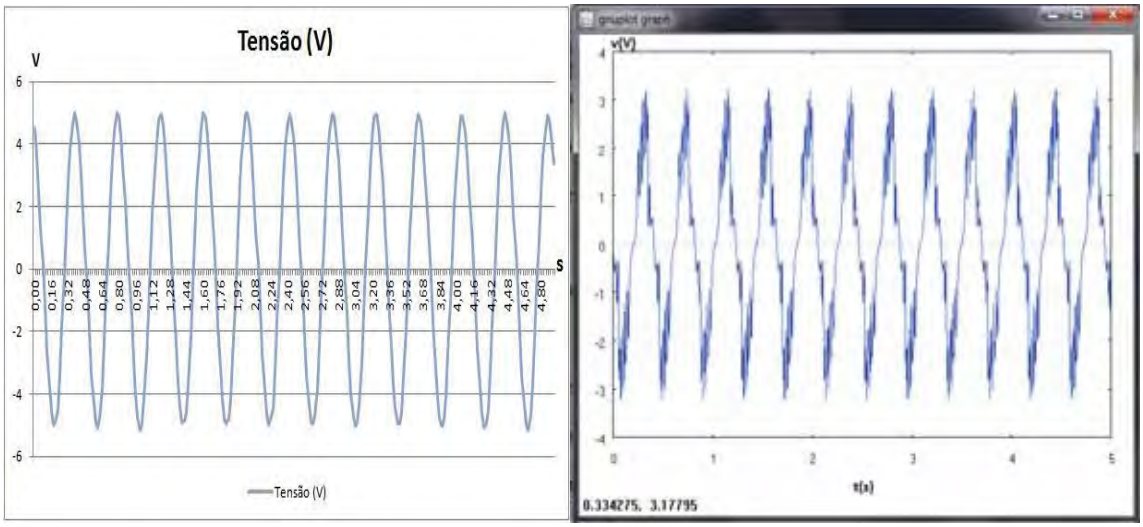


Figura 52 - Sinais plotados para amplitude de 70 mm e 2,43 Hz. Experimental *(esq.)* e teórico *(dir.).*

Para esta configuração, tomada como referência para explicação das variáveis da teoria no item anterior, percebe que ambos os sinais se correspondem, com características muito próximas. Contudo, os valores de pico demonstram serem diferentes.

Em seguida dá-se ao cálculo da configuração de haste dois, que compete menos imãs, porém estes com 20 mm de comprimento. Como já mencionado, faz-se aqui necessário definir o valor de dipolo magnético que será utilizado.

Pouco se sabe sobre a definição desta grandeza para a configuração da haste aqui utilizada, bem como para bobinas em série. Para a primeira configuração o valor adotado permitiu uma resposta de sinal bem semelhante, que como analisado no próximo item, tendo grande correlação à tensão efetiva da bancada, permitindo sua utilização até o final do ensaio pela correspondência inicial nos modos de excitação. No caso do valor adotado ser muito fora de uma especificação real, isto comprometeria apenas a amplitude do sinal.

Deste modo, seguindo o que foi feito para o cálculo anterior, verificar-se-á um valor que no início também corresponda de modo satisfatório ao valor de referência, no caso objetivando a tensão efetiva obtida experimentalmente, chegando ao valor de 3,2 C.m. Valor este condizente, já que os imãs aqui utilizados são ligeiramente maiores.

Na Figura 53, segue-se o equacionamento para o segundo modo de ensaio, e o respectivo sinal gerado.

```
--> /* Variaveis */
    m0: 4*%pi*10^-7;
    m: 3.2;
    a:0.014;
    N: 250;
    X: 0.015;
    A: 0.070;
    w: 2*%pi*f;
    f: 6;

    z1: -0.045; z2: -0.02; z3: 0.005; z4: 0.03; z5: 0.055; z6: 0.080;

    /* Equacoes */
    /* Distancia/ Velocidade */
    x(t) := A*cos(w*t);
    v(t) := diff( x(t), t);
    z(z0, t) := z0 - x(t);

    /* equacao auxiliar */
    b(z0, c, t) := (z(z0, t) + c*X) / (a^2 + (c*X + z(z0, t) )^2)^2.5;

    /* Equacao de 1 ima e 7 bobinas */
    V(z0, t) := 1.5*m0*m*N*a^2 * v(t) * ( b(z0, 0, t) + b(z0, 1, t) +
    + b(z0, 2, t) + b(z0, 3, t) + b(z0, 4, t) + b(z0, 5, t) + b(z0, 6, t) );

    /* Equacao de 6 imas e 7 bobinas */
    U(t) := V(z1, t) + V(z2, t) + V(z3, t) + V(z4, t) + V(z5, t)+ V(z6, t);

    /* plotagem  em t, do intervalo [0, 5] */
    plot2d(U(t), [t, 0, 5]);
```

Figura 53 – Equacionamento da configuração 2.

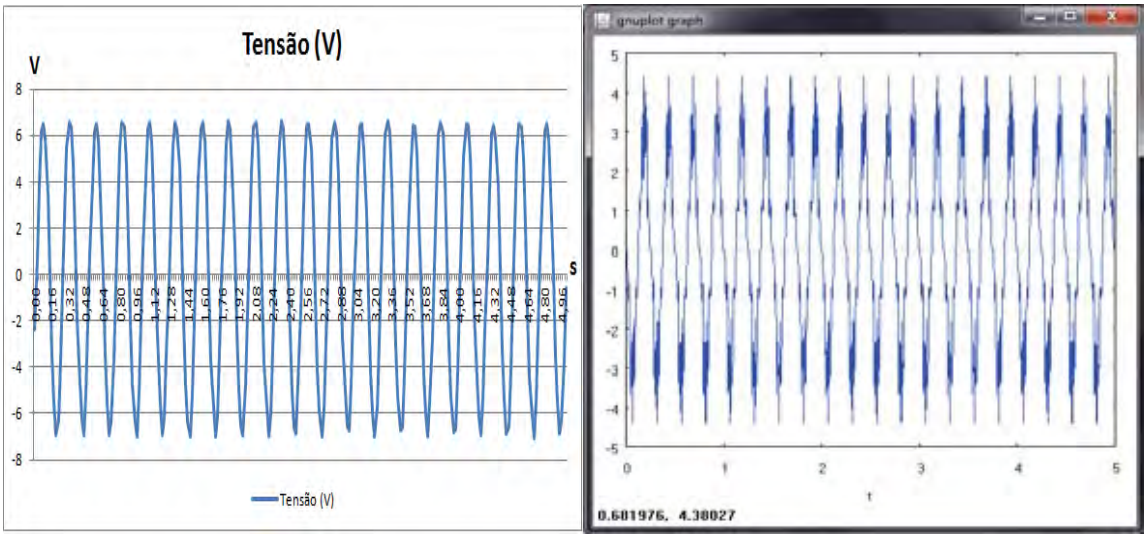


Figura 54 - Sinais plotados para amplitude de 50 mm a 4,00 Hz. Experimental *(esq.)* e teórico *(dir.)*.

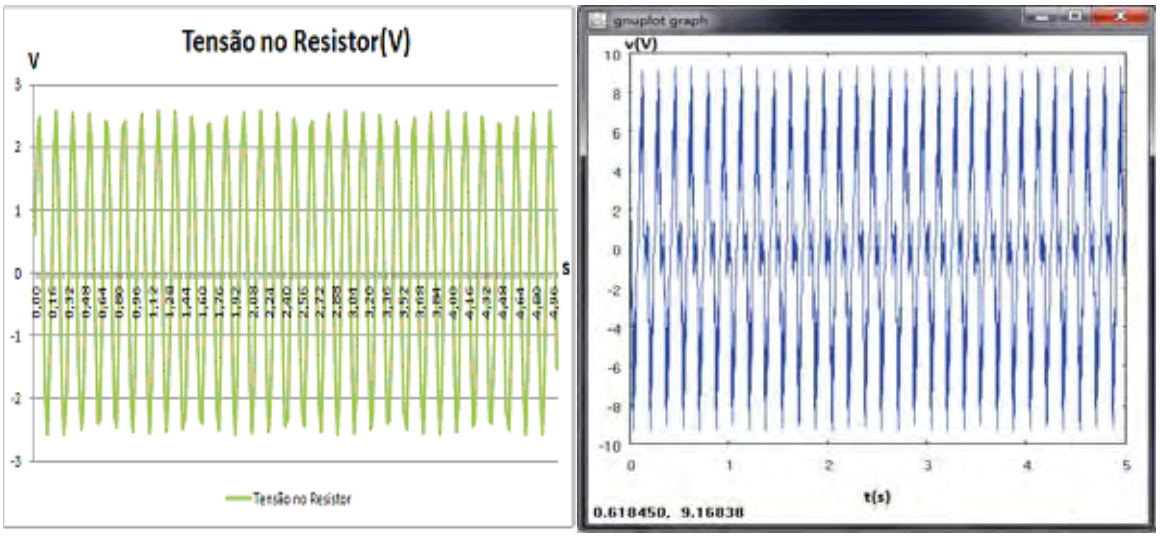


Figura 55 - Sinais plotados para amplitude de 70 mm a 6,00 Hz. Experimental *(esq.)* e teórico *(dir.).*

Da mesma forma, os sinais se comportam muito semelhantemente, mesmo com a utilização dos resistores, o que de fato modifica só a amplitude dos mesmos.

Para a terceira configuração, como os imãs se comportam como um só grande imã cilíndrico, dois possíveis equacionamentos baseados no método foram efetuados, estando ambos na Figura 56. Um primeiro considerou como utilização a modelagem de um só imã de grande comprimento, que define a característica de imãs unidos com mesma orientação dos polos, o qual corresponde ao equacionamento superior, um segundo considerou diversos imãs, porém com espaçamento nulo, este estando abaixo.

No primeiro caso de modelamento, a variável de dipolo magnético foi adotada em 12,8 C.m, atribuída a todo o conjunto magnético. No segundo, usou-se o valor de 3,2 C.m, pois considerou-se os imãs com mesma característica dos imãs de 20 mm de comprimento, porém sem espaçadores entre eles, mas na quantidade de forma a constituir uma haste de também 150 mm.

Obs.: O oitavo e último imã do segundo caso, apesar de ser considerado como de 20 mm, no equacionamento apresenta 10 mm a menos, a fim de que a haste modelada matematicamente tenha os 150 mm até agora utilizado.

```
/* Variaveis */
m0: 4*%pi*10^-7;
m: 12.8;
a:0.014;
N: 250;
X: 0.015;
A: 0.050;
w: 2*%pi*f;
f: 4;

z1: -0.045;

/* Equacoes */
/* Distancia/ Velocidade */
x(t) := A*cos(w*t);
v(t) := diff( x(t), t);
z(z0, t) := z0 - x(t);

/* equacao auxiliar */
b(z0, c, t) := (z(z0, t) + c*X) / (a^2 + (c*X + z(z0, t) )^2)^2.5;

/* Equacao de 1 ima e 7 bobinas */
V(z0, t) := 1.5*m0*m*N*a^2 * v(t) * ( b(z0, 0, t) + b(z0, 1, t) + b(z0, 2, t) +
b(z0, 3, t) + b(z0, 4, t) + b(z0, 5, t) + b(z0, 6, t) );

U(t) := V(z1, t);

/* plotagem  em t, do intervalo [0, 5] */
plot2d(U(t), [t, 0, 5]);
```

```
/* Variaveis */
m0: 4*%pi*10^-7;
m: 3.2;
a:0.014;
N: 250;
X: 0;
A: 0.050;
w: 2*%pi*f;
f: 2.43;

z1: -0.045; z2: -0.025; z3: -0.005; z4: 0.015; z5: 0.045; z6: 0.065; z7: 0.085; z8: 0.095;

/* Equacoes */
/* Distancia/ Velocidade */
x(t) := A*cos(w*t);
v(t) := diff( x(t), t);
z(z0, t) := z0 - x(t);

/* equacao auxiliar */
b(z0, c, t) := (z(z0, t) + c*X) / (a^2 + (c*X + z(z0, t) )^2)^2.5;

/* Equacao de 1 ima e 7 bobinas */
V(z0, t) := 1.5*m0*m*N*a^2 * v(t) * ( b(z0, 0, t) + b(z0, 1, t) + b(z0, 2, t) +
b(z0, 3, t) + b(z0, 4, t) + b(z0, 5, t) + b(z0, 6, t) );

/* Equacao de 8 imas e 7 bobinas */
U(t) := V(z1, t) + V(z2, t) + V(z3, t) + V(z4, t) + V(z5, t)+ V(z6, t) + V(z7, t) + V(z8, t);

/* plotagem  em t, do intervalo [0, 5] */
plot2d(U(t), [t, 0, 5]);
```

Figura 56 – Equacionamentos da configuração 3. Imã unitário (acima). Espaçamento nulo (abaixo).

No decorrer deste procedimento, percebeu-se que a primeira modelagem teórica apresentou valores que se divergiam consideravelmente do esperado, divergência esta maior a cada simulação, o que dispensou o cálculo para maiores amplitudes. Os resultados até onde se achou pertinente compõem a Tabela 8.

Para o segundo equacionamento, a divergência se torna menor, porém ainda presente, seus dados correspondem à Tabela 9. Por conseguinte demais considerações são feitas referente aos sinais obtidos e valores de pico calculados.

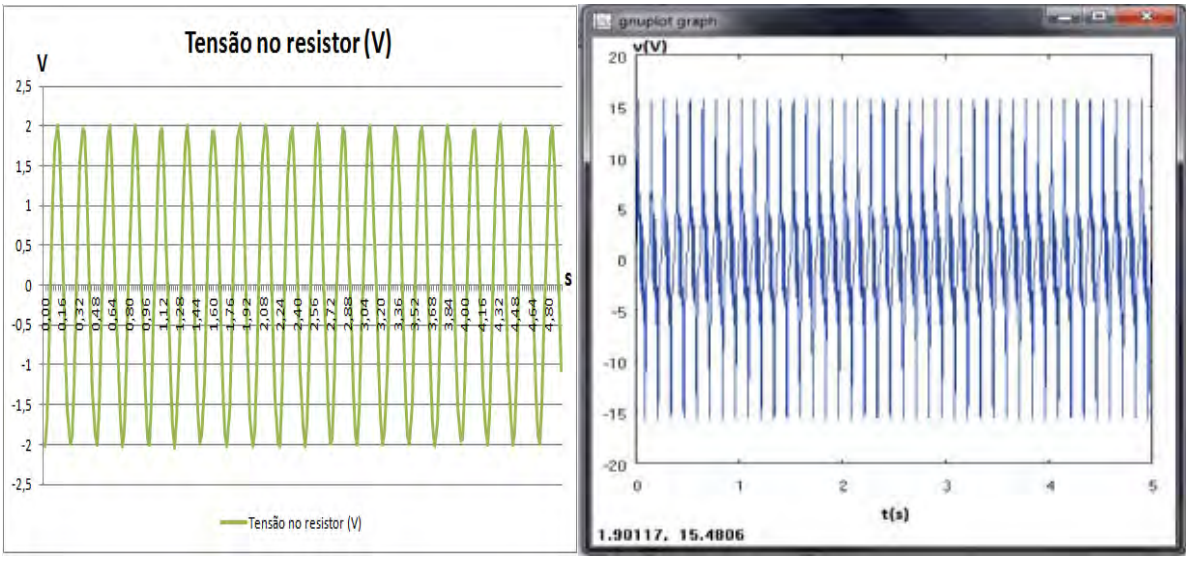


Figura 57 - Sinais plotados para amplitude de 70 mm e 4,00 Hz com imã unitário. Experimental *(esq.)*. Teórico *(dir.)*.

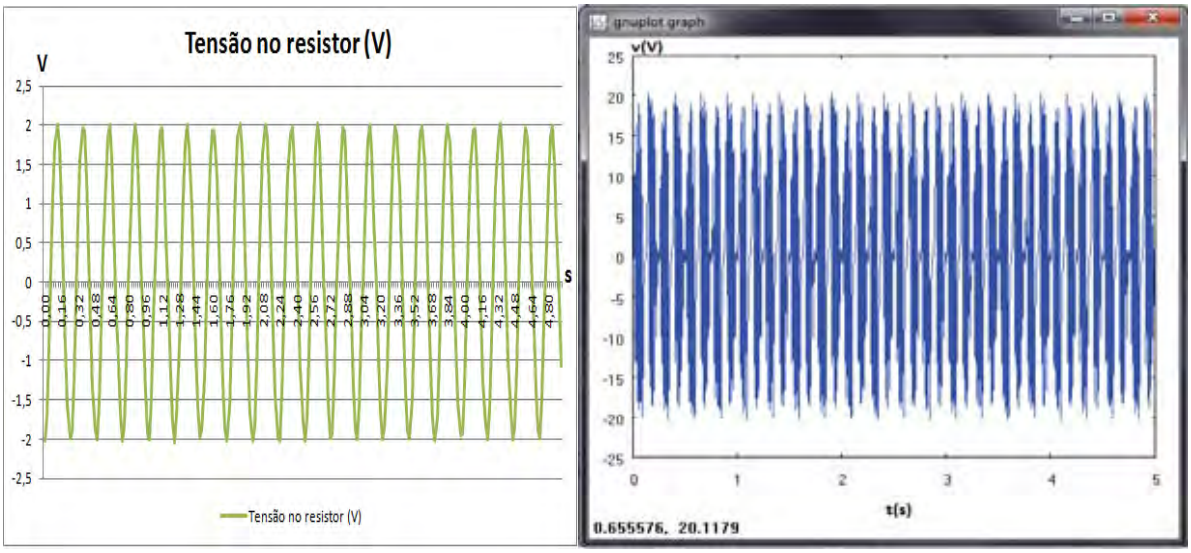


Figura 58 - Sinais plotados para amplitude de 70 mm e 4,00 Hz sem espaçamento. Experimental *(esq.)*. Teórico *(dir.)*.

Em ambos os casos, como é evidenciado nas Figuras 57 e 58, percebe-se que o sinal teórico se comporta de forma bem diferente ao experimental, apresentando características bem mais aleatórias, com um perfil mais para ruído do que para uma onda de senoide, além de amplitudes muito maiores que o esperado, contrariando o que até agora se conseguiu nas configurações anteriores.

As Tabelas 6-9 exibem os valores de pico do sinal dos dados teóricos, em contraste com os obtidos por meio experimental de modo geral. Percebe-se que existe uma correlação evidente até a segunda configuração como mencionado, porém correspondência maior ocorre

quando os valores de pico calculados são comparados aos valores de tensão efetiva proveniente do sinal obtido pelos ensaios de bancada.

Tabela 6 – Comparação de tensão para a configuração 1.

Amplitude (mm)	**Frequência (Hz)**	**Voltagem de pico teórica (V)**	**Voltagem de pico medida (V)**	**Voltagem efetiva de bancada (V)**	**Erro associado**
50	2,43	2.14	3,39	2,40	10,3
	4,00	3.52	5,45	3,85	8,6
	5,00	4,32	6,60	4,66	7,3
	6,00	5,26	7,31	5,17	-1,7
70	2,43	3,17	5,01	3,54	10,4
	4,00	5,22	7,81	5,52	5,4
	5,00	6,48	9,25	6,54	0,9
	6,00	7,89	8,48	5,99	-31,7
90	2,43	4,20	5,20	3,68	-14,1
	4,00	6,84	7,95	5,62	-21,7
	5,00	8,55	9,37	6,62	-29,1
110	2,43	5,13	6,33	4,47	-14,7
	4,00	8,46	9,82	6,94	-21,9
130	2,43	6,11			

Tabela 7 – Comparação de tensão para a configuração 2.

Amplitude (mm)	**Frequência (Hz)**	**Voltagem de pico calculada (V)**	**Voltagem de pico medida (V)**	**Voltagem efetiva de bancada (V)**	**Erro associado**
50	2,43	2,68	4,51	3,19	15,9
	4,00	4,35	6,63	4,69	7,2
	5,00	5,44	7,86	5,56	2,1
	6,00	6,47	9,09	6,42	-0,7
70	2,43	3,71	6,17	4,36	14,9
	4,00	5,98	9,42	6,65	10,1
	5,00	7,67	11,13	7,86	2,4
	6,00	9,01	12,64	8,93	-0,8
90	2,43	4,81	7,61	5,38	10,6
	4,00	8,00	12,04	8,51	6,0
110	2,43	5,86	9,67	6,83	14,2
	4,00	9,72	14,19	10,03	3,1
130	2,43	9,67		-	

Tabela 8 – Comparação de tensão para a configuração 3, com imã unitário.

Amplitude (mm)	**Frequência (Hz)**	**Voltagem de pico calculada (V)**	**Voltagem de pico medida (V)**	**Voltagem efetiva de bancada (V)**	**Erro associado**
50	2,43	2,43	5,72	4,04	34,9
	4,00	4,27	8,48	5,99	28,7
	5,00	5,31	8,38	5,92	10,3
	6,00	6,36	9,52	6,73	5,5
70	2,43	9,41	6,33	4,48	-110,0
	4,00	15,48	9,97	7,05	-119,6
	5,00	23,45	11,98	8,47	-176,8

Tabela 9 – Comparação de tensão para a configuração 3, com ausência de espaçadores.

Amplitude (mm)	Frequência (Hz)	Voltagem de pico calculada (V)	Voltagem de pico medida (V)	Voltagem efetiva de bancada (V)	Erro associado
50	2,43	8,09	5,72	4,04	-100,2
	4,00	12,08	8,48	5,99	-101,7
	5,00	16,09	8,38	5,92	-171,8
	6,00	19,73	9,52	6,73	-193,1
70	2,43	11,92	6,33	4,48	-166,1
	4,00	13,44	9,97	7,05	-90,6
	5,00	24,75	11,98	8,47	-192,2
	6,00	27,49	12,86	9,09	-202,4

Em uma primeira análise do erro associado, observa-se que um ajuste de amplitude pode ser feito no procedimento teórico, principalmente para os dois primeiros casos, de forma que os valores de pico correspondam para ambas as configurações, aumentando assim estatisticamente a exatidão do método teórico à prática. Entretanto, para a terceira configuração, reafirma-se que os dados se diferem de maneira demasiada dos adquiridos em bancada, porém isto é justificado.

No método teórico, os imãs são considerados como pontos fontes de campo magnético, o que é viável para pequenas dimensões dos mesmos, muitas vezes com o comprimento menor que a sua seção transversal. Nas configurações um e dois, isto se verifica, com ambos possuindo certo espaçamento evidenciando a individualidade da função de cada um. Contudo, na configuração três todos os imãs se comportam como um só magneto de grande comprimento, aqui no caso de 150 mm, o que é muito maior que os 22,4 mm de diâmetro, fazendo com que a teoria não apresente a correspondência esperada com a prática para o primeiro equacionamento.

Quando se anula o efeito de espaçamento do cálculo, verifica-se que apesar de haver maior correspondência, percebe-se um distanciamento dos dados experimentais a medida que as excitações se tornam mais intensas, evidenciando que uma maior parcela de campo magnético comparado a prática passa a ser considerada no cálculo.

Vale lembrar que para o método teórico, todas as variáveis são referentes ao modo de excitação do modelo de indução e sua construção. Com exceção do coeficiente de permeabilidade magnética e particularmente neste caso o valor de dipolo magnético da haste. Novamente, em relação a este último, o dado exato para a configuração da haste utilizada devido aos diversos componentes magnéticos, parte interior ferromagnética e geometria, torna-se relativamente difícil de obter. Entretanto, este não afetou consideravelmente as avaliações aqui efetuadas, por se tratar de uma variável que se faz imutável em um específico modelo de indução eletromagnética, sendo a escolha adequada para as considerações deste

trabalho tendo o método experimental como referência. De modo que num modelo definitivo, tanto esta grandeza quanto um coeficiente de correlação podem ser adicionados existindo uma cumplicidade entre ambos, competindo desta forma uma avaliação positiva da aplicação da modelagem matemática, fundamentada pelo estudo que aqui foi introduzido.

Nos gráficos das Figuras 59 a 61, é mais bem ilustrado o comportamento do método teórico frente ao experimental, mostrando a importância de se considerar os espaçadores, e evidenciando o que foi dito até aqui.

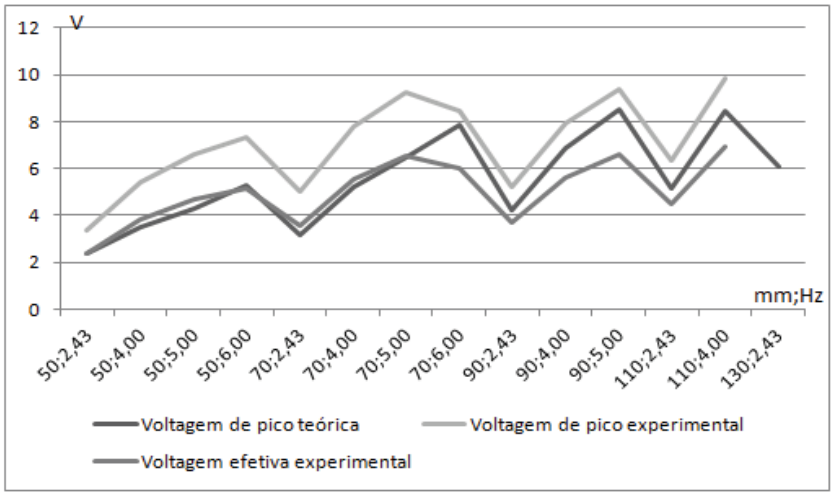


Figura 59 – Gráfico de correspondência da primeira configuração de haste.

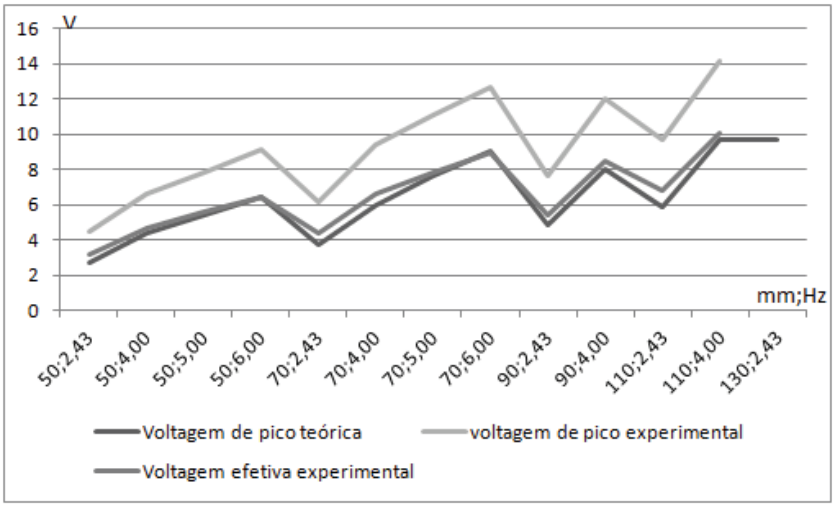


Figura 60 – Gráfico de correspondência da segunda configuração de haste.

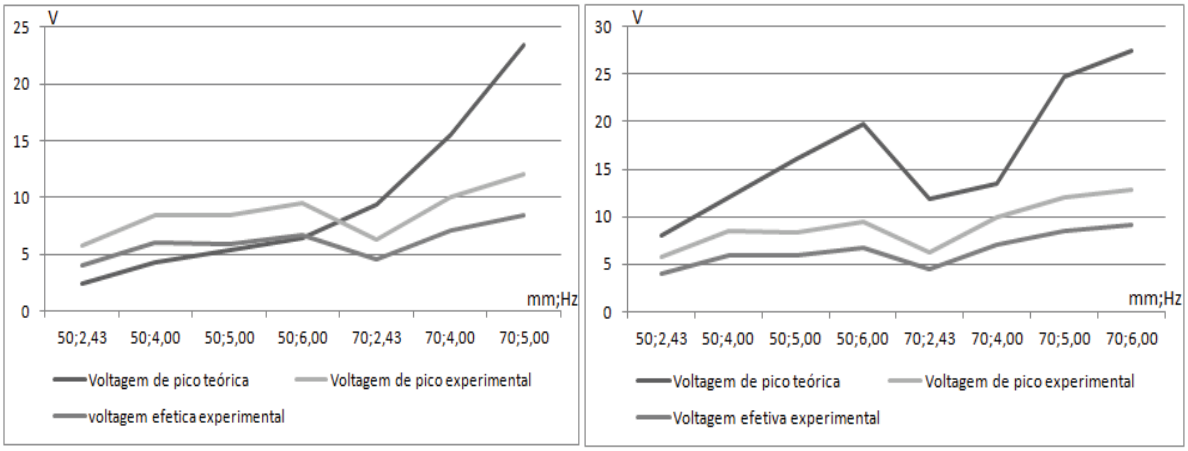


Figura 61 - Gráfico de correspondência da terceira configuração de haste. Com o primeiro equacionamento *(esq.)* e segundo equacionamento *(dir.)*.

Logo, a analogia prática a teoria se apresenta favorável para se estimar os valores de tensão efetiva no caso de um amortecimento regenerativo segundo os princípios aqui desenvolvidos. De forma que pelo observado, os imãs de 20 mm de comprimento correspondem melhor.

Os imãs da primeira configuração, utilizada para introdução de comparação aos métodos, também obtiveram boa correspondência, contudo a partir do emprego do circuito resistivo, houve uma diferença razoável perante o experimento. Isto mostra que mesmo considerada a queda de tensão nos resistores, segundo o método teórico a tensão real se mantém possivelmente ainda maior que a medida, o que também beneficia a proposta deste trabalho.

No gráfico da Figura 61 *(e)*, devido às aproximações teóricas necessárias não aplicáveis ao método, conclui-se de forma mais clara que o respectivo equacionamento de imã unitário realmente não se aplica à prática, muito em consequência dos altos valores de tensão adquiridos. No segundo caso, apesar de seguir melhor o comportamento experimental, isto também se sucede, porém de forma mais sutil. Logo, os dados da Tabela 9 e a Figura 61 *(d)*, não apresentam características que por si só são suficientes para que uma correlação possa ser descartada de modo satisfatório. Portanto, um novo gráfico é montado na Figura 62, agora concebido com a totalidade das excitações utilizadas, comparando da mesma forma os valores de pico teórico pelos valores experimentais para este caso.

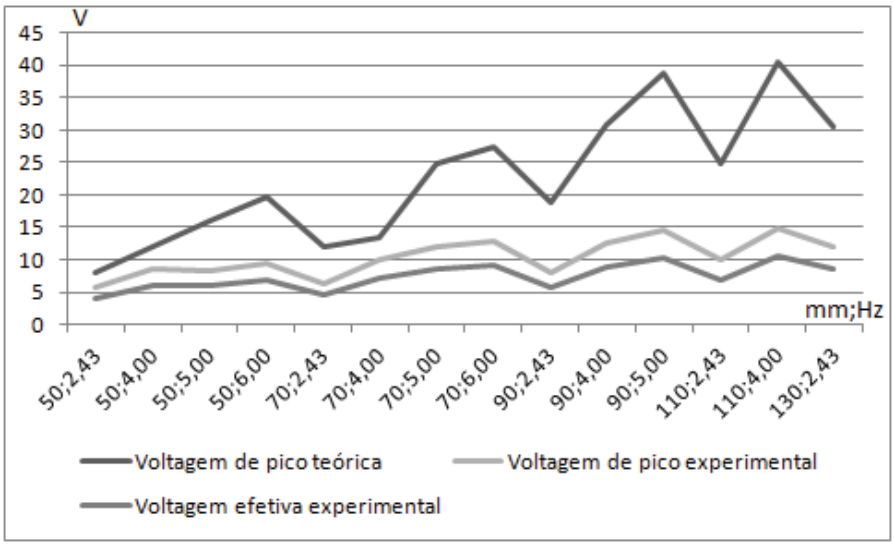


Figura 62 - Gráfico de correlação completo do ensaio 3.

Com isto, pode-se presumir que adotando o equacionamento com ausência de espaçadores na haste oscilante, por meio de um coeficiente de correlação linear os valores podem ser ajustados a prática à medida que se aumenta a amplitude de excitação. No presente trabalho isto foge ao objetivo, além de para este caso não constituir um procedimento trivial, mas se torna suficiente para agregar este procedimento a uma nova avaliação referente ao comportamento geral das tensões induzidas. Contudo, vale lembrar que apesar dos valores de pico apresentarem a possibilidade de correspondência para este caso, o perfil do sinal de solicitação se difere consideravelmente; apesar de ambos serem periódicos; o perfil teórico não apresenta uma característica senoidal clara, como mostra a Figura 58, e demonstrado em novo exemplo pela Figura 63. O que inviabiliza o cálculo simples de tensão efetiva do sinal pela tensão de pico, o que por si só torna o método inviável.

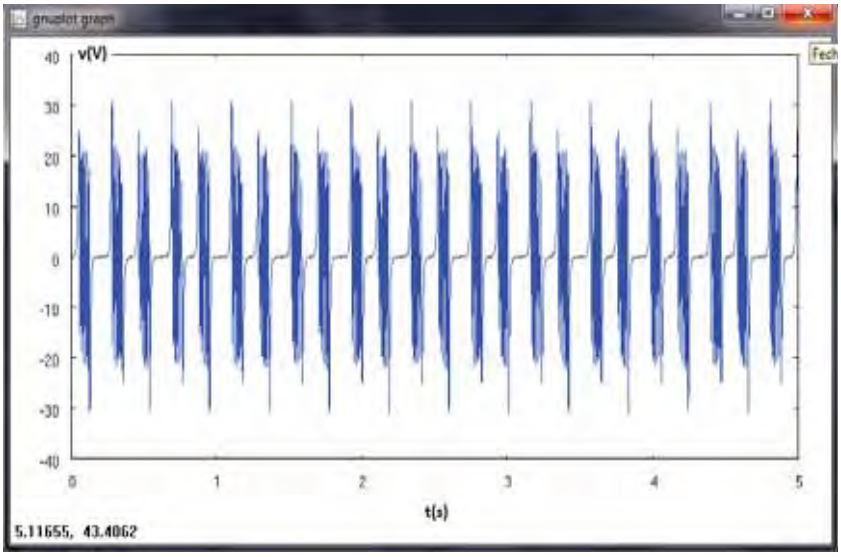


Figura 63 – Sinal teórico do modo de ensaio 3, para 110 mm e 2,43 Hz.

A Figura 64 compara os valores de tensão nas diferentes configurações, tanto para o método experimental quanto para o teórico, na totalidade das excitações adotadas.

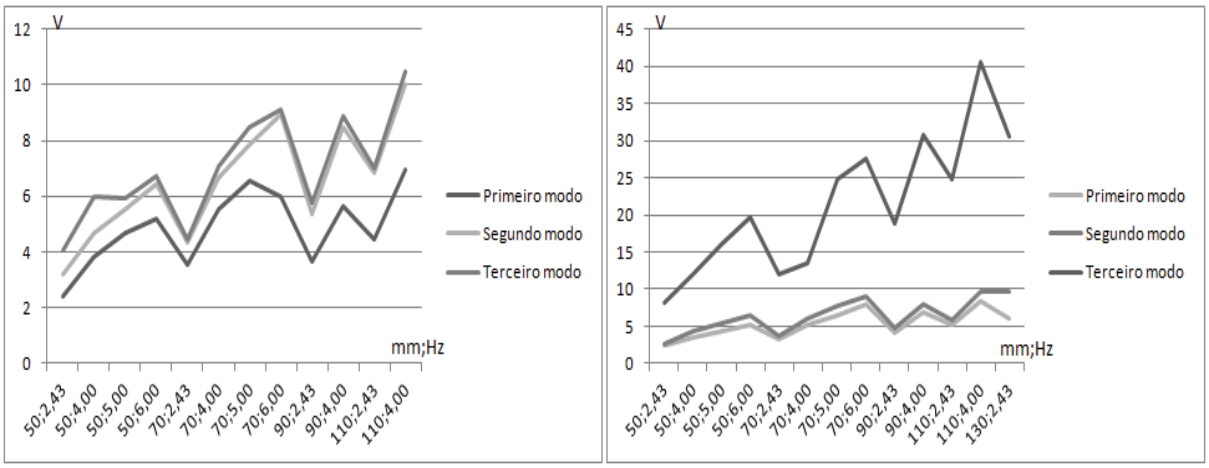


Figura 64 – Comparação entre os modos de ensaio. Experimental *(esq.)*. Teórico *(dir.)*.

Pelo gráfico à direita da Figura 64, pode-se concluir definitivamente que a modelagem matemática quando se considera a haste magnética sem o uso de espaçadores entre os imãs, tem sua correlação com o método experimental bastante comprometido, de fato necessitando de um ajuste consideravelmente mais complexo do que para os demais modos. Contudo, é observado por meio do gráfico experimental, que a resposta da configuração dos imãs sem a utilização de espaçadores se assemelha muito à configuração dos mesmos espaçados em cinco milímetros.

Pode-se propor então que a utilização de mesmos imãs em quantidade semelhante no presente caso, tendo eles os mesmos valores de dipolo magnético, compete às bobinas uma indução parecida. De modo que ao se considerar pequenos espaçadores no cálculo, o método teórico apresenta correspondência satisfatória, equivalente à proporção existente para tensão de pico a partir da tensão efetiva.

Em vista disto, pode-se seguramente afirmar que o método teórico se adéqua satisfatoriamente à proposta do presente trabalho. De forma que para o mesmo, faz-se necessário que a variável *d* do equacionamento não seja igual ao comprimento dos imãs, o que implica ausência de espaçadores, que influencia no posicionamento dos mesmos. Entretanto, isto não ocasionou grandes diferenças pelo método experimental, que para os mesmos imãs, ambas as configurações dois e três se comportaram muito semelhantemente. Logo, querendo-se mensurar as respostas do modelo de indução aqui desenvolvido para a terceira configuração de haste, o equacionamento do segundo modo de ensaio se faz bem conveniente.

Em prática, isto demonstrou, pelo menos para sistemas baseados no modelo aqui desenvolvido, que a ausência de pequenos espaçadores para maiores imãs, ou a utilização dos mesmos, não afeta consideravelmente o sinal induzido, sendo esta diferença ainda menor para maiores amplitudes e frequências. Que de modo geral, para fins de regeneração energética, podem ser considerados praticamente iguais.

Contudo, mesmo para um modelo simples baseado nos menores valores de potência, que por meio deste experimento foram apresentados, produz-se um nível de energia elétrica que pode ser considerada razoável a médio e longo prazo, em função da tensão induzida e potência proporcionada, que retoma a possibilidade exposta acima favorável para que acionamentos elétricos ou a própria sustentabilidade de futuros veículos venham a ser beneficiadas pela vibração existente entre roda e carroceria.

Dando prosseguimento, a etapa seguinte tem-se como base justamente a viabilidade do desenvolvimento desta tecnologia.

6.6 Potência gerada e análise de autonomia.

Voltando aos dados obtidos pelo experimento efetuado, tem-se a seguir os níveis alcançados de potência efetiva e como se comportou seu sinal frente às excitações impostas ao modelo indutivo, representados pelas Figuras 65 a 67.

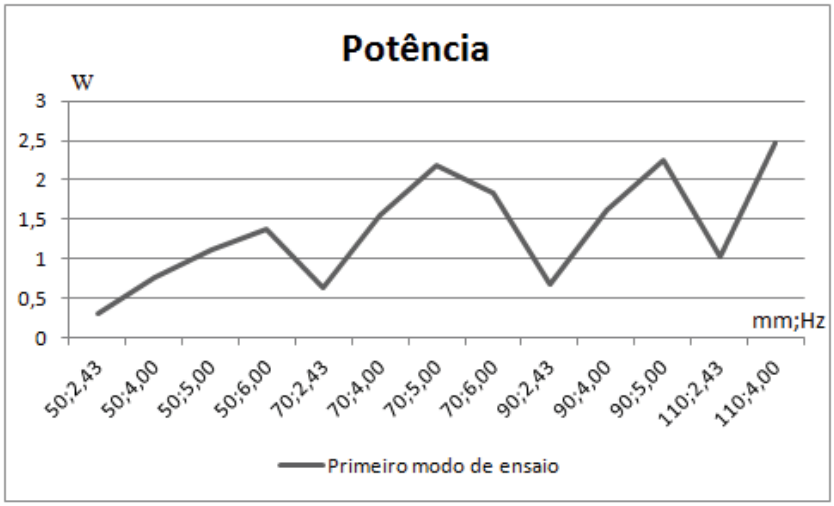


Figura 65 – Gráfico de potência gerada segundo a Tabela 4.

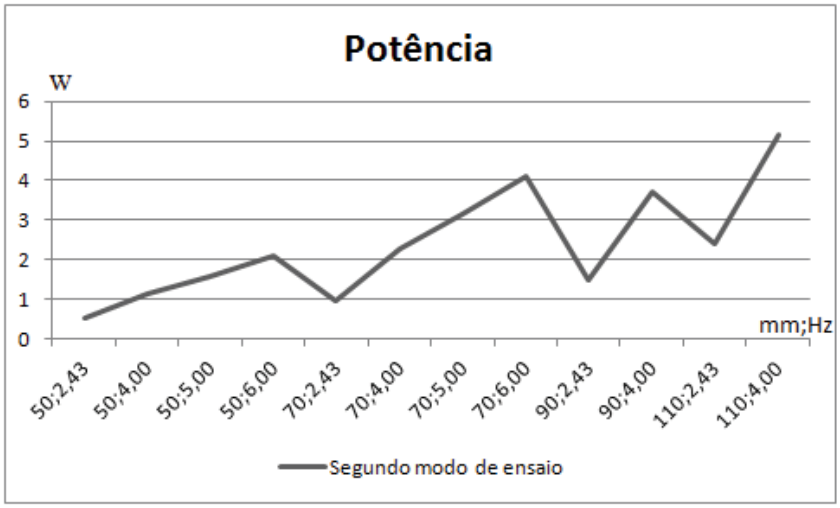


Figura 66 – Gráfico de potência gerada segundo a Tabela 5.

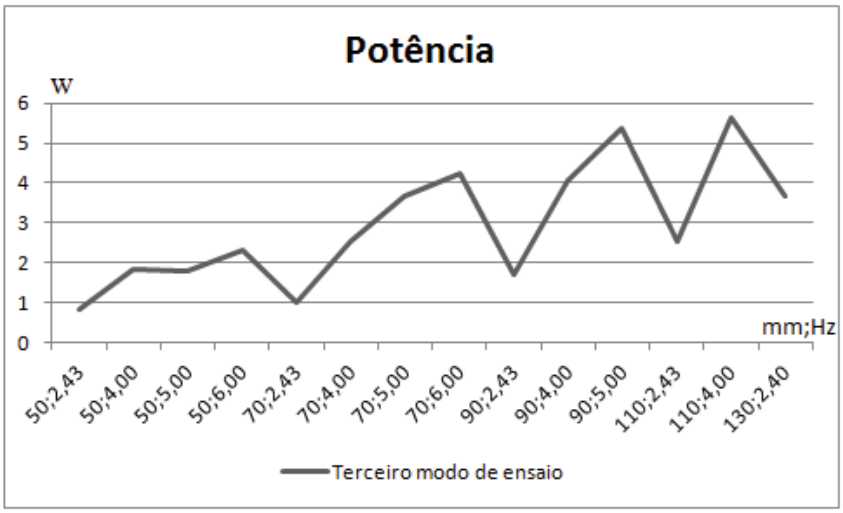


Figura 67 – Gráfico de potência gerada segundo a Tabela 6.

Neles são mostradas que maiores amplitudes geram mais potência, da mesma forma que maiores frequências. Contudo, não é sempre que uma suspensão atinge altos níveis de solicitação como aqui mostrados, por exemplo, acima de 100 mm. Mas fica registrado que os diversos modos de excitação de um conjunto pelo método aqui explorado compete ao mesmo um valor conveniente em resposta indutiva, proporcionando energia elétrica a níveis satisfatórios.

A Tabela 10 faz uma exibição da potência gerada, considerando um veículo equipado com o modelo regenerativo frente às diferentes simulações de excitação; tendo ele quatro sistemas de indução, ou seja, quatro amortecedores regenerativos, todos baseados do modelo experimental da segunda configuração. O emprego de quatro modelos confere a maneira ideal de utilização, tendo cada componente a sua contribuição individual, que se somam ao todo no objetivo de geração de energia, além de ser a quantidade de amortecedores que os veículos em sua grande maioria apresentam. Logo, será exibido o ganho de autonomia mensurado para um módulo de armazenamento de 150 Wh, tensão inicial de recarga de 3,00 V e final de 4,20 V, de acordo com uma bateria de íon-lítio.

Para uma comparação mais fiel, seria necessário consultar os dados reais de uma bateria por meio de sua curva característica provinda de um determinado fabricante, porém isto foge ao escopo aqui definido, de forma que a seguinte relação tem como finalidade apenas uma análise superficial do conjunto de bateria para uma hora de solicitação.

Tabela 10 – Autonomia baseada em um módulo de bateria de íon-lítio.

Amplitude (mm)	**Freq. (Hz)**	**Tensão efetiva (V)**	**Potência (W)**	**Energia gerada por conjunto (Wh)**	**Ganho de autonomia (%)**
50	2,43	3,19	0,52	2,08	1,39
	4,00	4,69	1,13	4,52	3,01
	5,00	5,56	1,59	6,36	4,24
	6,00	6,42	2,11	8,44	5,62
70	2,43	4,36	0,97	3,88	2,58
	4,00	6,65	2,27	9,08	6,05
	5,00	7,86	3,17	12,68	8,45
	6,00	8,93	4,09	16,36	10,90
90	2,43	5,38	1,48	5,92	3,94
	4,00	8,51	3,71	14,84	9,89
110	2,43	6,83	2,39	9,56	6,37
	4,00	10,03	5,16	20,64	13,76

De início, percebe-se que os níveis de tensão efetiva individualmente já são suficientes para que a bateria receba carga sem a necessidade de nenhuma adição externa, de forma que até a carga máxima é atingida em todas as excitações, com exceção da primeira.

Analisando os dados de autonomia, percebe-se que a utilização de um conjunto de amortecimento regenerativo pode conferir um ganho de mais de 13% a um módulo de bateria de referência, pelo modelo construído em uma soma de uma hora de utilização, ganho este que pode ser considerado totalmente de energia limpa e gratuita, ou melhor, reaproveitada.

Torna-se importante mencionar que todo o sistema foi idealizado para a melhor execução dentro das possibilidades expostas para pesquisas em bancada experimental, sendo assim, fica evidente que diferentes configurações de bobinas, tamanho de imãs e materiais envolvidos possam maximizar em muito os valores aqui encontrados. Contudo, a função principal da suspensão e amortecimento não foi aqui levada em consideração; o foco está nos padrões de energia elétrica que um amortecedor pode eventualmente ter, considerando que este sistema de indução pode muito bem fazer parte de uma totalidade de componentes que a partir daí, além de poder trabalhar como gerador apresentar-se como uma suspensão eficiente. Estas considerações, inclusive a utilização de materiais e modo de construção pode ser de inspiração para um trabalho posterior, sabendo agora que a premissa de gerador linear pôde aqui ser melhor comprovada.

Contudo, a inclusão dos carros elétricos na sociedade atual não depende somente da adequação da autonomia dos mesmos quanto à utilização das baterias e capacidade de percurso; à medida que a quantidade de carros elétricos for aumentando, uma maior demanda energética se fará necessário, o que exige o desenvolvimento destas de modo paralelo. Portanto carros sustentáveis devem ser avaliados não só pela capacidade de viajar de uma cidade a outra, mas também pelo impacto que uma grande frota causaria a oferta energética atual. De modo, que a proposta aqui apresentada pode ser avaliada de maneira ainda mais convincente frente a esta futura realidade.

6.7 Análise financeira e energética

Tomado como dado de referência um baixo valor de potência gerada baseado na Figura 66, que tem como origem o segundo modo de ensaio, o mesmo utilizado para a Tabela 10, uma análise aproximada de padrões de consumo e retorno a partir daqui é efetuada. A escolha deste modo de ensaio foi baseada na semelhança dos níveis adquiridos de modo geral relativo à configuração 3, que por uma avaliação extremamente crítica se comportou como melhor modelo para regeneração, porém optou-se por aquela por apresentar grande correspondência ao método teórico quanto aos sinais de voltagem, de modo que, o que se

concluir não será muito diferente do que se concluiria pela configuração número três, porém contará com o endosso matemático se necessário.

Deste modo, utilizou-se da potência gerada pela excitação em 50 mm de amplitude, vibrando a 4,00 Hz. Este é o menor valor registrado pelo qual os níveis de tensão atingem o máximo de uma bateria convencional de íon-lítio para o modo de ensaio escolhido. Em um veículo com quatro amortecedores, considerando obviamente a captação individual de cada um, o respectivo modo de excitação corresponde a totais 4,52 W.

Em termos energéticos, usados estes valores de referência, este veículo somente por este nível de geração própria, economizaria mais de 1 kWh por mês. Economicamente falando, considera-se 1kWh custando por volta de R$ 0,27, valor comum à demanda atual verificável nas contas de consumo. Para esta situação, vinte veículos economizariam por volta de R$ 5,90 reais segundo o que aqui foi verificado. Isto corresponde a aproximadamente:

- Dois litros de gasolina;
- ou três litros de Diesel;
- ou quatro litros de álcool etanol.

Para as redes de energias, uma frota de 1000 veículos economizaria cerca R$ 295,00/mês; o que equivale à manutenção autônoma de 1,1 MWh/mês sustentavelmente. Sendo que este cenário estendido para um ano corresponderia a 13,2 MWh alternativos e a economia de pelo menos R$ 3.564,00. O que daria pra abastecer mais de três casas de consumo enérgico médio/alto pelo mesmo período de 1 ano.

Comparando com a energia gerada por células fotovoltaicas, por exemplo, que já é utilizada nas tecnologias de transporte, tem-se a geração média hoje mais desenvolvida nesta alternativa por volta de 0,685 Wh/m2/dia. O que considerando um ano com aproximadamente 200 dias de sol proporciona 137 W. Deste modo, para que a mesma quantidade de energia seja gerada a mesmo nível de um único veículo ainda baseado nos dados anteriores, seriam necessário aproximadamente 52,8 m^2 de placas solares ligadas.

A Tabela 11 exibe o quanto de economia pode ser atribuído ao mesmo sistema de amortecimento regenerativo aplicados a um único veículo, tendo o mesmo período de solicitação diária adotado, como já exemplificado.

Tabela 11 – Equivalência de consumo individual.

Potência (W)	**Energia mensal (Wh)**	**Ganho financeiro (R$/mês)**	**Economia de gasolina (l/mês)**	**Economia de álcool (l/mês)**	**Economia de óleo Diesel (l/mês)**
2,08	499,2	134,78	56,16	103,68	74,88
4,52	1084,8	292,89	122,04	225,30	162,72
6,36	1526,4	412,12	171,72	317,02	228,96
8,44	2025,6	546,91	227,88	420,70	303,84
3,88	931,2	251,42	104,76	193,40	139,68
9,08	2179,2	588,38	245,16	452,60	326,88
12,68	3043,2	821,66	342,36	632,04	456,48
16,36	3926,4	1060,12	441,72	815,48	588,96
5,92	1420,8	383,61	159,84	295,08	213,12
14,84	3561,6	961,63	400,68	739,71	534,24
9,56	2294,4	619,48	258,12	476,52	344,16
20,64	4953,6	1337,47	557,28	1028,82	743,04

Em vista do consumo de combustível que poderia ser diminuído pela proposta inicial do presente trabalho, além das considerações anteriores, aqui já poderia se concluir que a proposta sugerida junto das considerações iniciais se torna favorável ao desenvolvimento dos carros movidos a eletricidade. Porém soma-se a isto que sistemas mais bem elaborados e visando o máximo das possibilidades, de modo que auxilie para que a totalidade de um veículo sustentável atinja as exigências da sociedade motora atual pode ser criados, de modo que outros sistemas de regeneração já existente como os muito citados KERS e células fotovoltaicas podem se unir em um só modelo objetivando o ganho energético total de um veículo, que pelos dados aqui levantados, a parcela provinda do amortecimento pode ser por si só bem considerável. Levando ainda em consideração, que o desenvolvimento desta tecnologia até a implementação ao uso não demanda altos custos, devido o simples princípio de funcionamento e modo de operação já conhecido, sendo os dos amortecedores convencionais.

Para o consumidor final, por exemplo, sugerindo que um nível médio possa ser alcançado nas solicitações naturais de um veículo, de forma a conferir os 3,88 W de potência sustentável, o que experimentalmente é possível, o mesmo economizaria o correspondente a aproximadamente 104 litros de gasolina por mês se a utilização fosse a de um carro popular, ou seja, adotando o preço do litro a R$ 2,40, isto gera uma economia mensal por volta de R$ 251 reais. Sendo que uma análise para sistemas de maior rendimento podem ser feitas baseando-se na Tabela 11.

Em uma referência de conjunto, podemos concluir que se as condições de rolagens continuarem as mesmas, ou seja, que o deslocamento de um automóvel ainda se mantenha por muito tempo por pneus de borracha em contato com solos pavimentados ou não, os

amortecedores regenerativos podem ser bem mais efetivos, com toda tecnologia de auxílio de energia, que como mencionado, não excluindo a possibilidade destas de trabalharem junto.

No quadro de geração de energia para abastecimento elétrico, em uma frota veicular, de modo que cada unidade possua a sustentabilidade de 3,88 W adotada como referência, a Tabela seguinte mostra o que isso corresponderia para as redes de energia.

Tabela 12 – Equivalência de consumo de frota.

Frota de 5.000 veículos			**Frota de 1.000.000 veículos**		
Economia mensal (MWh)	**Economia anual (MWh)**	**Economia anual (R$)**	**Economia mensal (MWh)**	**Economia anual (MWh)**	**Economia anual (R$)**
4,65	55,87	15.085,4	931,8	11.174,4	3.017.088.000

A título de comparação, uma frota de um milhão de veículos, portanto, para funcionar como adotado durante um mês, exigiria de uma usina de energia média, que produz cerca de 5.000 MWh, mais de duas horas de operação a mais só para que esta frota tivesse o mesmo nível de energia com a ausência dos amortecedores regenerativos. Vale mencionar que a frota atual de veículos na capital do estado de São Paulo, por exemplo, já ultrapassa sete milhões de veículos. Nos EUA, segundo (POGGETTO, 2011), do ano de 2011 até o término do primeiro semestre de 2012, cerca de 400.000 novos carros elétricos e híbridos estarão entrando em circulação, mesmo com estes modelos tendo ainda certa rejeição nas concessionárias perante perfis mais conservativos.

Logo, por si só os dados aqui apresentados constituíram uma simples análise, que pelo perfil energético e econômico é muito bem vinda a médio e longo prazo, podendo os amortecedores regenerativos serem considerados uma fonte de energia limpa com dados consideráveis pelo padrão dos experimentos.

Em relação ao ganho de autonomia, isto se desenvolverá a medida que a tecnologia empregada também fizer o mesmo caminho, contudo, a ideia de um veículo demasiadamente sustentável pode ser mais realista considerando todas as exposições aqui apresentadas, e os padrões de sociedade se aproximarem dos padrões atuais destes veículos.

Em relação aos ensaios, muitas reações podem ter interferido no sinal definido pela bobina, como histerese, dispersão de campo e etc. Porém o foco do trabalho não foi o estudo destes fenômenos e sim fazer uma análise quantitativa do resultado final do emprego de bobinas induzidas por imãs excitados por movimentos que um amortecedor teria. A confiabilidade nos dados se deve à confiabilidade do sistema de aquisição que foi aferido

pouco antes dos ensaios com relatório do próprio fabricante, definido o padrão de aferição em voltagem, no qual constituiu a natureza dos sinais gerados.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostra que sistemas regenerativos baseados nas oscilações de amortecedores podem e devem ser viáveis à medida que os carros elétricos também se tornam uma realidade mais concreta no nosso dia a dia. Os valores de pesquisa aqui alcançados apesar de já conferirem uma análise favorável à proposta aqui sugerida, correspondem de forma ainda primária se comparado a um projeto bem elaborado, objetivando a construção de amortecedores regenerativos. Deste modo, a viabilidade desta tecnologia, fundamentada também em todo o decorrer deste trabalho, pode ser considerada muito sólida, diante do objetivo apresentado. Financeiramente, isto também se confirma, proporcionando uma economia considerável tanto para o consumidor quanto para a rede enérgica como um todo.

REFERÊNCIAS

BRAIN, M. **Howstuffworks – Como funciona o carro elétrico.** 2008. Disponível em: <http://carros.hsw.uol.com.br/carros-eletricos.htm>. Acesso em 16 fev. 2012.

BUENO, C. **Carros elétricos - A evolução da indústria**. 2008. Disponível em: <http://360graus.terra.com.br/ecologia/default.asp?did=26947&action=geral>. Acesso em: 17 nov 2011.

BUENO, C. **Como funciona um carro elétrico**. 2008. Disponível em: <http://360graus.terra.com.br/ecologia/default.asp?did=26949&action=geral>. Acesso em: 17 nov 2011.

BUENO, C. **Carros elétricos, veículos não poluentes, silenciosos e econômicos** . 2008. Disponível em: <http://360graus.terra.com.br/ecologia/default.asp?did=26946&action=reportagem>. Acesso em: 18 nov. 2011.

BUENO, C. **Carros elétricos nas ruas**. 2008. Disponível em: <http://360graus.terra.com.br/ecologia/default.asp?did=26948&action=geral>. Acesso em: 18 nov. 2011.

BUENO, C. **Carros solares disputam corrida de 3000 km na Austrália**. 2003. Disponível em: <http://360graus.terra.com.br/geral/default.asp?did=7400&action=reportagem>. Acesso em: 17 nov 2011.

CAGLE, A. **Sebring-Vanguard CitiCar.** 2010. Disponível em: <http://www.carlustblog.com/2010/01/sebringvanguard-citicar.html>. Acesso em: 15 fev. 2012

CAGLE, A. **GM EV1.** 2010. Disponível em: <http://www.carlustblog.com/2010/01/ev1.html>. Acesso em: 15 fev. 2012

CALMON, F. **Amortecedores regenerativos estão mais próximos da realidade.** 2009. Disponível em: <http://revista.webmotors.com.br/mercado/amortecedores-regenerativos-estao-mais-proximos-da-realidade/1334081416535>. Acesso em: 12 abr. 2012.

CHAGAS, L. G.; URBANO, A.; SCARMINIO, J. **Princípios Físicos e Químicos de Baterias de Íon Lítio.** 2006. Universidade Estadual de Londrina, Londrina. Disponível em: < http://www.uel.br/cce/fisica/sefis/xisefis/arquivos/resumos/r44.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2012.

DECOURT, A. **Ônibus Elétrico da Light**. 2004. Disponível em: <http://www.rioquepassou.com.br/2004/01/23/1417/>. Acesso em: 12 fev. 2012.

FERRO, A. **Energia solar em ônibus.** Associação brasileira do veículo elétrico. 2008. Disponível em: <http://www.abve.org.br/destaques/destaque08048.shtml>. Acesso em: 14 abr. 2012.

GOLDEMBERG, C.; LEBENSZTAJN, L.; PELLINI, E. L.; **A evolução do carro elétrico**. 2005. 17 f. Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo. 2012. Disponível em: <http://www.lps.usp.br/lps/arquivos/conteudo/grad/dwnld/CarroEletrico2005.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2011.

GONÇALVEZ, J. P.; TAVARES, M, J, P.; BAPTISTA, P, C, A, F.; DIOGO, A. S. P. V. D.; CARVALHO, T. C. M. **Escape ecológico.** 2002. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. 2002. Disponível em: <http://campus.fct.unl.pt/afr/ipa_0203/g04_2escape_ecologico/pprincipal.htm>. Acesso em: 13 fev. 2012.

GOULART, A. **Como funciona um carro elétrico.** 2010. Disponível em: < http://arquivinho.com/como-funciona-um-carro-eletrico/>. Acesso em: 16 fev. 2012.

HARRIS, WILLIAM. **HowStuffWorks - Como funcionam as suspensões dos carros**. 2007. Disponível em: <http://carros.hsw.uol.com.br/suspensoes-dos-carros2.htm>. Acesso em: 28 abr. 2011.

HERNALSTEENS, T. Revisão bibiográfica. In: **Aplicação de controle semi-ativo em uma suspensão hidropneumática.** 2006. f.3-6. Trabalho de graduação. Faculdade de engenharia mecânica. Universidade estadual de Campinas. Campinas. 2012. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~lva/pdf/novos/TG1_Thierry_Hernalsteens.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2012.

IMPINNISI, P. R. **Baterias. Situação atual e perspectivas para os próximos 10 anos.** 2009. Disponível em: <www.inee.org.br/down_loads/veh/VE2009_Impinnizzi.ppt>. Acesso em: 07 fev. 2012.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **IPT desenvolve tecnologia para reciclar ímãs de discos rígidos.** 2011. Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=tecnologia-reciclar-imas-discos-rigidos>. Acesso em: 17 jan. 2012.

O GLOBO. **EUA anunciam US$ 1 bilhão em incentivos para veículos elétricos**. 2012. Disponível em: <http://g1.globo.com/carros/noicia/2012/03/eua-anunciam-us-1-bilhao-em-incentivos-para-veiculos-eletricos.html>. Acesso em: 11 mar. 2012.

MACHADO, J. D. **Solares, um novo conceito de carro solar**. 2011. Disponível em: <http://www.tecmundo.com.br/energia-solar/12753-solaris-um-novo-conceito-de-carro-solar.htm>. Acesso em 18 abr. 2012.

MOURA, M. **Revista Época – Testamos o carro elétrico.** 2011. Disponível em <http://revistaepoca.globo.com/Revista/Epoca/0,,EMI243896-15201,00.html>. Acesso em 11 abr. 2012.

OLIVEIRA, R. V. M. **Estudo de amortecedores regenerativos por indução.** 2010. Trabalho de graduação (Engenharia Mecânica). Faculdade de engenharia de Guaratinguetá. Universidade estadual paulista Júlio de Mesquita Filho. Guaratinguetá. 2011.

OLIVEIRA, R. V. M. **Estudo da força eletromotriz em amortecedores indutivos.** 2011. 10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicação. Dincon. Disponível em: < http://www.feis.unesp.br/dincon2011/program_book%20v3.pdf> . Acesso em: 03 de mai. 2012.

OLIVEIRA, R. V. M. **Geração de energia com amortecedores indutivos.** 2011. XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e Industrial. Disponível em: <http://www.conemi.com.br/xiconemi/trabalhos/ID-38.pdf>. Acesso em: 28 de abr. 2012.

POGGETTO, P. D. **Venda de carros híbridos cai nos EUA; concessionários veem rejeição**. 2011. Disponível em: < http://g1.globo.com/carros/noticia/2011/02/venda-de-carros-hibridos-cai-nos-eua-concessionarios-veem-rejeicao.html>. Acesso em 18 de abr. 2012.

PERCÍLIA, E. **Brasil Escola - Primeira Guerra Mundial.** 2010. Disponível em <http://meuartigo.brasilescola.com/historia-geral/primeira-guerra-mundial.htm>. Acesso em 12 fev. 2012.

PESQUERO N. C.; BUENO P. R.; VARELA, A. A.; LONGO, E**.** Materiais cerâmicos de inserção aplicados a baterias de íons lítio. In: **Cerâmica (online).** 2008. v. 54. f.233-244. Faculdade de Ciências e Letras. Universidade estadual Paulista. Araraquara. 2012. Disponível em: < http://www.scielo.br/pdf/ce/v54n330/a1454330.pdf >. Acesso em: 14 fev. 2012.

REVISTA VEJA. **Apesar do progresso, baterias para carros elétricos ainda têm um longo caminho pela frente.** 2011. Ciência – energias alternativas. Disponível em: <http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia/apesar-do-progresso-baterias-para-carros-eletricos-ainda-tem-um-longo-caminho-pela-frente>. Acesso em: 19 fev. 2012.

RUFFO, G. H. **Venturi Eclectic dispensa abastecimento.** 2007. Disponível em: <http://revista.webmotors.com.br/revista/mercado/venturi-eclectic-dispensa-abastecimento/1334080905964?rendermode=previewnoinsite>. Acesso em: 19 fev. 2012.

SAMY, R. **Ford T, primeiro carro do mundo produzido em série, faz cem anos.** 2008. Disponível em: <http://revista.webmotors.com.br/antigos/ford-t-primeiro-carro-do-mundo-produzido-em-serie-faz-cem-anos/1334081194448>. Acesso 09 de abr de 2012.

SANTANA, G. P. **Pequena história da pilha,** 15 de mar de 2008. Disponível em < http://www.cq.ufam.edu.br/bateria/Historia_Bateria_Volta.html>. Acesso 27 fev. 2012.

SHERMAN, D. **First to Sixty: La Jamais Contente.** 2011. Disponível em: <http://www.automobilemag.com/features/news/1102_la_jamais_contente/viewall.html>. Acesso 12 fev. 2012.

TONI, G **HowStuffWorks - O que é o sistema Kers da F-1.** 2009. Disponível em <http://carros.hsw.uol.com.br/kers.htm>. Acesso em 05 mar. 2012.

TRINDADE, F. **Fisker Karma Plug-in Hybrid com 408 cv custa R$ 202 mil e já tem 1300 pedidos.** 2009. Disponível em: <http://carplace.virgula.uol.com.br/fisker-karma-plug-in-hybrid-com-408cv-custa-r-202-mil-e-ja-tem-1300-pedidos/>. Acesso 14 abr. 2012.

WIKIPEDIA. **Imã de neodímio.** 2010. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dm%C3%A3_de_neod%C3%ADmio>. Acesso em: 21 ago. 2011.

BIBLIOGRAFIA

FERRAZ NETTO, LUIZ. **Interações magnéticas:** Parte 3. Campo magnético de imãs. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/13_T04_3.asp>. Acesso em: 2 jul. 2011.

FERREIRA, H. T. **Determinação das frequências naturais e modos de vibrar de um veículo de dois eixos através de um programa computacional em MatLab-Simulink.** 2003. 86 f. Dissertação de mestrado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2012. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAE0EAJ/engenharia-frenagem-usp>. Acesso: 21 ago. 2011.

HALLIDAY, D; RESNICK, R. e MERRILL,J. **Fundamentos de Física**, vol. 3, (Editora LTC, RJ,1994), cap. 29-8 e 36-2, 3, 4.

Indústria Monroe de amortecedores. **Catálogo de amortecedores Monroe.** Disponível em: <https://www.monroe.com.br/upload/8379-cat-logo-final-monroe-2.011.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2011.

MARQUES, T. P. **Eletromagnetismo – Principais propriedades eletromagnéticas.** 2010. Universidade Estácio de Sá. 18 f. Rio de Janeiro. RJ. Disponível em < http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAx2kAC/propriedades-eletromagneticas>. Acesso: 21 ago. 2011.

WILSON, T. V. **Fabricando imãs: os detalhes.** Disponível em: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/imas2.htm>. Acesso em: 03 set. 2011.

APÊNDICE A - Sinais de tensão gerados pelos ensaios

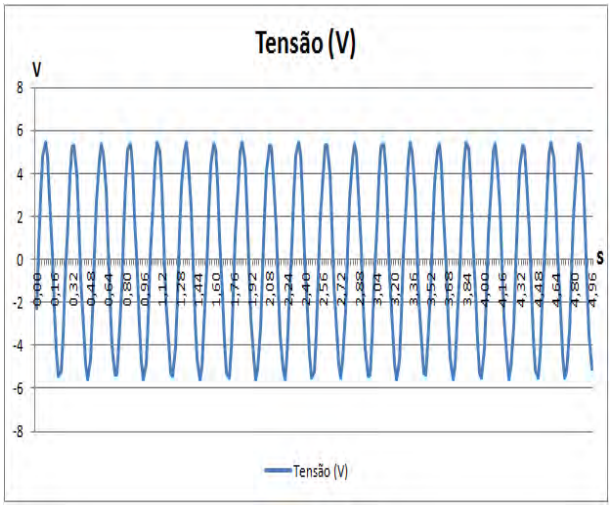


Figura 1: Configuração 1. Sinal com amplitude de 50 mm a 4,00 Hz.

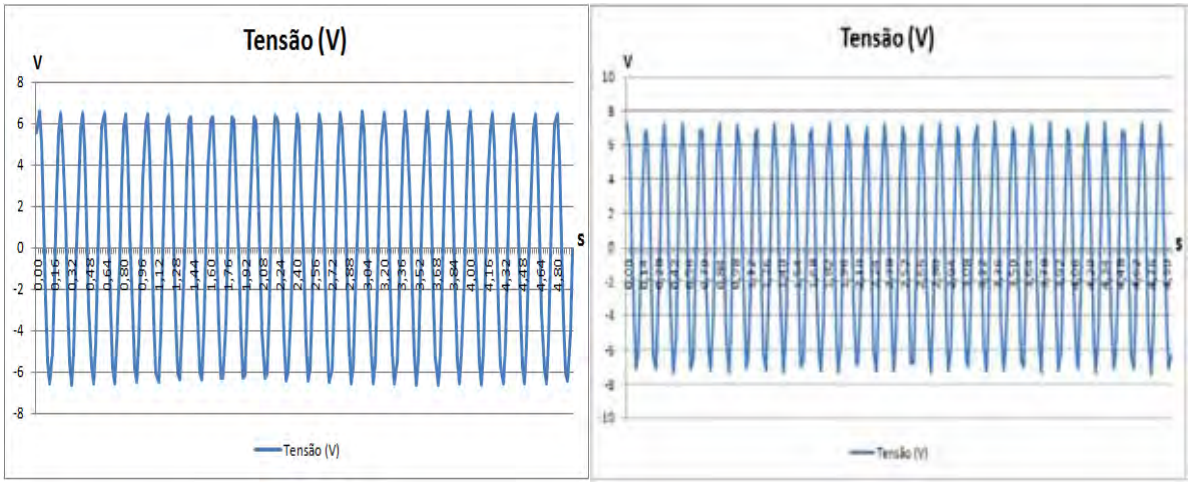


Figura 2: Configuração 1. Sinal com amplitude de 50 mm a 5,00 Hz (esq.) e 6,00 Hz (dir.).

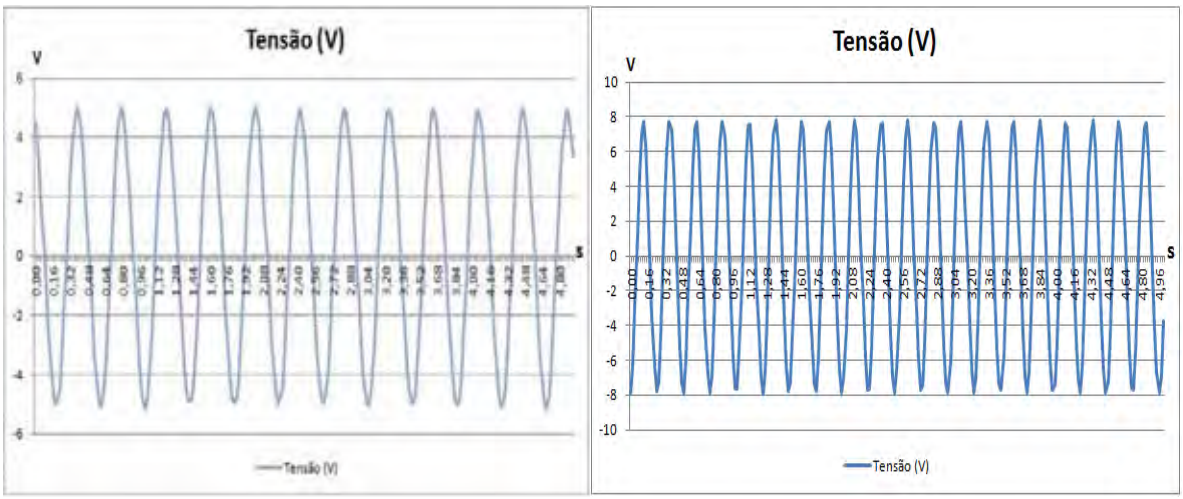


Figura 3 – Configuração 1. Sinal com amplitude de 70 mm a 2,43 Hz (esq.) e 4,00 Hz (dir.).

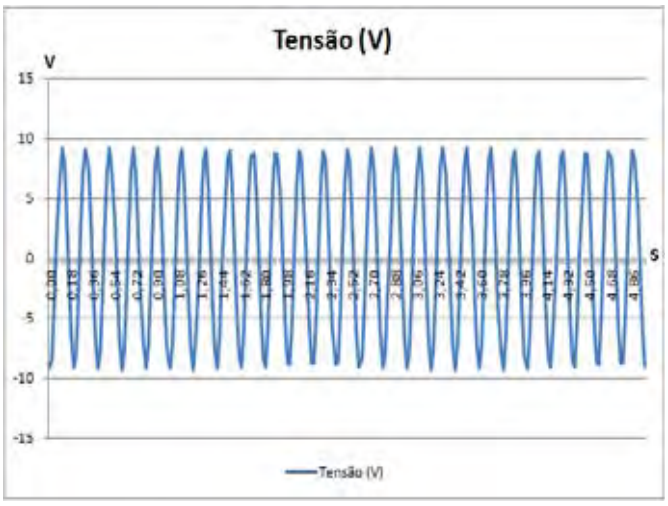


Figura 3 – Configuração 1. Sinal com amplitude de 70 mm a 5,00 Hz.

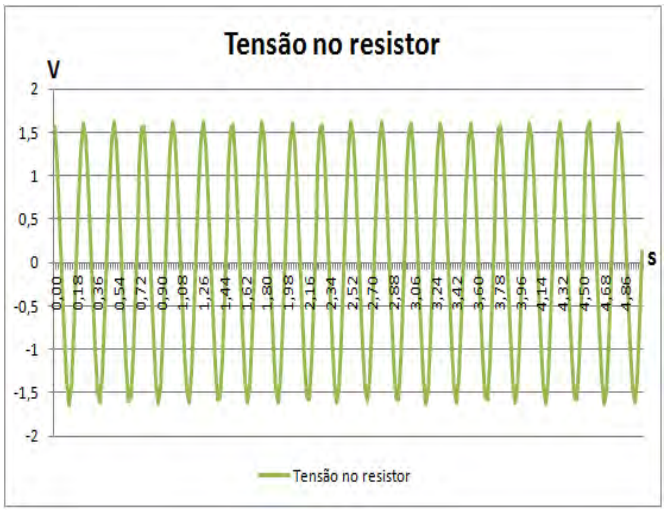


Figura 4 – Configuração 1. Sinal no resistor com amplitude de 90 mm a 4,00 Hz.

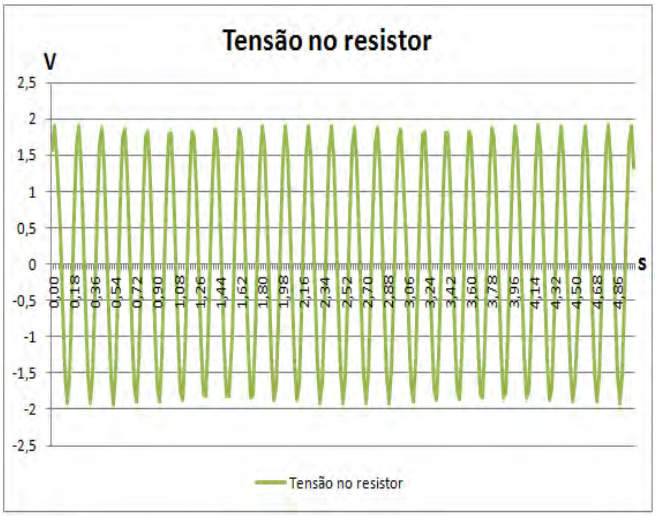


Figura 5 – Configuração 1. Sinal no resistor com amplitude de 90 mm a 5,00 Hz.

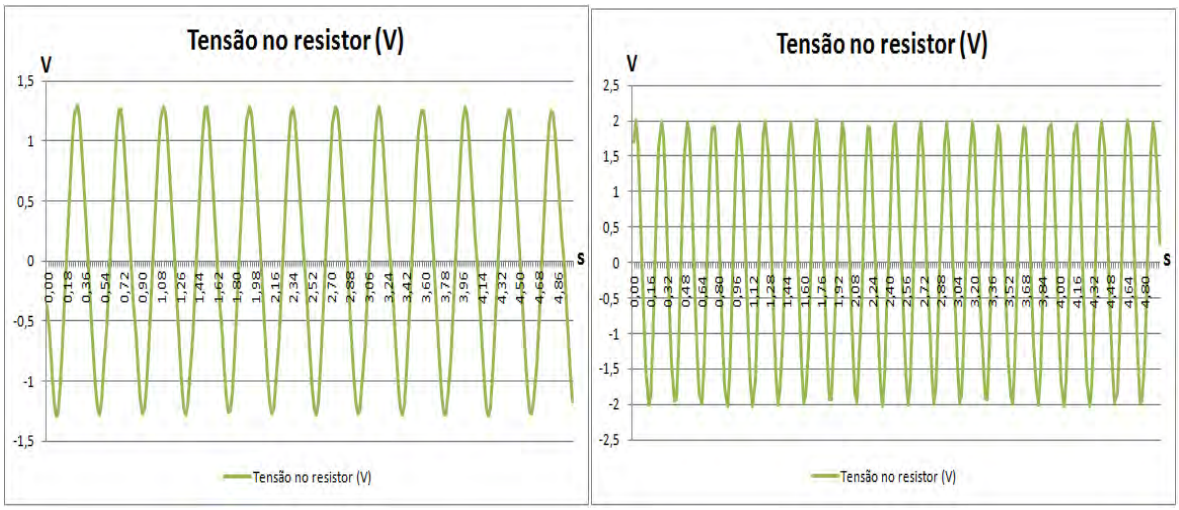


Figura 6 – Configuração 1. Sinal no resistor com amplitude de 110 mm a 2,43 Hz (esq.) e 4,00 Hz (dir.).

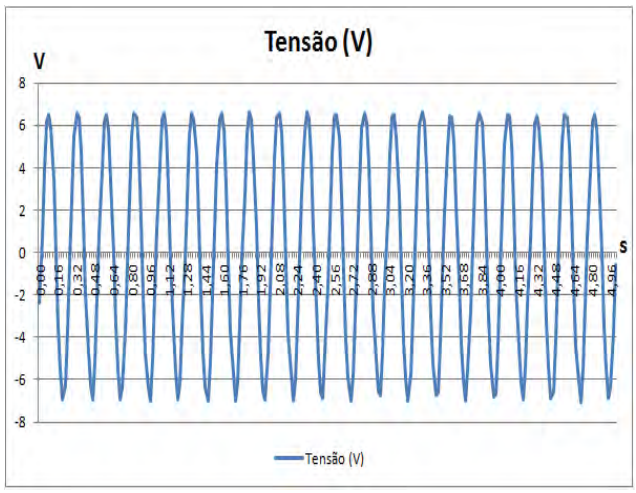


Figura 7 – Configuração 2. Sinal com amplitude de 50 mm a 4,00 Hz.

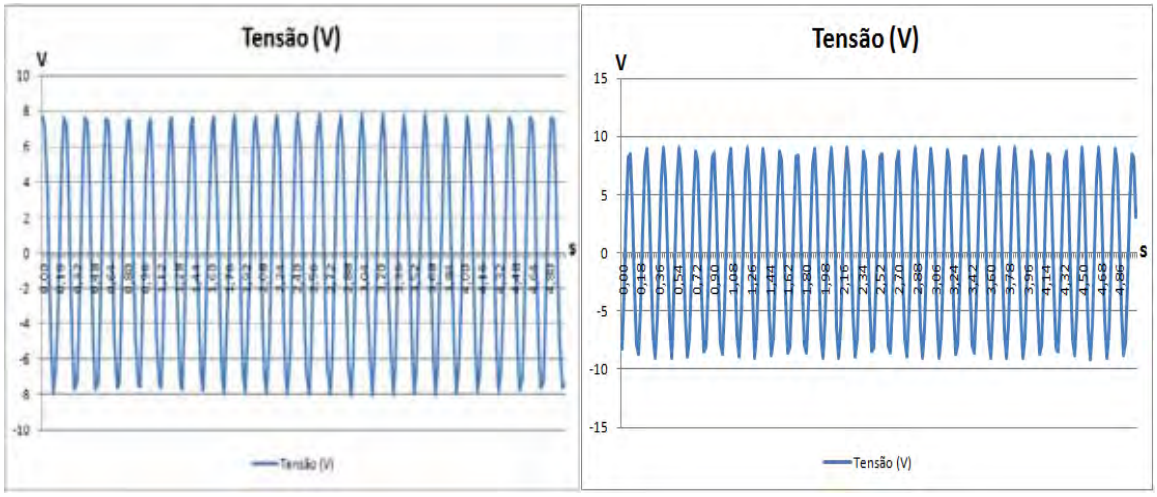


Figura 8 – Configuração 2. Sinal com amplitude de 50 mm a 5,00 Hz (esq.) e 6,00 Hz (dir.).

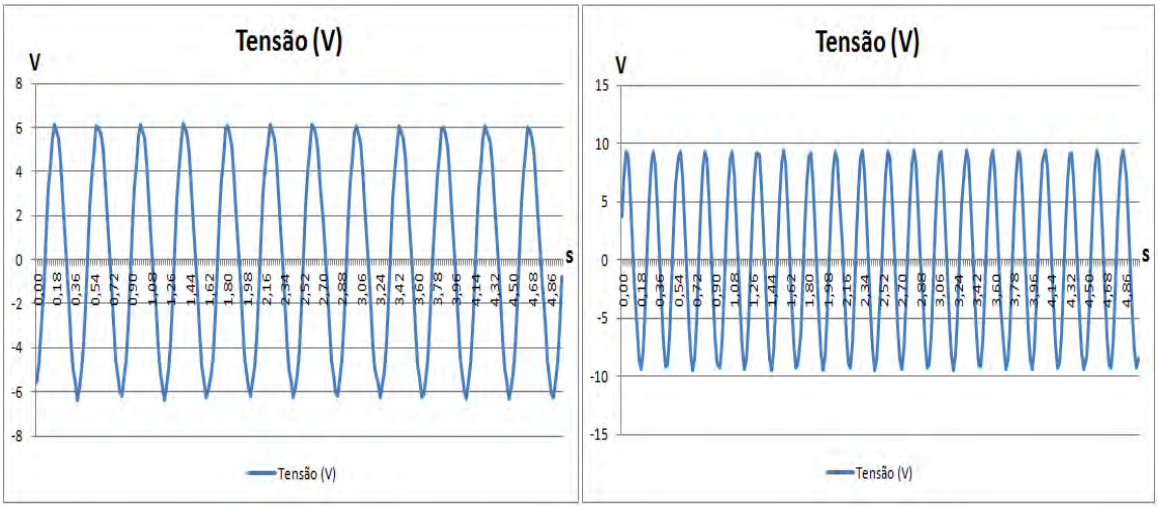


Figura 9 – Configuração 2. Sinal com amplitude de 70 mm a 2,43 Hz (esq.) e 4,00 Hz (dir.).

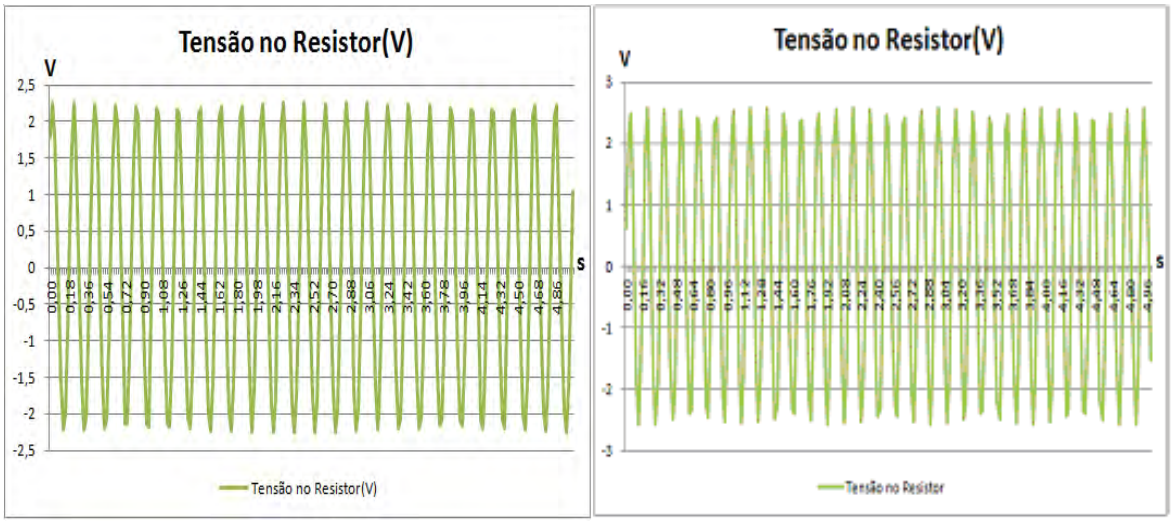


Figura 10 – Configuração 2. Sinal no resistor com amplitude de 70 mm a 5,00 Hz (esq.) e 6,00 Hz (dir.).

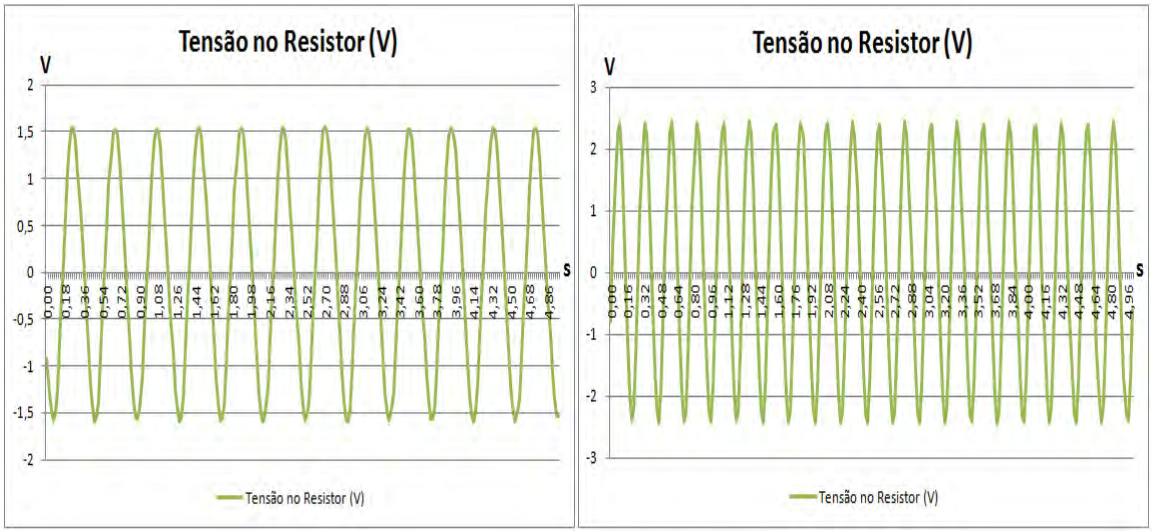


Figura 11 – Configuração 2. Sinal no resistor com amplitude de 90 mm a 2,43 Hz (esq.) e 4,00 Hz (dir.).

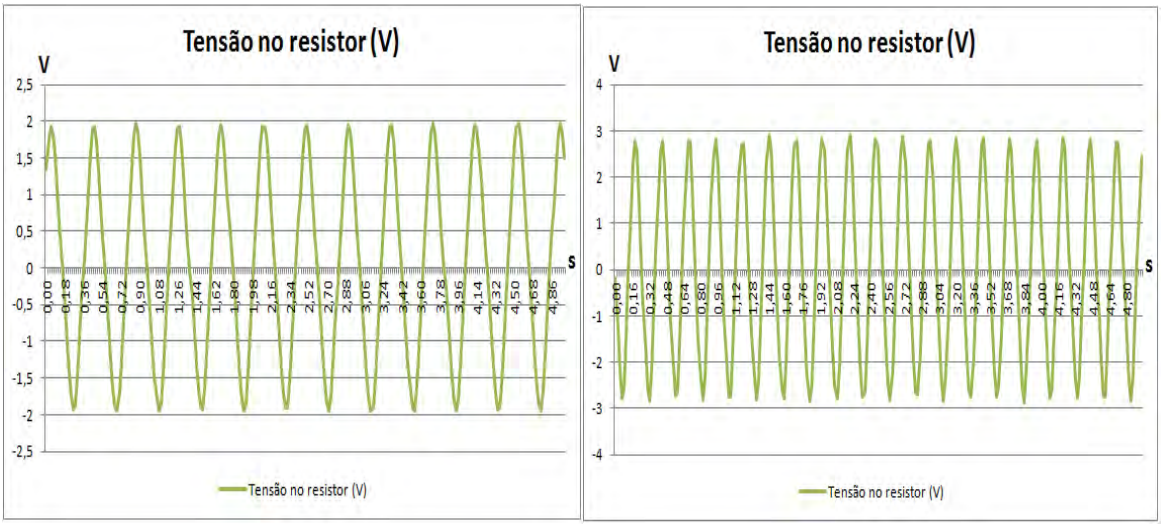


Figura 12 – Configuração 2. Sinal no resistor com amplitude de 110 mm a 2,43 Hz (esq.) e 4,00 Hz (dir.).

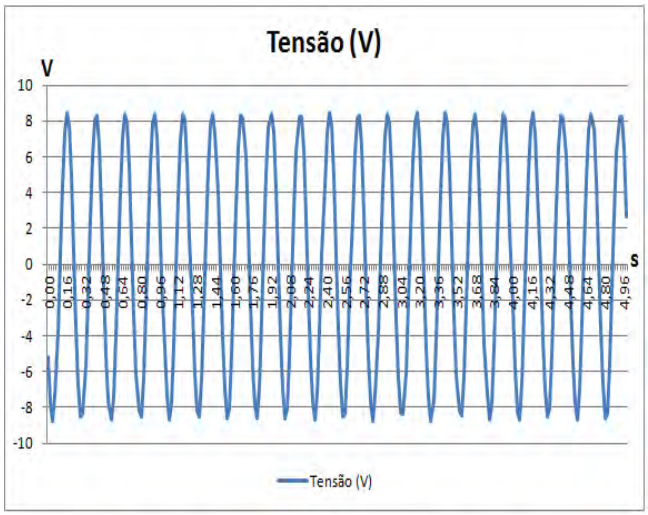


Figura 13 – Configuração 3. Sinal com amplitude de 50 mm a 4,00 Hz.

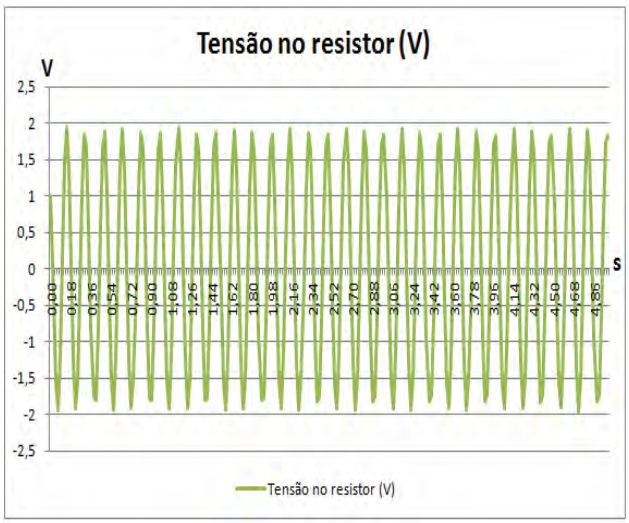


Figura 14 – Configuração 3. Sinal no resistor com amplitude de 50 mm a 6,00 Hz.

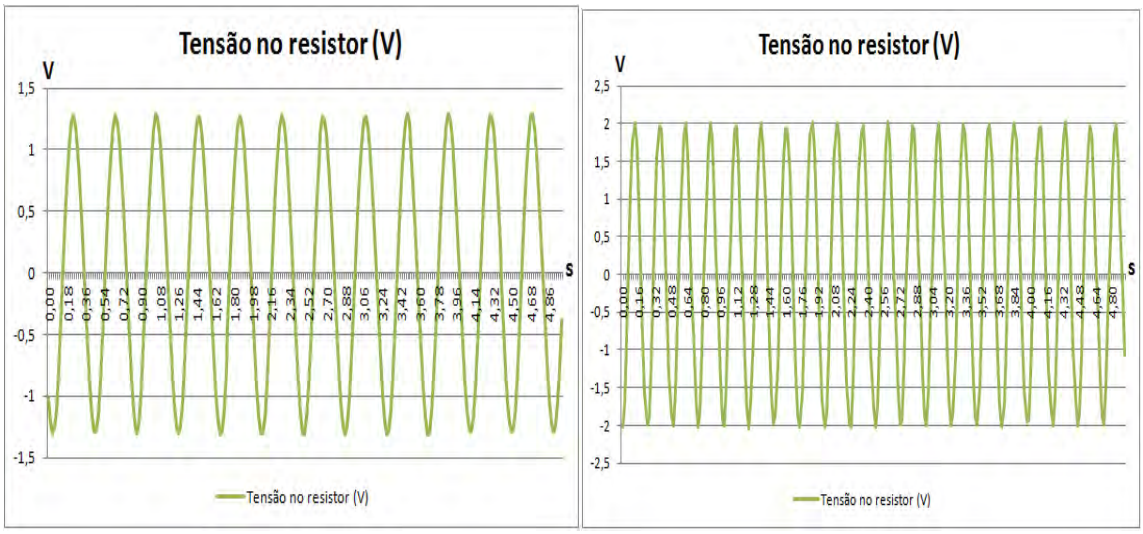


Figura 15 – Configuração 3. Sinal no resistor com amplitude de 70 mm a 2,42 Hz (esq.) e 4,00 Hz (dir.).

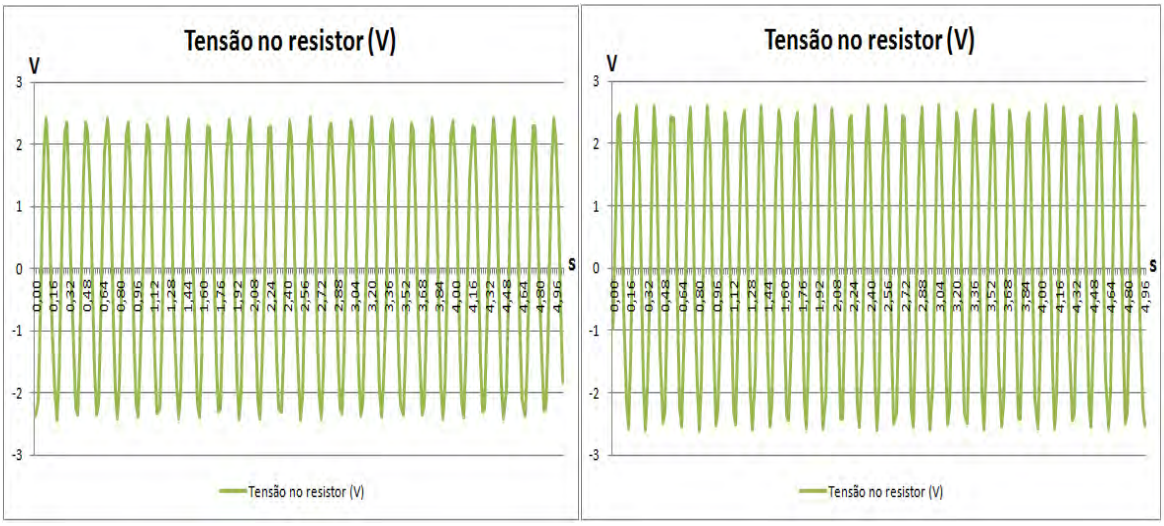


Figura 16 – Configuração 3. Sinal no resistor com amplitude de 70 mm a 5,00 Hz (esq.) e 6,00 Hz (dir.).

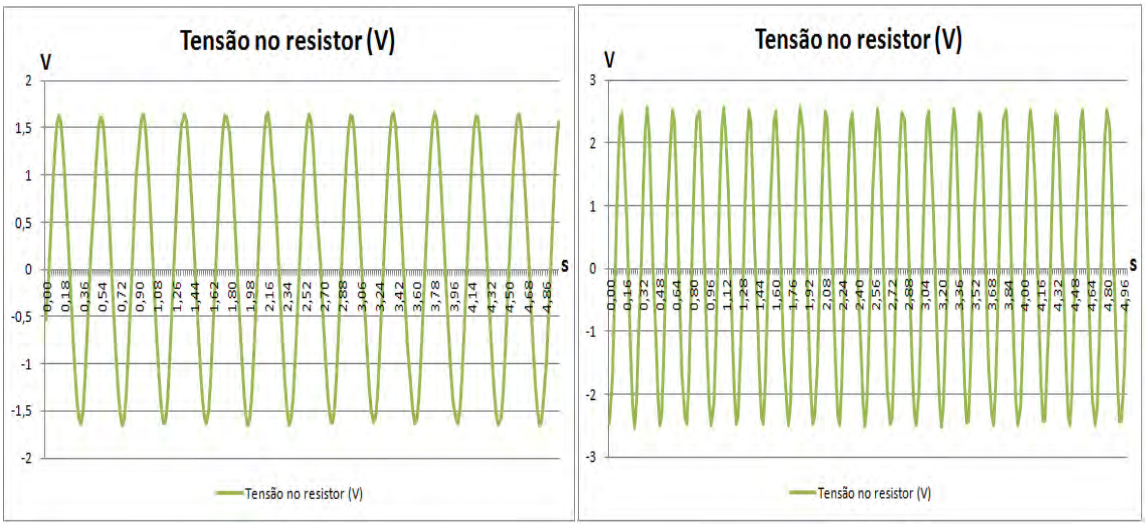


Figura 17 – Configuração 3. Sinal no resistor com amplitude de 90 mm a 2,42 Hz (esq.) e 4,00 Hz (dir.).

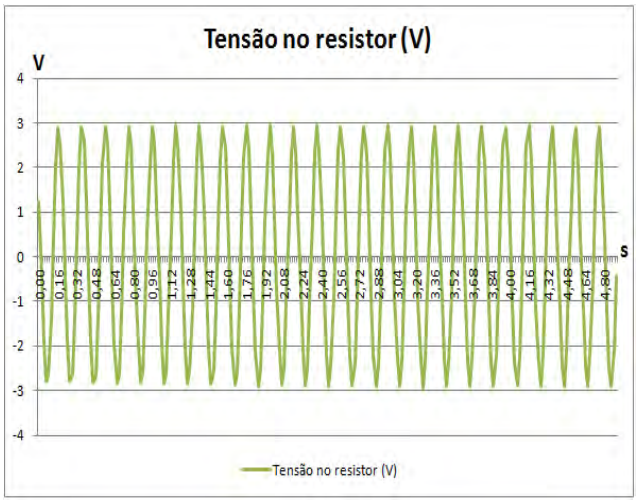


Figura 18 – Configuração 3. Sinal no resistor com amplitude de 90 mm oscilando a 5,00 Hz.

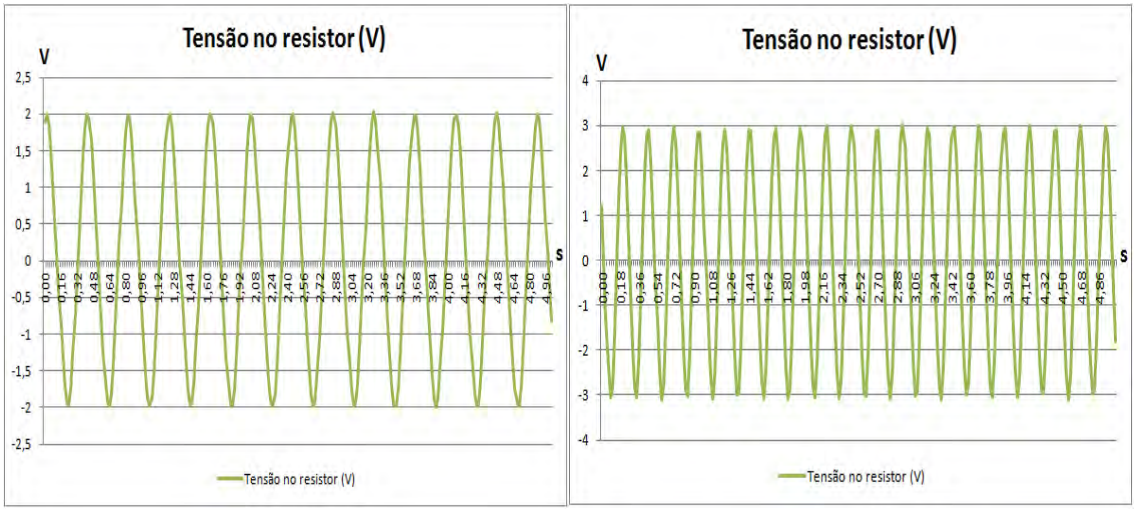


Figura 19 – Configuração 3. Sinal no resistor com amplitude de 110 mm a 2,42 Hz (esq.) e 4,00 Hz (dir.).

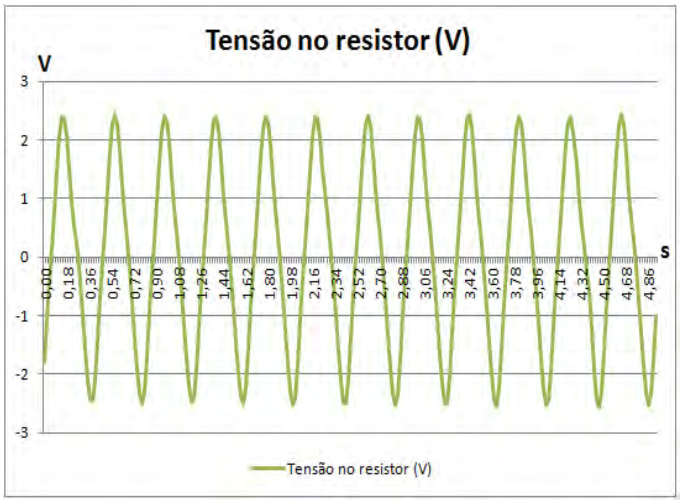
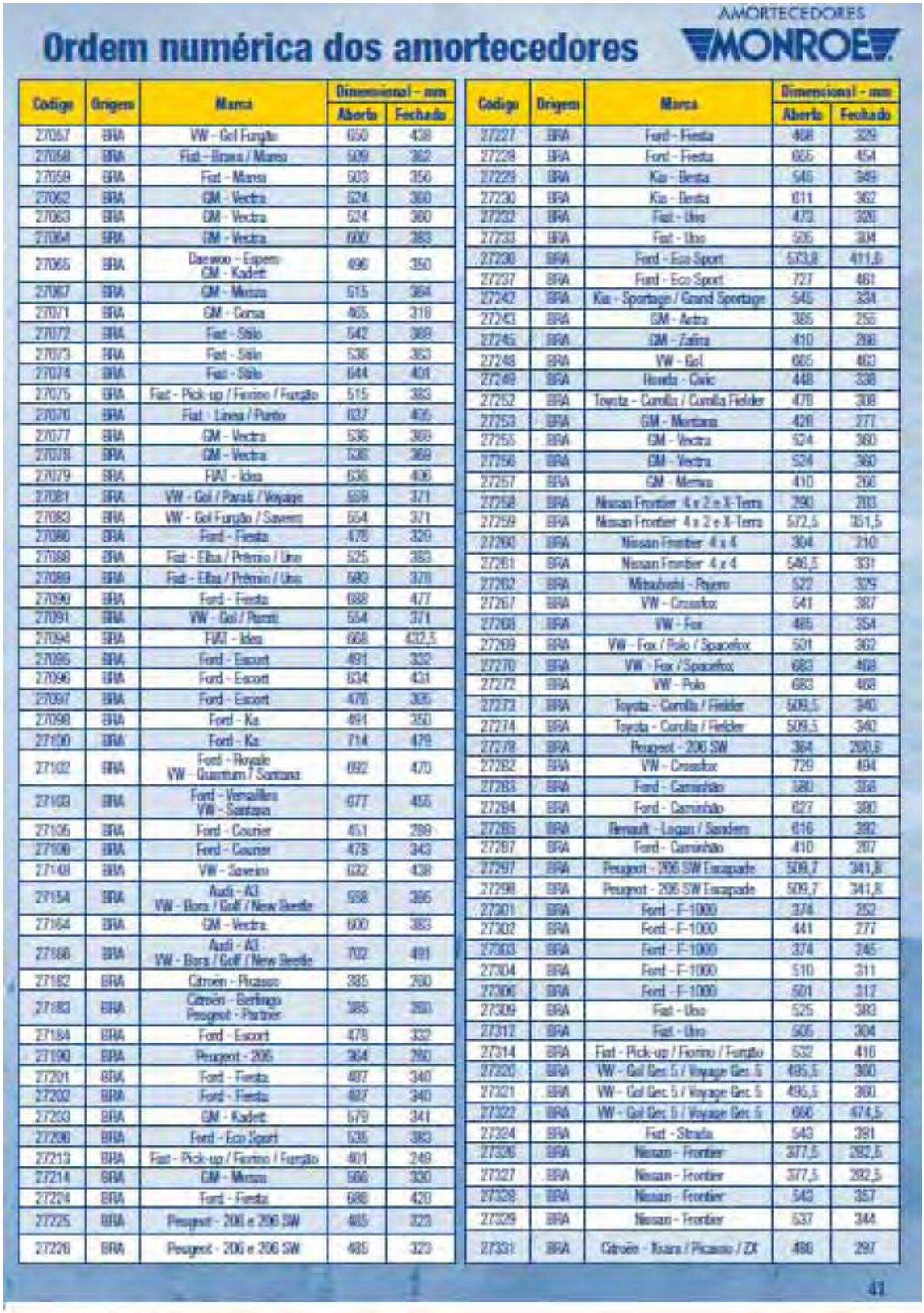


Figura 20– Configuração 3. Sinal no resistor com amplitude de 130 mm a 2,42 Hz.

APÊNDICE B – Catálogo de amortecedores



AMORTECEDORES MONROE

Ordem numérica dos amortecedores

Código	Origem	Marca	Dimensional - mm	
			Aberto	Fechado
27057	BRA	VW - Gol Furgão	550	438
27058	BRA	Fiat - Brava / Marea	509	362
27059	BRA	Fiat - Marea	503	356
27062	BRA	GM - Vectra	524	360
27063	BRA	GM - Vectra	524	360
27064	BRA	GM - Vectra	600	383
27065	BRA	Daewoo - Espero GM - Kadett	696	350
27067	BRA	GM - Monza	515	364
27071	BRA	GM - Corsa	465	318
27072	BRA	Fiat - Stilo	542	369
27073	BRA	Fiat - Stilo	536	363
27074	BRA	Fiat - Stilo	644	401
27075	BRA	Fiat - Pick-up / Fiorino / Furgão	515	353
27076	BRA	Fiat - Linea / Punto	637	405
27077	BRA	GM - Vectra	536	369
27078	BRA	GM - Vectra	536	369
27079	BRA	FIAT - Idea	536	406
27081	BRA	VW - Gol / Parati / Voyage	559	371
27083	BRA	VW - Gol Furgão / Saveiro	554	371
27086	BRA	Ford - Fiesta	476	329
27088	BRA	Fiat - Elba / Prêmio / Uno	525	383
27089	BRA	Fiat - Elba / Prêmio / Uno	580	378
27090	BRA	Ford - Fiesta	688	477
27091	BRA	VW - Gol / Parati	554	371
27094	BRA	FIAT - Idea	668	432,5
27095	BRA	Ford - Escort	491	332
27096	BRA	Ford - Escort	634	431
27097	BRA	Ford - Escort	476	305
27098	BRA	Ford - Ka	491	350
27100	BRA	Ford - Ka	714	479
27102	BRA	Ford - Royale VW - Quantum / Santana	692	470
27103	BRA	Ford - Versailles VW - Santana	677	455
27105	BRA	Ford - Courier	451	289
27106	BRA	Ford - Courier	475	343
27148	BRA	VW - Saveiro	622	438
27154	BRA	Audi - A3 VW - Bora / Golf / New Beetle	598	395
27164	BRA	GM - Vectra	600	383
27166	BRA	Audi - A3 VW - Bora / Golf / New Beetle	702	491
27182	BRA	Citroën - Picasso	385	260
27183	BRA	Citroën - Berlingo Peugeot - Partner	385	260
27184	BRA	Ford - Escort	476	332
27190	BRA	Peugeot - 206	364	260
27201	BRA	Ford - Fiesta	497	340
27202	BRA	Ford - Fiesta	497	340
27203	BRA	GM - Kadett	579	341
27206	BRA	Ford - Eco Sport	535	383
27213	BRA	Fiat - Pick-up / Fiorino / Furgão	401	249
27214	BRA	GM - Monza	566	330
27224	BRA	Ford - Fiesta	688	420
27225	BRA	Peugeot - 206 e 206 SW	485	323
27226	BRA	Peugeot - 206 e 206 SW	485	323

Código	Origem	Marca	Dimensional - mm	
			Aberto	Fechado
27227	BRA	Ford - Fiesta	498	329
27228	BRA	Ford - Fiesta	665	454
27229	BRA	Kia - Besta	545	349
27230	BRA	Kia - Besta	611	362
27232	BRA	Fiat - Uno	473	326
27233	BRA	Fiat - Uno	505	304
27236	BRA	Ford - Eco Sport	573,8	411,6
27237	BRA	Ford - Eco Sport	727	461
27242	BRA	Kia - Sportage / Grand Sportage	545	334
27243	BRA	GM - Astra	385	255
27245	BRA	GM - Zafira	410	260
27248	BRA	VW - Gol	665	403
27249	BRA	Honda - Civic	448	338
27252	BRA	Toyota - Corolla / Corolla Fielder	478	308
27253	BRA	GM - Montana	428	277
27255	BRA	GM - Vectra	524	360
27256	BRA	GM - Vectra	524	360
27257	BRA	GM - Meriva	410	260
27258	BRA	Nissan Frontier 4 x 2 e X-Terra	390	203
27259	BRA	Nissan Frontier 4 x 2 e X-Terra	572,5	351,5
27260	BRA	Nissan Frontier 4 x 4	304	210
27261	BRA	Nissan Frontier 4 x 4	546,5	331
27262	BRA	Mitsubishi - Pajero	522	329
27267	BRA	VW - Crossfox	541	387
27268	BRA	VW - Fox	485	354
27269	BRA	VW - Fox / Polo / Spacefox	501	362
27270	BRA	VW - Fox / Spacefox	683	488
27272	BRA	VW - Polo	683	488
27273	BRA	Toyota - Corolla / Fielder	509,5	340
27274	BRA	Toyota - Corolla / Fielder	509,5	340
27278	BRA	Peugeot - 206 SW	364	260,8
27282	BRA	VW - Crossfox	729	494
27283	BRA	Ford - Caminhão	580	358
27284	BRA	Ford - Caminhão	627	380
27285	BRA	Renault - Logan / Sandero	616	392
27287	BRA	Ford - Caminhão	410	287
27297	BRA	Peugeot - 206 SW Escapade	509,7	341,8
27298	BRA	Peugeot - 206 SW Escapade	509,7	341,8
27301	BRA	Ford - F-1000	374	252
27302	BRA	Ford - F-1000	441	277
27303	BRA	Ford - F-1000	374	245
27304	BRA	Ford - F-1000	510	311
27306	BRA	Ford - F-1000	501	312
27309	BRA	Fiat - Uno	525	383
27312	BRA	Fiat - Uno	505	304
27314	BRA	Fiat - Pick-up / Fiorino / Furgão	532	416
27320	BRA	VW - Gol Ger. 5 / Voyage Ger. 5	495,5	360
27321	BRA	VW - Gol Ger. 5 / Voyage Ger. 5	495,5	360
27322	BRA	VW - Gol Ger. 5 / Voyage Ger. 5	660	474,5
27324	BRA	Fiat - Strada	543	391
27326	BRA	Nissan - Frontier	377,5	282,5
27327	BRA	Nissan - Frontier	377,5	282,5
27328	BRA	Nissan - Frontier	543	357
27329	BRA	Nissan - Frontier	537	344
27331	BRA	Citroën - Xsara / Picasso / ZX	486	297

41

Ordem numérica dos amortecedores

Código	Origem	Marca	Dimensional - mm	
			Aberto	Fechado
27332	BRA	Citroën - Xsara / Picasso / ZX	486	297
27333	BRA	GM - Suprema	544	322
27336	BRA	Citroën - Berlingo / Partner	486	297
27337	BRA	Citroën - Berlingo / Partner	486	297
27338	BRA	Peugeot - 306	470	297,5
27339	BRA	Peugeot - 306	470	297,5
27340	BRA	Ford - Ka	478	306
27341	BRA	Ford - Ka	708,4	450
27377	BRA	Ford - Escort / Verona	491	334
27378	BRA	Ford - Escort VW - Logus / Pointer	491	334
27382	BRA	Ford - Twin-I-Beam	451	280
27401	BRA	Ford - Del Rey	423	320
27403	BRA	Ford - Belina / Escala	423	320
27410	BRA	Ford - A1000 / F-1000 / Twin-I-Beam	384	248
27411	BRA	Ford - A1000 / F-1000	441	276
27412	BRA	Ford - Twin-I-Beam	412	262
27480	BRA	GM - Pick-up	423	296
27481	BRA	GM - Pick-up	420	281
27483	BRA	GM - Blazer	608	368
27485	BRA	GM - Pick-up	638	383
27492	BRA	GM - Blazer	423	390
27494	BRA	Ford - F-250	410	287
27495	BRA	Ford - F-250	697	420
27498	BRA	GM - Blazer	420	281
27506	BRA	Ford - F-250 Outboard	410,1	287,1
27507	BRA	Ford - F-250 Outboard	597	369
27510	BRA	Fiat - Uno	580	378
27511	BRA	Fiat - Uno	473	328
27512	BRA	Ford - F-1000	385	252
27513	BRA	Ford - F-1000	509	312
27514	BRA	Ford - F250 4 x 4 Cabine Simples / Dupla	580,5	358,2
27515	BRA	Ford - F250 4 x 4 Cabine Simples / Dupla	697,3	420
27518	BRA	Troller - Pantanal	643	394
27519	BRA	Troller - Pantanal	705	429
27520	BRA	Troller - Jeep T4	602	375,5
27523	BRA	Fiat - Doblò Adventure	500	317,5
27525	BRA	Fiat - Doblò Cargo	479	304,5
27527	BRA	Fiat - Doblò	479	304,5
27528	BRA	Iveco - Caminhão Daily	431	282
27529	BRA	Iveco - Caminhão Daily	573	357
27603	BRA	Daewoo - Espero	579	341
27784	BRA	VW - Passat	554	370
27822	BRA	GM - Caravan / Opala	332	216
27826	BRA	VW - Gol / Voyage	650	438
27868	BRA	VW - Passat	456	291
27885	BRA	VW - Gol / Voyage	650	438
27886	BRA	VW - Parati	670	458
27899	BRA	Ford - Escort / Verona	494	343
27901	BRA	Ford - Escort VW - Apollo	494	343
27908	BRA	GM - Monza	499	315
27912	BRA	VW - Saveiro	670	458
27921	BRA	VW - Parati	670	458
27922	BRA	VW - Saveiro	670	452

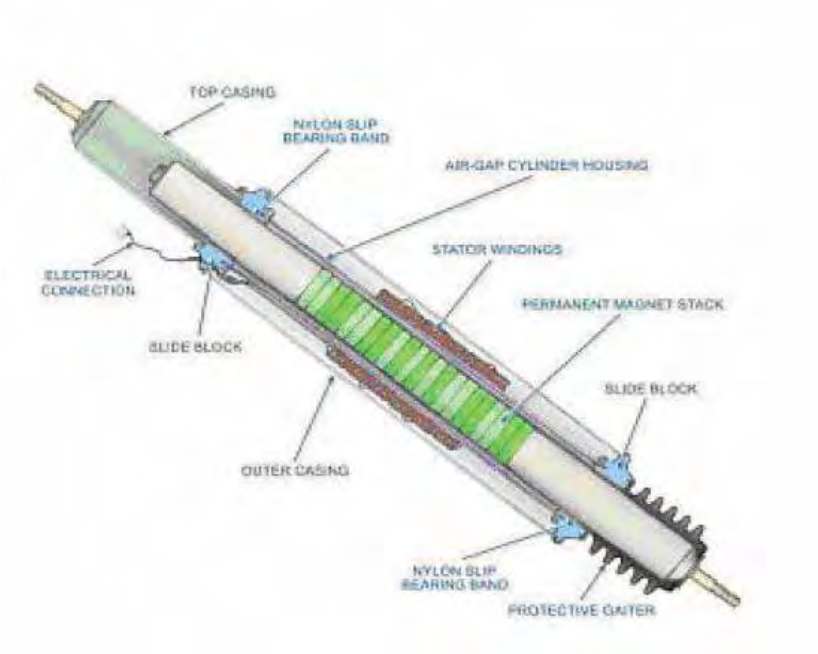
Código	Origem	Marca	Dimensional - mm	
			Aberto	Fechado
27924	BRA	Fiat - Uno	470	333
27925	BRA	Fiat - Uno	519	310
27927	BRA	Fiat - Uno	473	326
27930	BRA	Ford - Escort / Verona VW - Logus / Pointer	688	471
27931	BRA	Ford - Royale VW - Quantum / Santana	682	470
27932	BRA	Ford - Versailles VW - Santana	667	455
27936	BRA	Fiat - Uno	473	326
27937	BRA	Fiat - Uno	475	326
27941	BRA	Fiat - Palio	485	333
27942	BRA	Fiat - Palio / Siena	470	313
27949	BRA	Ford - Escort / Verona VW - Apollo	495	300
27954	BRA	GM - Kadett	579	341
27970	BRA	GM - Caravan / Opala	475	288
37015	EUA	Ford - Explorer	382	248
37027	EUA	Jeep - Cherokee	523	324
37035	EUA	Ford - Explorer	639	381
37081	EUA	Jeep - Cherokee	541	331
37082	EUA	Jeep - Cherokee	559	345
37083	EUA	Jeep - Cherokee	551	337
37729	BRA	VW - Brasília / Fusca / K. Gaia / TC / TL / 1600 / Variant	391	252
37736	BRA	GM - Chevette / Marajó	386	240
37737	BRA	GM - Chevette	605	364
37747	BRA	MB - Cabine	389	240
37754	BRA	MB - Caminhões	558	337
37763	BRA	VW - Kombi / Pick-up	425	285
37771	BRA	MB - Caminhões	625	373
37772	BRA	VW - Fusca / K. Gaia	390	252
37780	BRA	MB - Caminhões	722	429
37784	BRA	VW - Passat	554	370
37791	BRA	Fiat - 147 / 149 / Pick-up / Fiorino / Furgão / Spazio	436	293
37792	BRA	Fiat - 147 / 148	476	285
37799	BRA	VW - Variant	560	370
37822	BRA	GM - Caravan / Opala	332	216
37823	BRA	GM - Opala	475	289
37826	BRA	VW - Gol / Voyage	650	438
37829	BRA	VW - Brasília / Fusca / K. Gaia / TC / TL / 1600 / Variant	424	315
37832	BRA	Fiat - 147 / 148 / Spazio	476	285
37837	BRA	Fiat - Pick-up / Fiorino / Furgão	476	285
37856	BRA	VW - Kombi / Pick-up	390	252
37868	BRA	VW - Passat	456	291
37870	BRA	MB - Cabine	390	250
37880	BRA	VW - Quantum	682	470
37881	BRA	VW - Santana	667	455
37885	BRA	VW - Gol / Voyage	650	438
37886	BRA	VW - Parati	670	458
37899	BRA	Ford - Escort	494	343
37901	BRA	Ford - Escort	494	343
37906	BRA	GM - Caravan	470	374
37908	BRA	GM - Monza	563	332
37909	BRA	Ford - Belina / Escala / Corcel / Del Rey	594	371

ANEXO A - Power-Generating Shock Absorber

Pesquisadores nos Estados Unidos desenvolveram um modelo de amortecimento regenerativo que tem seu funcionamento muito semelhante ao método proposto no presente trabalho.

Corroborando o que aqui foi concluído, segundo reportagem exibida no domínio WebMotors (CALMON, 2009), o modelo apresentado pode gerar cerca de 1 kW em caminhões, que de modo comparativo dispensaria o uso do alternador para grandes viagens. Segundo Robson Iezzo, especialista em inovação de amortecedores da Magneti Marelli-Cofap, de Mauá (SP), é difícil a aplicação de amortecedores regenerativos de forma massificada em veículos leves convencionais. “O custo deve ser alto e os benefícios limitados porque automóveis de passageiros deslocam baixa massa total em comparação a caminhões e ônibus. Deste modo, há um potencial menor de recuperação e acúmulo de energia”.

Contudo, do presente trabalho esta afirmação pode ser discutida, pois apesar das considerações de Iezzo estarem corretas, o uso em conjunto com outros sistemas torna a totalidade da função de regeneração bem mais eficiente, além de que um amortecedor como aqui proposto de modo ideal substituiria um convencional, havendo rebatimento do custo de um relativo ao outro, sendo que os componentes utilizados para produzir energia possuem uma vida útil muito alta, salientando que o método aqui empregado leva em conta os modos de excitação do amortecedor e não deslocamento de massa total.



Power-Generating Shock Absorber (PGSA), desenvolvido pelo MIT. Patente: U.S. 6,952,060; Electromagnetic linear generator and shock absorber; Inventors: Ronald B. Goldner (Lexington, MA), Peter Zerigian (Arlington, MA); Assignee: Trustees of Tufts College (Medford, MA); 4 Out. 2005.