



INSTITUTO FEDERAL
Santa Catarina

Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS LAGES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

José Victor Ortiz

Amortecedor Magnético Regenerativo para Veículos Elétricos

LAGES
2022

José Victor Ortiz

Amortecedor Magnético Regenerativo para Veículos Elétricos

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. MSc Rafael Gustavo Schreiber

Lages

2022

José Victor Ortiz

Amortecedor Magnético Regenerativo para Veículos Elétricos

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica

Lages, 6 de fevereiro de 2022.

Prof. Dr. Matheus Fontanelle Pereira
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. MSc Rafael Gustavo Schreiber
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. MSc Anderson Luis Garcia Correia
Avaliador
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Jeferson Fraytag
Avaliador
Instituto Federal de Santa Catarina

Antes a tristeza da derrota do que a vergonha de
nunca ter tentado.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos começam com meu pai. Meu exemplo, meu herói. Homem que mais admiro e a quem agradeço demais por todo apoio, instrução e exemplo que vem me dando desde que nasci. Muitas lições com o “alicate laranja” me trouxeram até aqui, e devo muito ao senhor. Agradeço também minha mãe, com seu jeito especial de me incentivar e de jamais me deixar desistir. De todo meu coração agradeço aos meus pais e irmãos por todo o apoio e suporte que sempre me deram. São incontáveis os momentos em que me ajudaram e que torceram por mim, espero um dia retribuí-los à altura. Agradeço aos meus professores, por todo empenho e orientação, além de todo o auxílio durante o desenvolvimento desses trabalhos. Mais que professores, vocês foram meus mestres ao longo desses anos. Tenham certeza de que levarei seus ensinamentos e exemplo de profissionalismo para minha vida toda. Gratidão em especial aos professores Matheus Fontanelle Pereira, Rafael Gustavo Schreiber e Anderson Correia pela dedicação e empenho ao longo dos últimos semestres. Também agradeço a Stec Lab que proporcionou a fabricação de meu protótipo, além de todo suporte e instrução prestada ao longo de todos os trabalhos. Por fim, agradeço todo o apoio, compreensão, afeto e amor de minha futura esposa, Caroline. O amor é a única coisa que transcende o tempo e o espaço. Que nosso amor continue sempre a florescer!

RESUMO

A geração de energia em veículos elétricos é muito importante para o aumento de sua autonomia e eficiência. Levando em conta a expansão desse mercado e o aumento da demanda por tecnologia e eficiência nesses produtos, nesse trabalho foi desenvolvido um protótipo de sistema de suspensão capaz de gerar energia a partir do movimento oscilatório da suspensão de veículos elétricos. Para tanto, desenvolveu-se uma bancada de simulação do movimento oscilatório de suspensões, o qual foi equipado com um sistema de geração de energia. O sistema funciona com os conceitos de indução de corrente elétrica através do movimento longitudinal de ímãs de neodímio. Através dos resultados obtidos com a bancada e com as estimativas feitas a partir deles, foi possível concluir que o projeto precisa de melhorias para alcançar resultados relevantes o bastante para justificar sua aplicação em um veículo. O protótipo construído foi capaz de gerar uma tensão de 0,36 V e uma corrente de 0,06 A, sendo esses valores muito insuficientes para uma finalidade comercial. Entretanto, com a utilização de ímãs de 6.400 Gauss e uma bobina de quatro mil espiras, os valores estimados de geração seriam de 4,22 V e 0,78 A, os quais poderiam ser considerados comercialmente relevantes.

Palavras-chave: Suspensão. Geração de energia. Veículos Elétricos. Movimento oscilatório. Amortecedor

ABSTRACT

Energy generation in vehicles is very important to provide autonomy and efficiency. Considering the expansion of this market and the increase of demand for technology and efficiency on these products this undergraduate thesis proposes to develop a prototype capable of generating energy from the oscillatory movement of suspensions on electric vehicles. Therefore, it was developed a test bench to simulate the oscillatory movement made by a suspension system, which was equipped with a system of energy generation. The system works using the current induction concepts through the linear movement of neodymium magnets. Analyzing the obtained results, it was possible to conclude that the project needs some improvements so it can achieve results relevant enough to justify the installation on a vehicle. The prototype developed generated a voltage of 0.36 V and a current of 0.06 A, which are not enough for commercial purposes. However, using magnets of 6400 Gauss and a coil made with four thousand spirals, the estimated values of energy generation would be 4.22 V and 0.78 A, which can be considered commercially advantageous.

Keywords: Suspension. Energy Generation. Electric Vehicles. Oscillatory movement. Damper.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Patente de Selden.....	18
Figura 2 - Ford Modelo T 1924.....	19
Figura 3 - Reboque automotivo com amortecedor pneumático	19
Figura 4 - Sistema de suspensão do Ford Escort Express	20
Figura 5 - Suspensão Duplo A vista frontal	22
Figura 6 - Suspensão Duplo A vista isométrica	23
Figura 7 - Suspensão MacPherson	24
Figura 8 - Suspensão Multilink	25
Figura 9 - Teste de suspensão regenerativa.....	26
Figura 10 - Protótipo de suspensão regenerativa semi-ativa.....	26
Figura 11 - A6 Avant, 2001.....	27
Figura 12 - Suspensão MAGNERIDE	28
Figura 13 - Amortecedor Bitubo	30
Figura 14 - Amortecedor Monotubo	32
Figura 15 - Amortecedor Monotubo com câmara externa	32
Figura 16 - Gerador Oscilo-Dinâmico.....	39
Figura 17 - Exemplo de indução de corrente	42
Figura 18 - Simulador de oscilação para indução de energia.....	43
Figura 19 - Projeto da bancada em vista isométrica.....	50
Figura 20 - Projeto da bancada em vista posterior	50
Figura 21 - Vista explodida da bancada	51
Figura 22 - Banca de testes pronta vista isométrica	53
Figura 23 - Bancada de testes pronta vista posterior.....	53
Figura 24 - Gráfico tensão x rotação no tempo.	54
Figura 25 - Gráfico corrente x rotação no tempo.	55
Figura 26 - Gráfico de tensão x corrente x rotação no tempo.	56
Figura 27 - Bancada de testes de Goldner.....	59
Figura 28 - Bancada de testes com amplificação de movimento.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações dos imãs.....	49
Tabela 2 - Propriedades fio de cobre.....	49
Tabela 3 - Tabela para cálculo de geração de energia.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

$A =$	Área da circunferência da bobina ou anel (m^2);
$A_m =$	Magnitude (m);
$B =$	Campo Magnético (Tesla);
$B_r =$	Densidade do Fluxo Magnético (Tesla);
$C =$	Constante de amortecimento ($N*s/m$);
$C =$	Constante de amortecimento viscoso ($N*s/m$);
$d =$	Diâmetro do pistão (m);
$D =$	Diâmetro do tubo do amortecedor (m);
$d(vol\ bobina) =$	Diferencial do Volume da Bobina;
$E_\phi =$	Campo Elétrico (V/m);
$F_{Ac} =$	Força de amortecimento devido ao campo (N);
$F_{Am} =$	Força de Amortecimento (N);
$F_D =$	Força exercida sobre o amortecedor (N);
$F_m =$	Força exercida sobre a mola (N);
$g =$	Gravidade (m/s^2);
$I =$	Corrente (A);
$J_\phi =$	Densidade da Corrente Parasita (A/m^2);
$K_e =$	Constante de amortecimento equivalente ($N*s/m$);
$l =$	Comprimento da haste (m);
$N =$	Número de espiras da bobina ou número de anéis;
$R =$	Resistência (Ohm);
$t =$	Tempo (s);
$V =$	Tensão (V);
$V =$	Volume da Bobina (m^3);
$x =$	Posição (m).

Símbolos gregos:

$\varepsilon =$	Força Eletromagnética (V ou $Tesla/s$);
-----------------	---

$\theta =$ Ângulo entre a normal da superfície e o campo magnético (graus);

$\mu =$ Viscosidade do fluido (cP);

$\dot{u} =$ Velocidade (m/s);

$\sigma_{Cu} =$ Condutividade Elétrica do Cobre (m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$));

$v_z =$ Velocidade da bobina relativa ao campo magnético (m/s);

$\varphi_m =$ Fluxo Magnético (Wb);

$\omega =$ Velocidade angular (rad/s).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	SISTEMA DE SUSPENSÃO	17
2.1.1	SUSPENSÕES INDEPENDENTES.....	20
2.1.2	SUSPENSÃO DUPLO A.....	21
2.1.3	SUSPENSÃO MC PHERSON.....	23
2.1.4	SUSPENSÃO MULTILINK.....	24
2.1.5	SUSPENSÕES ATIVAS.....	25
2.1.6	SUSPENSÕES REGENERATIVAS.....	25
2.1.7	OUTROS MODELOS DE SUSPENSÃO.....	27
2.2	AMORTECEDORES	28
2.2.1	AMORTECEDOR BITUBO NÃO PRESSURIZADO.....	29
2.2.2	AMORTECEDOR BITUBO PRESSURIZADO.....	31
2.2.3	AMORTECEDOR MONOTUBO PRESSURIZADO	31
2.2.4	AMORTECEDOR MONOTUBO NÃO PRESSURIZADO	33
2.3	MODELOS DE AMORTECIMENTO	33
2.3.1	MODELO DE AMORTECIMENTO MATEMÁTICO	33
2.4	GERAÇÃO DE ENERGIA	39
2.4.1	INDUÇÃO DE CORRENTE.....	40
2.4.2	CÁLCULOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	GERAÇÃO DE ENERGIA	48
3.2	O PROTÓTIPO	48

3.2.1	FUNCIONAMENTO.....	51
3.3	TESTES	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
5	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	ANEXO A – Código de programação da bancada	65

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, vários foram os motivos que fizeram a locomoção tornar-se uma necessidade do ser humano. Há milhares de anos foi a necessidade de abrigo, alimento e busca por melhores condições climáticas (PINSKY, 2011). Depois, já foi por conta da busca incessante por novos horizontes, por conta de guerras e também por causa do comércio (SANZ, [s. d.]). Portanto, a necessidade de locomoção sempre esteve junto ao ser humano, e com o passar do tempo, a forma como esse deslocamento ocorre vem evoluindo cada vez mais. Evoluindo em conforto, velocidade, segurança, e também eficiência e autonomia.

No ano de 1886, Karl Benz fez o registro da patente de seu *Motorwagen* (BRITANNICA, T. EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA, 2020), o precursor do que hoje conhecemos como o automóvel. Partindo dessa primeira máquina, aprimoramentos foram feitos até que finalmente o automóvel se tornou popular e difundiu-se pelo mundo todo através das mãos de Henry Ford, que em 1908 fez o lançamento do *Ford T* (ALIZON; SHOOTER; SIMPSON, 2009).

Com o passar do tempo, o modelo de Henry ficou para trás, enquanto novos modelos continuavam a surgir para suprir as necessidades e desejos dos consumidores, que como mostra (DAMATTA, 2012 apud DA CUNHA SOARES JUNIOR; ALVES LIMA; FREIRE, 2016) nem sempre foram meramente a necessidade de ir de um lugar à outro. Com o tempo, a necessidade se tornou desejo. Desejo de carros mais velozes e potentes. Também de carros maiores e mais confortáveis. Houve também a necessidade de carros mais seguros e mais fáceis de dirigir. Nos dias de hoje o que tende a prevalecer é a necessidade de carros mais econômicos e tecnológicos, que causem o menor impacto possível ao meio ambiente, e que ainda assim possam se adaptar ao mundo em que vivemos.

Tendo em vista essa evolução e as perspectivas de mercados, grandes montadoras preveem investimentos de US\$ 300 bilhões em tecnologias para carros elétricos nos próximos cinco a dez anos (TAYLOR, 2019). A frente disso, responsável pela maior parcela dos investimentos, a grande fabricante alemã Volkswagen pretende com os investimentos reduzir o custo das baterias, desenvolver softwares, aumentar a eficiência e a autonomia de seus veículos.

Com tamanho investimento, o desenvolvimento de novas tecnologias irá visar a redução de desperdícios no sistema, e com a redução dessas irreversibilidades, atingir níveis cada vez mais altos de eficiência.

Um dos sistemas automotivos que já sofreu melhorias foi o sistema de freios. Para esse conjunto do carro já foram desenvolvidas algumas tecnologias de freios regenerativos, como por exemplo o KERS (Kinetic Energy Recovery System), que teve seu desenvolvimento iniciado em 2006 e começou a ser utilizado na Fórmula 1 no ano de 2019 (SCHOEGGL; HAIMANN; RESS, 2012).

Assim como os freios, outros sistemas serão aprimorados com o intuito de desperdiçar o mínimo de energia possível. Nesse contexto, com o avanço da tecnologia e a necessidade de carros cada vez mais eficientes, os sistemas de suspensão dos automóveis são outro ponto a ser aprimorado.

Almejando desenvolver um estudo capaz de auxiliar no progresso de automóveis elétricos, nesse trabalho será exposto o estudo de desenvolvimento de um tipo de suspensão regenerativa capaz de auxiliar a aumentar a eficiência e autonomia de veículos elétricos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um estudo sobre a viabilidade e a eficiência de um sistema de suspensão regenerativa para carros elétricos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os tipos de suspensão e amortecedores regenerativos existentes;
- Definir o modelo de amortecedor para estudo e propor melhorias no sistema;
- Fabricar um protótipo para validação do projeto;
- Determinar a eficiência do sistema proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visando compreender o contexto tecnológico do desenvolvimento de sistemas de suspensão e amortecedores, nesse capítulo serão apresentadas tecnologias existentes nesses segmentos que são aplicadas em carros elétricos. Desse modo será possível determinar qual sistema é o mais adequado para realização de estudos de melhoramento.

2.1 SISTEMA DE SUSPENSÃO

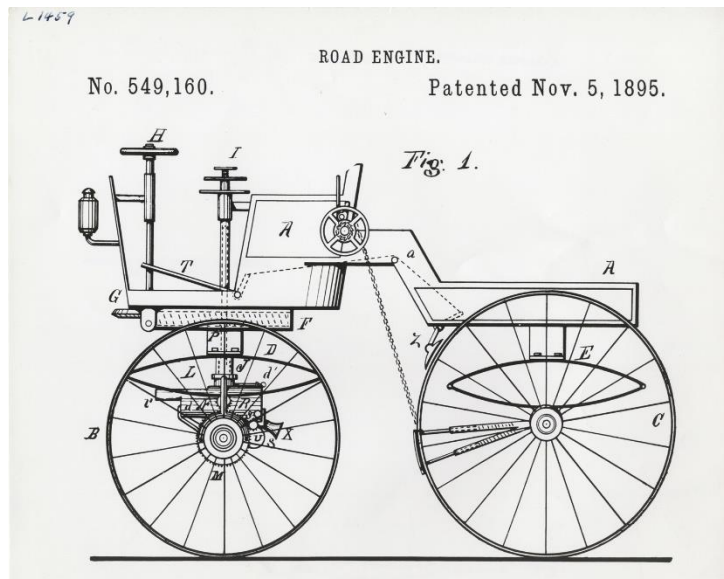
Em automóveis, suspensão é um sistema responsável por suspender a carroceria do veículo e também por amortecer a oscilação proveniente do movimento relativo entre carroceria e as rodas. Além disso, esse sistema também possui um papel fundamental no comportamento dinâmico do carro e por conta disso determina não apenas o grau de oscilação ao qual o veículo idealmente pode ser submetido, como também seu desempenho nos mais variados tipos de pista e em diferentes velocidades.

Um exemplo disso é a síntese das funções primárias de um sistema de suspensão, feita por Gillespie. Segundo o autor, o sistema de suspensão automotivo proporciona um isolamento dos chassis em relação às irregularidades da pista. O conjunto também é responsável por manter as rodas com o esterçamento correto ao passo que mantem a variação do ângulo de camber condizente com o esterçamento. Outro ponto importante é a reação às forças geradas pelo contato entre pneus com a pista e o papel de absorver as oscilações causadas por frenagem e aceleração, mantendo dessa forma o contato dos pneus com o solo com a mínima variação de cargas possível (GILLESPIE, 1996).

Apesar disso, os sistemas de suspensão surgiram visando o desempenho dos veículos no que tange o conforto de passageiros e só mais tarde fatores de dirigibilidade e desempenho em pistas de competição foram levados em consideração. Um bom exemplo é citado por (DIXON, 2009), quando refere-se à patente de Benz e de Selden que visavam o conforto e dirigibilidade do veículo. Naquele período, as suspensões eram fabricadas com feixes de mola de maneira estimada, com a intenção de garantir conforto aos ocupantes e preservar a estrutura do automóvel.

Abaixo uma imagem da patente de Selden onde pode-se visualizar o modelo de suspensão nas letras “D” e “E”.

Figura 1 - Patente de Selden



Fonte: Detroit Public Library (1895)

Mesmo com sistemas mais simples, os feixes de mola cumpriam sua função de maneira satisfatória para época. Entretanto, o sistema de suspensão foi mais desenvolvido e passou a ter funções mais complexas nos automóveis, principalmente por conta das dificuldades percebidas na condução durante a locomoção em velocidades mais elevadas (grandes oscilações e instabilidades).

Um exemplo da evolução desse sistema é o Ford Modelo T. Nesse modelo o sistema de suspensão deixa de ter uma função mais voltada ao conforto e a conservação do mecanismo, e passa a ter aspectos que também proporcionam características mais adequadas para o sistema, tendo em vista as condições de pista e desenvolvimento tecnológico da época.

Entretanto, o sistema utilizado nesse modelo era o de eixo rígido, sistema que tem como principal característica a transmissão das oscilações absorvidas por uma roda serem em parte transferidas para a roda do lado oposto. Isso fez com que a mudança no sistema de amortecimento do veículo em questão não fosse capaz de permitir uma condução segura em velocidades mais elevadas por exemplo.

Figura 2 - Ford Modelo T 1924



Fonte: Car & Classic (2020)

Vale ressaltar que, por conta da diferença de desenvolvimento entre os sistemas que compõem o veículo, alguns problemas começaram a surgir. Um deles foi causado pelo aumento da potência oferecida pelos novos motores e conseqüentemente a velocidade que esses veículos poderiam alcançar. Nessas novas condições, os esforços eram muito maiores e o comportamento dinâmico do carro foi bastante alterado, de tal modo que as suspensões da época não eram mais capazes de proporcionar estabilidade, nem tão pouco dirigibilidade adequada com o porte dos demais sistemas do veículo.

Cabe destacar que muito embora o modelo de suspensão de eixo rígido seja um modelo mais simples, o mesmo é amplamente utilizado em veículos de carga, tanto leves, quanto pesados atualmente. Tem-se como exemplo o eixo traseiro de pick-ups, reboques automotivos e carretas de caminhões. Na imagem abaixo é possível observar o sistema de suspensão de um modelo comum de reboque automotivo.

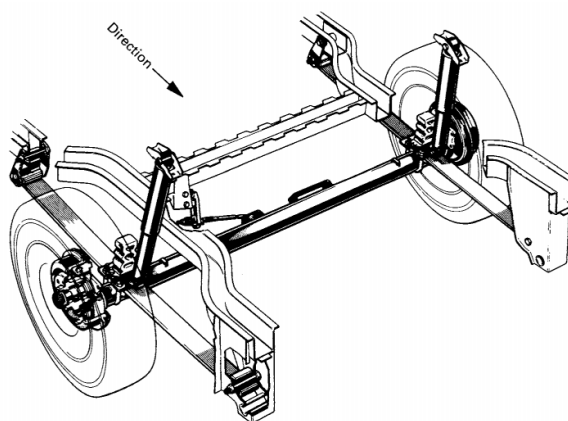
Figura 3 - Reboque automotivo com amortecedor pneumático



Fonte: AJ Reboques Automotivos

Também é importante ressaltar que há variações de posicionamento dos amortecedores de acordo com cada modelo. No modelo abaixo por exemplo é possível visualizar uma configuração de suspensão de eixo rígido que também faz uso de feixes de mola. Entretanto, nesse caso os amortecedores estão na posição vertical com relação ao solo.

Figura 4 - Sistema de suspensão do Ford Escort Express



Fonte: REIMPELL; STOLL; BETZLER, 2002

2.1.1 Suspensões independentes

Por conta disso, surgiu a necessidade de desenvolver um modelo de suspensão diferente do até então utilizado eixo rígido como visto anteriormente. Esse novo sistema deveria proporcionar melhores condições de dirigibilidade e também um melhor comportamento em velocidades mais elevadas.

O início do desenvolvimento dessa nova tecnologia deu-se na França nos anos 20, quando o engenheiro André Dubonnet patenteou o primeiro sistema de suspensão independente. Já em 1932, o mesmo conceito foi utilizado pela Rolls-Royce que na época exportava modelos equipados com esse tipo de sistema para os Estados Unidos. Identificando como um dos problemas mais difíceis a serem solucionados naquela época, o então presidente da General Motors (GM), Alfred P. Sloan, decidiu tomar uma atitude para melhorar esse aspecto nos veículos fabricados pela companhia.

Para tanto, Sloan contou com a ajuda de André, que veio para a América a seu convite e também de Maurice Olley, um engenheiro que havia trabalhado na concorrente Rolls-Royce

e que naquele momento trabalhava para a GM. Com isso, dois modelos de suspensão foram desenvolvidos e testados. O modelo de Dubonnet e também o modelo duplo A. Em 1934 esses modelos foram introduzidos no mercado sendo que o modelo duplo A continua sendo utilizado até hoje, principalmente em carros esportivos.

Além desse modelo, outros como o modelo Mc Pherson (amplamente utilizado nos dias de hoje), Multilink (que será abordado em mais detalhes a seguir) e eixo rígido ou barra de torção (utilizados na Kombi e Fusca) foram desenvolvidos.

Nesse sentido, vale ressaltar que publicações mais recentes indicam a possibilidade desse sistema agregar ainda mais funções. Uma das possíveis novas funções, vêm ao encontro de uma demanda global e que já é notada pelas grandes fabricantes de automóveis, as quais já investem bilhões nesse novo mercado, como citado anteriormente. Ao que tudo indica, uma das próximas novidades dos sistemas de suspensão é a captação de energia, que como visto, era dissipada pelo sistema até então.

Nota-se, portanto, que os sistemas de suspensão vêm se adequando a novas realidades com o passar do tempo. Saindo de um sistema mais simples e com poucas funções para tornar-se um sistema robusto e cada vez mais tecnológico.

2.1.2 Suspensão duplo A

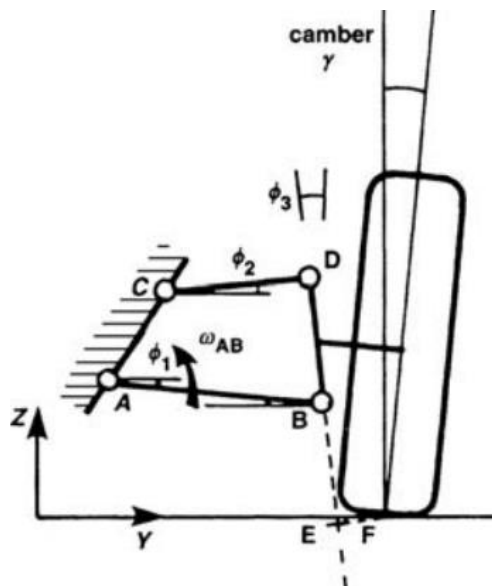
A suspensão modelo duplo A ou Double Wishbone é composta por dois braços de suspensão que ligam os chassis à manga de eixo. Esse design de suspensão tornou-se muito comum após a segunda guerra mundial e é muito vantajoso por conta do espaço compacto que ocupa dentro dos veículos e também por proporcionar ângulos de cambagem mais favoráveis, trazendo um desempenho melhor para os veículos se comparado com os sistemas de eixo rígido anteriormente apresentados. Além disso, os braços que compõe esse sistema podem possuir tamanhos similares (menos usual) ou tamanhos diferentes.

No caso de braços de suspensão de tamanhos diferentes, o braço superior é menor em relação ao braço inferior. Essa diferença de tamanho proporciona um design com uma geometria que favorece a cambagem da roda exterior a curva, que nesse instante é responsável por suportar uma carga superior à suspensão interna à curva. Isso se deve à rolagem e também à inércia do veículo.

Em contrapartida, a cambagem da roda interior a curva é desfavorecida, o que torna a superfície do pneu apoiada no solo menor. Levando em conta que o maior esforço estará no lado oposto do carro, a variação de camber entre as rodas beneficiando a parte que tem mais esforços se torna algo aceitável.

Abaixo um exemplo do mecanismo do modelo de suspensão duplo A. Nele é possível notar o camber positivo em condição estática. Também pode-se verificar a diferença entre o comprimento dos braços, o que caracteriza o sistema como um SLA (Short-long Arm).

Figura 5 - Suspensão Duplo A vista frontal

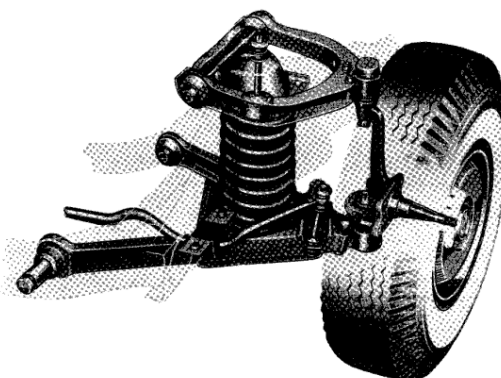


Fonte: DIXON, 2009

O posicionamento do sistema de amortecimento nos modelos de suspensão double wishbone varia de acordo com o projeto, bem como as especificações de cada componente. Dessa forma, o mesmo modelo pode ter diferentes características de acordo com o modelo do conjunto mola, amortecedor, muito embora essa variação não altere o funcionamento geométrico do sistema, mas sim, o limite.

Na imagem abaixo nota-se a diferença entre os tamanhos do braço superior e inferior, bem como um exemplo de posicionamento do sistema de amortecimento do veículo.

Figura 6 - Suspensão Duplo A vista isométrica



Fonte: GILLESPIE, 1996

2.1.3 Suspensão Mc Pherson

Patenteado em 1953 por Earle S. MacPherson e cedido pela General Motors Corporation (MACPHERSON, 1953), esse modelo popularizou-se nas décadas de 50 e 60 ao serem amplamente escolhidos como modelo de suspensão dianteiro em veículos de passeio (DIXON, 2009).

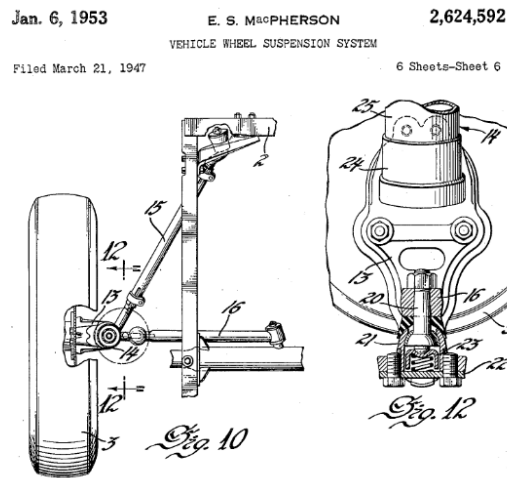
Parecido com o modelo Duplo A, esse tipo de suspensão é composto por um braço inferior que faz a conexão entre os chassis e a manga de eixo, enquanto que a parte superior não possui um braço de suspensão. Nesse modelo a fixação é feita através do próprio sistema de amortecimento, dispensando nesse caso o braço superior presente no modelo Duplo A.

Esse tipo de suspensão é mais leve e mais compacto em relação aos modelos anteriormente apresentados. Outro ponto positivo é um curso maior nesse tipo de suspensão. Em contrapartida, não tem um bom comportamento com cargas elevadas. Por essa razão é mais comumente encontrada em veículos de pequeno e médio porte.

Além disso, o fato de a conexão superior desse modelo de suspensão ser feita através do sistema de amortecimento, esse tipo de suspensão exige um espaço vertical maior, o que dificulta a redução da altura do capô dos veículos que utilizam esse modelo em específico (GILLESPIE, 1996).

Abaixo uma das imagens que estão contidas na primeira patente registrada para esse modelo de suspensão.

Figura 7 - Suspensão MacPherson



Fonte: MACPHERSON, 1953

2.1.4 Suspensão multilink

Nesse modelo há geralmente quatro ou cinco pontos de fixação entre a manga de eixo e a carroceria do veículo. A suspensão Multilink permite um design mais direcionado para a necessidade de cada projeto por conta da variação possível entre a posição dos pontos de fixação. A quantidade desses pontos confere a esse modelo um maior controle e estabilidade.

Por conta de seu número maior de componentes e também maior complexidade de construção, esse tipo de suspensão é mais caro e geralmente mais pesado. Além disso, a manutenção desse modelo exige mais conhecimento e em alguns casos ferramentas dedicadas. São essas características que tornam a Multilink a principal escolha para equipar carros de luxo e de alto desempenho. Na Figura 6 é apresentado o modelo de suspensão Multilink.

Figura 8 - Suspensão Multilink



Fonte: REVISTA QUATRO RODAS, 2020

2.1.5 Suspensões ativas

Esse tipo de suspensão é na verdade uma melhoria dos sistemas apresentados, os quais eram todos passivos. Ou seja, recebiam a energia e então a dissipavam. Nesse modelo de suspensão, o impacto é previsto e a suspensão muda seu posicionamento para absorver da melhor forma possível o impacto que será recebido, essa é a característica principal desse tipo de suspensão. É importante ressaltar que as suspensões ativas são divididas em quatro categorias principais, sendo elas: adaptativa, totalmente ativas, ativas lentas e semi-ativas. (CÔRTE-REAL, 2002).

Um dos modelos mais famosos desse tipo de suspensão foi o modelo desenvolvido pela fabricante Bose, que no ano de 2008 patenteou um modelo que usava tecnologias baseadas em outros produtos da empresa (BOSE, 2008).

2.1.6 Suspensões regenerativas

As suspensões regenerativas tem como objetivo absorver a energia que os sistemas anteriormente citados dissipam. Além disso, o sistema proposto não pode comprometer o comportamento dinâmico e as características de dirigibilidade do veículo. Por ser uma inovação nesse cenário, os métodos de fabricação ainda não foram desenvolvidos em escala industrial.

Além disso, em modelos de veículos que usam motores a combustão, a utilização de um sistema como esse não é interessante e por consequência o modelo ainda não foi difundido.

Entretanto, há avanços nesse cenário e um dos registros existentes nesse campo chama a atenção. Abaixo, imagens de um protótipo construído e testado na China em 2014.

Figura 9 - Teste de suspensão regenerativa



Fonte: SHI *et al.*, 2014

Figura 10 - Protótipo de suspensão regenerativa semi-ativa



Fonte: SHI *et al.*, 2014

As imagens acima pertencem ao artigo publicado em 2014 por Dehua Shi, Long Chen, Ruochen Wang, Haobin Jiang e Yujie Shen. No artigo é exposto o conceito desenvolvido para um sistema que, não apenas é capaz de absorver energia proveniente das oscilações da suspensão do veículo, como também é capaz de alterar seu comportamento antes de receber qualquer impacto. Ou seja, esse modelo é capaz de se adaptar aos diferentes tipos de pista que

o automóvel frequente (uma suspensão ativa). Nesse caso em específico, em três diferentes regulagens que varia a vazão de óleo de uma câmara para outra de acordo com a configuração desejada. Essa alteração por sua vez, determina a característica de amortecimento do modelo naquele instante.

De acordo com o estudo há um incremento significativo no conforto (15 %) em detrimento da estabilidade do veículo que é ligeiramente reduzida, o que de acordo com os autores não tira o veículo de uma zona aceitável nesse aspecto. Além disso, o estudo também aponta uma eficiência de regeneração de energia de 21,86 % o que segundo os autores reforça ainda mais a viabilidade desse tipo de sistema.

2.1.7 Outros modelos de suspensão

É importante ressaltar que o aprimoramento dos modelos existentes não cessou com o desenvolvimento do sistema independente e dos modelos supra citados. Também houve a criação de modelos com outros princípios de funcionamento, como por exemplo a suspensão a ar. O modelo em questão permite a regulagem da distância do solo para o veículo, tornando assim o automóvel adaptável para cada tipo de terreno ou situação. Um exemplo de aplicação desse modelo é versão fora-de-estrada da A6 Avant, lançada em 2001 (BARBOSA, 2019).

Figura 11 - A6 Avant, 2001



Fonte: BARBOSA, 2019

Há também o modelo de suspensão eletromagnética que é usado no Ford Mustang: Suspensão Adaptativa MAGNERIDE. O modelo em questão é capaz de modificar seu comportamento dinâmico de acordo com a pista na qual o veículo se desloca. Esse sistema

funciona com eletroímãs que, quando acionados, são capazes de alterar a viscosidade do óleo que está dentro do amortecedor. Esse fato se deve ao óleo em questão possuir partículas ferromagnéticas em sua composição. Dessa forma, ao entrarem em contato com o campo gerado pelos eletroímãs o óleo tem mais dificuldade em passar de uma câmara para outra e assim o comportamento da suspensão é modificado com o carro em movimento (FORD MOTOR CREDIT COMPANY, 2018). Abaixo uma imagem do sistema supracitado.

Figura 12 - Suspensão MAGNERIDE



Fonte: FORD MOTOR CREDIT COMPANY, 2018

2.2 AMORTECEDORES

Os amortecedores são responsáveis por manter os pneus em contato com o solo através da dissipação da energia proveniente da oscilação das rodas do veículo em relação à carroceria. Esse componente dissipa a energia recebida no sistema de maneira controlada, evitando que a mola e o chassi oscilem de forma indefinida. Ou seja, a energia recebida pelo sistema de suspensão através das rodas é em parte absorvida pela oscilação das molas e em parte dissipada pelo amortecedor através de atrito e calor. Dessa forma a energia recebida pelo sistema é dissipada de maneira controlada e as oscilações do sistema são mantidas dentro de um padrão, proporcionando o contato adequado entre pneu e pista e reduzindo a transferência dos impactos para a carroceria (SOARES, 2007).

Muito embora tenham a mesma função, os modelos de amortecedores variam de acordo com cada veículo. Isso se dá por conta das diferentes características tanto de uso, quanto construtivas do automóvel. Apesar das variações de cada modelo, é possível caracterizá-los em quatro modelos principais: amortecedores monotubo ou bitubo, pressurizados e não pressurizados respectivamente.

É interessante mencionar que os amortecedores hidráulicos são divididos em duas categorias: os que possuem orifício constante e orifício variável. Enquanto os sistemas nos quais são utilizados orifícios constantes oferecem uma pressão variável e um desempenho aceitável, os modelos com orifícios de diâmetro variável oferecem pressão constante na câmara do amortecedor. Essa pequena diferença construtiva proporciona aos dois modelos características bastante distintas (PRETI, 2007).

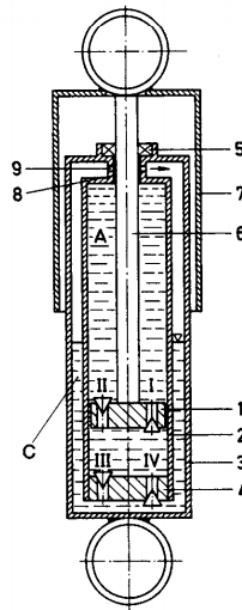
Dessa forma, a energia cinética aplicada em forma de força sobre o amortecedor é dissipada uniformemente em modelos que utilizam orifícios de diâmetro variável, ao passo que nos sistemas com orifícios de diâmetro constante a maior parte da energia é absorvida no início do deslocamento.

2.2.1 Amortecedor bitubo não pressurizado

Esse modelo de amortecedor tem seu funcionamento baseado na transferência de óleo de uma câmara para outra do amortecedor através de orifícios de diâmetro reduzido. Dessa forma, o fluxo do óleo é restringido e a energia do movimento é dissipada em atrito e calor.

Na imagem abaixo é apresentado um modelo de amortecedor convencional. Cabe notar que nele há duas câmaras separadas pelas válvulas de passagem ou orifícios. A câmara *A* com o óleo e a câmara *C* com óleo e ar atmosférico na parte superior.

Figura 13 - Amortecedor Bitubo



Fonte: REIMPELL; STOLL; BETZLER, 2002 ¹

No modelo convencional o óleo presente na câmara C do amortecedor está diretamente em contato com o ar. Por conta do movimento oscilatório do amortecedor o óleo presente no componente (que é especialmente desenvolvido para essa utilização) acaba por incorporar oxigênio e outros gases em sua mistura em casos de oscilações muito intensas. Uma vez que o óleo aquecido por conta de seu funcionamento incorpora esses gases o processo de cavitação acontece.

O processo de cavitação se dá por conta da baixa pressão que é imposta ao fluido de trabalho em uma das câmaras do amortecedor. Com a pressão interna na câmara reduzida, a pressão de vapor do fluido e dos gases ali presentes cai, o que associado a alta temperatura atingida pelo fluido proporciona o acontecimento da cavitação. Nessas condições surgem bolhas de gás dentro do fluido e uma vez que essas bolhas tenham se formado no fluido, no momento em que uma alta pressão seja exercida sobre elas ocorrem “explosões” que enviam o

¹ 1 – Pistão; 2 – Tubo cilíndrico; 3 – Cilindro externo; 4 – Válvula inferior; 5 – Selo da haste do pistão; 6 – Haste do pistão; 7 – Manga de proteção; 8 – Guia da haste do pistão; 9 – Orifícios de retorno; A – Câmara de compressão; C – Câmara de equalização;

líquido a uma alta velocidade para as paredes do amortecedor. Ao longo do tempo esse processo se repete e vai danificando o componente (D'OLIVEIRA, 2014).

Vale ressaltar que a incorporação de gases ao fluido de trabalho do amortecedor altera suas propriedades, comprometem o funcionamento do sistema e o comportamento dinâmico do veículo. Além disso o contato dos pneus com o solo é reduzido, bem como a vida útil dos componentes.

2.2.2 Amortecedor bitubo pressurizado

Os amortecedores bitubo pressurizados têm sua estrutura construtiva semelhante ao modelo não pressurizado. A diferença dos modelos se encontra no gás que está no componente e a pressão em que se encontra.

Geralmente nitrogênio pressurizado entre 6 e 8 bar é utilizado para garantir que esse modelo tenha uma resposta mais rápida em amplitudes menores, melhor comportamento quando submetido a frequências mais altas e também para garantir o funcionamento do sistema mesmo em casos de vazamento do gás (REIMPELL; STOLL; BETZLER, 2002).

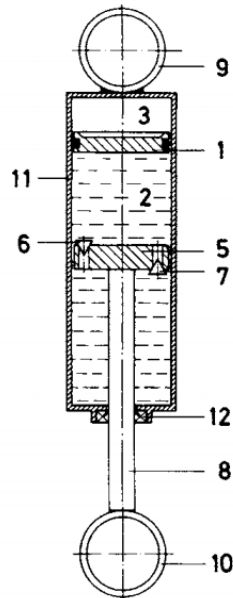
2.2.3 Amortecedor monotubo pressurizado

Para atender veículos que precisem de um sistema mais robusto de amortecimento, foram desenvolvidos amortecedores pressurizados. O modelo em questão utiliza um gás inerte pressurizado ao invés de ar atmosférico. Esse gás, geralmente nitrogênio, tem o papel de reduzir gradualmente o movimento do pistão do amortecedor, uma vez que quanto mais pressionado o gás for, mais difícil se torna pressurizá-lo ainda mais. Além disso, assim que a força de compressão exercida sobre o conjunto reduza, a expansão do gás dentro da câmara 3 (

Figura 14) auxilia no retorno do amortecedor a sua posição inicial (REIMPELL; STOLL; BETZLER, 2002).

Esse sistema é composto por um tubo único de trabalho e um reservatório onde o gás pressurizado fica armazenado. Nesse caso, o reservatório de gás encontra-se no mesmo cilindro do pistão e é separado por um selo (pistão flutuante). No conjunto abaixo o nitrogênio a alta pressão fica na câmara superior 3 e o pistão flutuante 1 faz a separação entre a câmara 3 e 2.

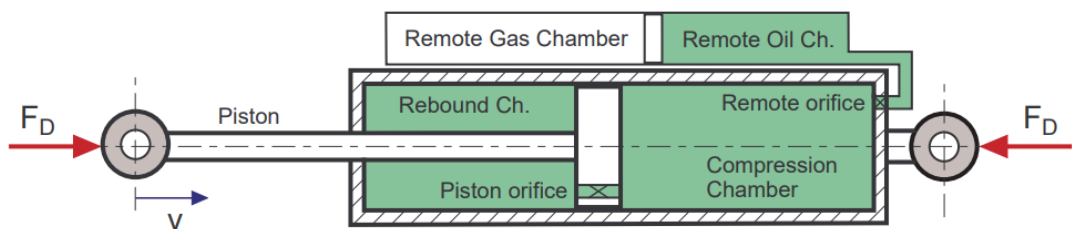
Figura 14 - Amortecedor Monotubo



Fonte: REIMPELL; STOLL; BETZLER, 2002

Vale ressaltar que existem variações construtivas desse modelo de amortecedor. Um exemplo pode ser observado na imagem abaixo. Muito embora haja uma segunda câmara externa ao corpo do amortecedor, essa é conectada ao cilindro principal. Outra diferença é a presença de dois orifícios no sistema. Um no pistão e outro na saída do óleo para a câmara externa.

Figura 15 - Amortecedor Monotubo com câmara externa



Fonte: RILL, 2005

2.2.4 Amortecedor monotubo não pressurizado

Os amortecedores monotubo não pressurizados são constituídos por um tubo único no qual há apenas óleo como fluido de trabalho. Esse modelo de amortecedor é utilizado em aplicações nas quais o retorno do amortecedor a sua posição inicial não é necessário. Isso se deve ao fato de que não há um gás pressurizado em uma câmara no seu interior. Desse modo, não há nenhuma força interna que faça o amortecedor mudar sua extensão. Por conta disso são utilizados em bancos de carros e estabilizadores de direção por exemplo (REIMPELL; STOLL; BETZLER, 2002).

2.3 MODELOS DE AMORTECIMENTO

O estudo da mecânica vibratória e o entendimento dos modelos de amortecimento são imprescindíveis para estimar o comportamento dos amortecedores durante sua utilização. Uma vez determinadas as características do amortecimento (sub crítico, crítico ou super crítico), é possível determinar qual será o comportamento do sistema e também estimar a quantidade de energia que será gerada durante seu funcionamento. Nesse capítulo será abordado o modelo de amortecimento matemático, sendo que o modelo físico será discutido no capítulo 2.

2.3.1 Modelo de amortecimento matemático

Esse tipo de modelamento é feito através de equações matemáticas que descrevem a física e tem como objetivo determinar com a maior exatidão possível qual será o comportamento do protótipo. A partir do modelo será possível estimar a quantidade de energia que será gerada para uma dada oscilação.

Para modelamento desse sistema, será utilizada a segunda lei de Newton, a qual determina que a força é a resultante da multiplicação da massa pela aceleração do corpo. Essa é a premissa inicial para a modelagem do sistema, tendo em vista que o objetivo é reduzir a velocidade de um corpo (carroceria) em um intervalo de tempo.

A segunda lei de Newton é expressa por:

$$F_d = m * a \quad (1)$$

Onde:

$F_d =$ Força exercida sobre o amortecedor (N);

$m =$ Massa do corpo (kg);

$a =$ Aceleração (m/s^2).

No caso de um sistema de suspensão, esse é o equacionamento que determina a força que será aplicada sobre o sistema. Logo, o sistema de suspensão deve receber e amortecer essa força da maneira mais eficiente possível, no caso desse estudo, utilizando um conjunto de mola e amortecedor.

Vale ressaltar que no caso específico desse projeto, o sistema responsável pela geração de energia atua como um segundo amortecedor no sistema. Levando em consideração que o amortecedor e o sistema de geração têm obrigatoriamente a mesma amplitude de movimento, o sistema de geração será somado em paralelo ao amortecedor já presente no conjunto.

Nesse caso, a força de amortecimento deve ser dividida em dois. Força de amortecimento da mola e do amortecedor, sendo que o amortecedor por sua vez é subdividido em um cálculo de soma de amortecedores paralelos pelos motivos anteriormente citados.

De acordo com Lei de Hooke, a força exercida pela mola é função de sua constante e da amplitude da compressão ou distensão que a mesma sofre. A constante elástica da mola denomina-se K e pode ser determinada experimentalmente através de testes de compressão e distensão (TIPLER; MOSCA, [s. d.]).

Logo, a força que a mola fará no sentido oposto ao movimento pode ser equacionada da seguinte forma:

$$F_m = K * x \quad (2)$$

Onde:

$F_m =$ Força exercida sobre a mola (N);

$K =$ Constante elástica da mola (N/m);

$x =$ Amplitude da compressão ou distensão (m).

Entretanto, a força aplicada sobre o sistema será dissipada também por um amortecedor. O amortecimento em um modelo idealizado, no qual o amortecimento se deve exclusivamente a dissipação de calor e restrição de fluxo do óleo pelos orifícios, é função apenas da velocidade, uma vez que a constante de amortecimento viscoso é matematicamente definida. Ou seja, quanto maior a velocidade, maior a força de amortecimento (PRETI, 2007).

$$F_D = C * \dot{u} \quad (3)$$

Onde:

- F_D = Força exercida sobre o amortecedor (N);
 C = Constante de amortecimento (N*s/m);
 \dot{u} = Velocidade (m/s).

A constante de um amortecimento viscoso é função da área que o fluido tem para escoar, de sua viscosidade e do comprimento da haste do pistão (RAO, 2009). Desse modo, é possível determinar o coeficiente C de um amortecedor viscoso através da equação abaixo:

$$C = \mu * \left[\frac{3\pi D^3 l}{4d^3} * \left(1 + \frac{2d}{D} \right) \right] \quad (4)$$

Onde:

- C = Constante de amortecimento viscoso (N*s/m);
 μ = Viscosidade do fluido (cP);
 d = Diâmetro do pistão (m);
 l = Comprimento da haste (m);
 D = Diâmetro do tubo do amortecedor (m).

Como citado anteriormente, há também uma força de amortecimento produzida pelo sistema de geração de energia. A força em questão será discutida no tópico 1.4.2 e seu montante

será somado a força de amortecimento do amortecedor do conjunto de forma paralela através da equação:

$$K_{eq} = K_1 + K_2 + \dots + K_n \quad (5)$$

Onde:

K_{eq} = Constante de amortecimento equivalente (N*s/m);

Desse modo, o equacionamento de forças pode ser expresso da seguinte forma:

$$F_d = F_{amortecimento} \quad (6)$$

Que pode então ser expandida.

$$m * a = F_{mola} + F_{amortecedor} + F_{sistema\ de\ geração\ de\ energia} \quad (7)$$

A qual pode ser substituída por seus componentes. Vale ressaltar que a fórmula que descreve a força de amortecimento do sistema de geração de energia será abordada no tópico 2.4.1.

$$m * a = K * x + C * \dot{u} + \sigma_{Cu} * v_z * B_r^2 * d_{(vol\ bobina)} \quad (8)$$

Substituindo C por seus componentes, tem-se que:

$$m * a = K * x + \mu * \left\{ \left[\frac{3\pi D^3 l}{4d^3} * \left(1 + \frac{2d}{D} \right) \right] * \dot{u} \right\} + \sigma_{Cu} * v_z * B_r^2 * d_{(vol\ bob.)} \quad (9)$$

Onde:

m = Massa (kg);

a = Aceleração (m/s²);

$K =$	Constante elástica da mola (N/m);
$x =$	Amplitude da compressão ou distensão da mola (m);
$\mu =$	Viscosidade do fluido (cP);
$d =$	Diâmetro do pistão (m);
$l =$	Comprimento da haste (m);
$D =$	Diâmetro do tubo do amortecedor (m);
$\dot{u} =$	Velocidade do deslocamento (m/s);
$v_z =$	Velocidade da bobina relativa ao campo magnético (m/s);
$\sigma_{Cu} =$	Condutividade Elétrica do Cobre (mhos/m);
$B_r =$	Densidade do Fluxo Magnético (Tesla);
$d(vol\ bob.) =$	Diferencial do Volume da Bobina.

Uma vez determinadas as forças que dissipam a energia (a mola, o amortecedor e o sistema de geração de energia), é preciso considerar a força de excitação do sistema, a qual é dinâmica, mas que para fins de cálculo será considerada como uma onda senoidal.

Para o cálculo das forças de amortecimento é preciso determinar a velocidade, aceleração e comprimento da compressão ou distensão que o sistema sofreu (RAO, 2009).

Para a determinação dos valores de velocidade e aceleração será utilizada a equação abaixo, em que a equação do movimento oscilatório harmônico é dada por:

$$x = A * \text{sen}(\theta) = A * \sin(\omega t) \quad (10)$$

Onde:

$x =$	Posição (m);
$\theta =$	Angulação (radianos);
$\omega =$	Velocidade angular (rad/s).

Já a velocidade da massa m em relação ao tempo é definida como sendo a primeira derivada em relação à equação do movimento, logo:

$$\frac{dx}{dt} = \omega A * \cos(\omega t) \quad (11)$$

Onde:

$\frac{dx}{dt}$ = Derivada primeira em relação ao tempo (m/s);

ω = Velocidade angular (rad/s);

t = Tempo (s);

A = Magnitude (m).

De forma análoga, a aceleração é a derivada segunda da equação 10, ou seja, a derivada da equação da velocidade em relação ao tempo.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A * \sin(\omega t) \quad (12)$$

Onde:

$\frac{d^2x}{dt^2}$ = Derivada segunda em relação ao tempo (m/s²);

ω = Velocidade angular (rad/s);

t = Tempo (s);

A = Magnitude (m).

Se substituirmos a equação que descreve a aceleração pela letra a da equação 9, teremos a equação que descreve o movimento ao qual o sistema será submetido juntamente com as forças opostas a esse movimento.

$$m * (-\omega^2 A * \sin(\omega t)) = K * A * \sin(\omega t) + \mu * \left\{ \left[\frac{3\pi D^3 l}{4d^3} * \left(1 + \frac{2d}{D} \right) \right] * \dot{u} \right\} + \sigma_{Cu} * v_z * B_r^2 * d_{(vol\ bob.)} \quad (13)$$

Onde:

$a =$ Aceleração (m/s^2);

$K =$ Constante elástica da mola (N/m);

$v_z =$ Velocidade relativa (m/s).

Levando em conta que o movimento que será utilizado nos testes tende a ser harmônico, as equações que foram apresentadas devem descrever com precisão aceitável o movimento oscilatório ao qual o sistema será submetido.

2.4 GERAÇÃO DE ENERGIA

A geração de energia por meio da oscilação de um sistema de suspensão pode ser feita de diversas maneiras. Uma delas é através de um sistema de transmissão pinhão cremalheira. Entretanto, o rendimento de um sistema confeccionado desse modo é baixo. Esse rendimento inferior se dá por conta da grande quantidade de perdas que há nesse sistema. Isso foi comprovado por meio da construção e teste do protótipo de bancada abaixo (ORTIZ, et al).

Figura 16 - Gerador Oscilo-Dinâmico



Fonte: ORTIZ; 2018

Muito embora o estudo tenha apontado a grande quantidade de perdas no sistema, também foi apontado um potencial para o conceito de suspensão regenerativa caso o conjunto fosse melhorado. De acordo com o estudo o protótipo construído foi capaz de gerar uma tensão média de 3 V e máxima de 6,8 V. Em uma estimativa feita pelos autores a potência de 762,5 W poderia ser alcançada se o sistema fosse aperfeiçoado e aplicado à uma motocicleta.

Reforçando a perspectiva de que a geração de energia em suspensões é um campo muito promissor, há estudos que comprovam o rendimento de sistemas que visam o mesmo objetivo, usando um modelo diferente de construção. Um exemplo é o trabalho desenvolvido na Universidade de Jiangsu, China. Esse estudo em particular foi feito com um modelo de suspensão ativa e regeneradora de energia. De acordo com os autores o sistema além de ser capaz de gerar energia, também proporciona um aumento no conforto de até 15 % (SHI *et al.*, 2014). É importante ressaltar que o estudo foi realizado utilizando um motor de corrente contínua que foi utilizado para a captação de energia.

Além disso, um estudo realizado em Massachusetts também aponta a oscilação de um ímã permanente no interior de uma bobina como uma maneira de gerar energia a partir das oscilações de um sistema de suspensão automotivo. Nesse estudo estimou-se que a porcentagem de capacidade de recuperação de energia do sistema de suspensão se aplicado em um carro de 2.500 lb em uma rodovia genérica dos Estados Unidos, a uma velocidade de 20 m/s seria de 20 a 70 % (GOLDNER; ZERIGIAN; HULL, 2001).

Uma vez expostos os trabalhos acima, que servirão de referência para o desenvolvimento do trabalho, é necessário compreender a indução de corrente e também os cálculos existentes para estimar a quantidade de energia que pode ser induzida em um determinado sistema.

2.4.1 Indução de corrente

A corrente induzida foi descoberta simultaneamente por Joseph Henry e Michael Faraday, nos Estados Unidos e na Inglaterra respectivamente. A descoberta foi feita no ano de 1830 através de um experimento no qual um anel metálico era submetido à um fluxo magnético variável. A partir disso notou-se a presença de corrente, o que seria a partir de então chamada de corrente induzida (PAUL A. TIPLER; GENE MOSCA, 2009).

A corrente é induzida por conta da variação do fluxo magnético na superfície do fio, o que conseqüentemente gera uma movimentação nos elétrons livres no material. Essa movimentação é um diferencial de energia (tensão) que acaba gerando a corrente elétrica. Cabe notar que a corrente induzida é proporcional a tensão gerada pela força eletromagnética e a resistência do material, conforme fórmula abaixo.

$$V = R * I \quad (14)$$

Onde:

$V =$ Tensão (V);

$I =$ Corrente (A);

$R =$ Resistência (Ohm).

Enquanto que a corrente é função da tensão e da resistência, a tensão em si é dada pela força eletromagnética que é determinada através da fórmula abaixo.

$$\varepsilon = \frac{d\varphi_m}{dt} \quad (15)$$

Onde:

$\varepsilon =$ Força Eletromagnética (V);

$\varphi_m =$ Fluxo Magnético (Wb);

$t =$ Tempo (s).

Por sua vez, a força eletromagnética é função da variação do fluxo magnético no tempo, como mostra a fórmula 15. Para que o fluxo magnético possa ser calculado, pode ser utilizada a formulação a seguir.

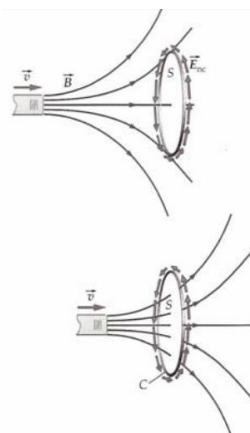
$$\varphi_m = N * B * A * \cos(\theta) \quad (16)$$

Onde:

- $\varphi_m =$ Fluxo Magnético (Wb);
 $N =$ Número de espiras da bobina ou número de anéis (-);
 $B =$ Campo Magnético (Tesla);
 $A =$ Área da circunferência da bobina ou anel (m^2);
 $\theta =$ Ângulo entre a normal da superfície e o campo magnético (graus).

Desse modo, é possível estimar a corrente que será induzida por um ímã permanente em uma bobina de material conhecido a partir do número de espiras que a bobina tem, a área da circunferência descrita pelos anéis da bobina em questão, o ângulo entre a normal da superfície e o campo magnético e valor do campo magnético em si. Na figura abaixo é possível observar uma ilustração que representa o acontecimento do fenômeno descrito.

Figura 17 - Exemplo de indução de corrente



Fonte: (PAUL A. TIPLER; GENE MOSCA, 2009)

Nesse caso, a superfície “S” está sendo exposta à uma variação de campo magnético, o que conseqüentemente induz uma força eletromagnética no anel. Uma vez que o ângulo entre o campo magnético e o vetor normal à superfície é zero, o cosseno de θ será igual a 1. Aplicando esse valor na fórmula 16 é possível notar que o fluxo magnético nesse caso em específico é função apenas da área, do campo e do número de anéis ou espiras.

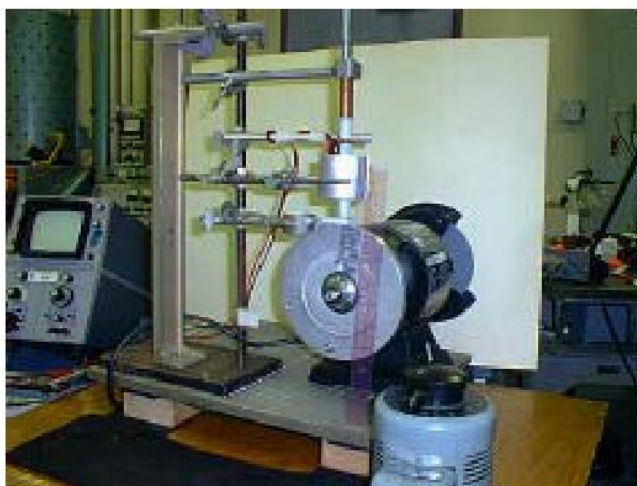
Vale ressaltar que muito embora força eletromagnética seja percebida através de aferições de corrente, a mesma permanece existindo mesmo que não haja um fechamento do

circuito e também se não houver corrente. Isso acontece, pois, as forças eletromagnéticas podem estar distribuídas ao longo de todo o circuito.

Uma vez que os materiais e suas propriedades sejam conhecidos, bem como o formato de sua aplicação é viável determinar o fluxo magnético ali existente. A partir disso, conhecendo a variação desse campo em relação ao tempo, a força eletromagnética aplicada na bobina é determinada e conseqüentemente é possível chegar ao valor da corrente induzida.

Além dos cálculos para estimar essa corrente, é possível também efetuar testes práticos para se chegar ao valor real. Um exemplo de teste é observado no trabalho de Goldner, Zerigian e Hull, no qual um simulador de oscilações foi construído e conectado a um sistema que transforma o movimento circular em movimento vertical. O movimento vertical por sua vez proporciona um movimento de um ímã permanente dentro de uma bobina de cobre como mostra a imagem abaixo.

Figura 18 - Simulador de oscilação para indução de energia



Fonte: GOLDNER; ZERIGIAN; HULL, 2001

2.4.2 Cálculos de geração de energia

Afim de estimar a quantidade de energia que será gerada pelo sistema, bem como a força de amortecimento produzida pelos campos, utilizou-se a metodologia de cálculos adotada pelos autores Goldner, Zerigian e Hull em seus experimentos. Desse modo, primeiramente é necessário definir a força de amortecimento exercida pelo sistema de geração de energia, afinal,

com a movimentação do ímã no interior da bobina um campo de sentido oposto ao movimento será formado.

O cálculo da força de amortecimento é essencial para estimar corretamente a quantidade de corrente que será induzida na bobina, uma vez que a mesma é função da velocidade relativa entre os componentes, e a velocidade é diretamente afetada por forças de amortecimento como a força em questão.

Para calcular a força resultante é preciso primeiro calcular o campo elétrico E gerado pelo movimento. Para isso, utilizou-se a Lei de Lorentz conforme equação abaixo:

$$E_{\phi} = v_z * B_r \quad (17)$$

Onde:

- E_{ϕ} = Campo Elétrico (V/m);
- v_z = Velocidade Relativa (m/s);
- B_r = Densidade do Fluxo Magnético (Tesla).

É preciso também determinar qual é a densidade da corrente parasita, a qual é dada por:

$$J_{\phi} = \sigma_{Cu} * E_{\phi} \quad (18)$$

Onde:

- E_{ϕ} = Campo Elétrico (V/m);
- J_{ϕ} = Densidade da Corrente Parasita (A/m²);
- σ_{Cu} = Condutividade Elétrica do Cobre (m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$)).

Uma vez determinados o campo elétrico e a densidade da corrente parasita, é possível afirmar que o diferencial da corrente parasita passando pela seção transversal de área do fio da bobina é:

$$dI = J_{\phi} \cdot dA \quad (19)$$

Onde:

- d I = Derivada da Corrente (A);
 J_{ϕ} = Densidade da corrente parasita (A/m²);
d A = Diferencial de Área.

Tendo em vista que o campo magnético e o campo elétrico têm sentidos opostos e que a corrente parasita auxilia no processo de amortecimento, é possível equacionar esses parâmetros levando em conta que são fenômenos proporcionais ao comprimento da bobina. Desse modo, é possível afirmar que a força de amortecimento é uma resultante do produto da densidade da corrente parasita (J), da densidade do fluxo magnético (B) e do diferencial de volume (d(vol)).

$$d F_{Am} = J_{\phi} * B_r * d(vol \text{ bobina}) \quad (20)$$

Onde:

- F_{Am} = Força de Amortecimento (N);
 $d(vol \text{ bobina})$ = Diferencial do Volume da Bobina.

Substituindo a densidade da corrente parasita pela equação 18 temos que:

$$d F_{Am} = \sigma_{Cu} * E_{\phi} * B_r * d(vol \text{ bobina}) \quad (21)$$

Em seguida, substituindo o Campo Elétrico E_{ϕ} utilizando a Lei de Lorentz (equação 17) e integrando a equação, tem-se que:

$$F_{Am} = \sigma_{Cu} * v_z * B_r^2 * d(vol \text{ bobina}) \quad (22)$$

Onde:

F_{Am} = Força de amortecimento devido ao campo (N);

v_z = Velocidade relativa (m/s);

σ_{Cu} = Condutividade Elétrica do Cobre (m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$));

B_r = Densidade do Fluxo Magnético (Wb/m²);

$d(\text{vol bobina})$ = Diferencial do Volume da Bobina.

Uma vez definida a força de amortecimento o próximo passo é a determinação da corrente (I) induzida na bobina. Para isso usou-se a equação 20, na qual substituiu-se a densidade da corrente parasita pela equação 18. Em seguida, na equação 18 o campo elétrico foi então definido através da Lei de Lorentz e aplicado a formulação anterior. Por fim, a fórmula foi integrada em relação a área da secção transversal da bobina, levando a definição da corrente através da equação abaixo:

$$I = \sigma_{Cu} * v_z * B_r * A \quad (23)$$

Onde:

I = Corrente Induzida (A);

σ_{Cu} = Condutividade Elétrica do Cobre (m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$));

v_z = Velocidade Relativa (m/s);

B_r = Densidade do Fluxo Magnético (Tesla);

A = Área da Seção Transversal do fio da Bobina (m²).

A velocidade v_z pode ser obtiva através de testes práticos ou através da equação utilizada por Goldner, Zerigian e Hull, conforme abaixo:

$$v_z = \frac{g * \sigma_{Cu} * B_r^2 * V}{m} * \left(1 - e^{\left(\frac{-t * m}{\sigma_{Cu} * B_r^2 * V} \right)} \right) \quad (24)$$

Onde:

$v_z =$ Velocidade Relativa (m/s);

$g =$ Gravidade (m/s²);

$\sigma_{Cu} =$ Condutividade Elétrica do Cobre (m/($\Omega \cdot \text{mm}^2$));

$B_r =$ Densidade do Fluxo Magnético (Tesla);

$V =$ Volume da Bobina (m³);

$m =$ Massa (kg);

$t =$ Tempo (s).

Levando em consideração que a condutividade elétrica do material e a área de seção transversal do fio são constantes, é possível afirmar que: a corrente induzida na bobina é função da variação do campo magnético (considerando que o campo magnético fornecido pelo imã também não se altera).

Ou seja, a corrente induzida é diretamente proporcional a velocidade relativa. Desse modo, quanto mais rápidas as movimentações do amortecedor, mais corrente será induzida. Portanto, é possível prever que em terrenos mais acidentados, e em velocidades mais elevadas, onde há mais atrito e mais combustível é gasto, é também o ambiente no qual haverá a maior produção de energia pelos amortecedores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo será abordado o modelo de amortecimento físico em seus aspectos construtivos e funcionais, bem como a forma de captação de dados, geração de energia e especificações técnicas relevantes.

3.1 GERAÇÃO DE ENERGIA

Para que o sistema de suspensão seja capaz de executar sua função e ainda transformar parte da energia do movimento em eletricidade, o conceito de corrente induzida foi utilizado para desenvolvimento do protótipo.

No modelo desenvolvido um ímã permanente que é fixado à haste do pistão do amortecedor é responsável por induzir uma corrente elétrica em uma bobina que está acoplada ao corpo do amortecedor. Uma vez que o amortecedor seja utilizado, seu movimento oscilatório fará com que exista uma velocidade relativa entre o ímã e a bobina, o que conseqüentemente induzirá uma corrente no fio da bobina. Levando em conta que a construção do amortecedor é consideravelmente mais difícil, essa situação foi adequada para uma bancada de testes na qual será reproduzido o movimento relativo sem a presença do sistema hidráulico de amortecimento.

Nesse caso, o movimento ocorre entre uma base na qual a bobina foi fixada e uma haste ligada a bielas que são responsáveis por transmitir o movimento giratório dos eixos do motor.

3.2 O PROTÓTIPO

No intuito de avaliar a viabilidade do projeto e de obter resultados práticos foi desenvolvida uma bancada para testes, a qual permite a simulação dos esforços de maneira controlada e também a captação de dados para posterior análise. Logo, foram alocados uma bobina, uma haste contendo ímãs e um modelo de motor de corrente contínua que constituem a bancada desenvolvida pelo autor.

Vale ressaltar que além de sensores, a bancada foi equipada também com um resistor de 560 ohm na extremidade da bobina para que ocorra a dissipação da energia gerada, tornando assim viável a aferição da corrente induzida pela bancada.

Para que o movimento oscilatório seja transformado em energia elétrica a bancada foi equipada com um sistema de indução de corrente através de ímãs permanentes de uma liga de Neodímio, Ferro e Boro. A bancada conta com dez ímãs em forma de cilindro com 10 mm de diâmetro e 10 mm de altura. Abaixo na Tabela 1, constam as especificações do ímã fornecidas pelo fabricante.

Tabela 1 - Especificações dos ímãs

Dimensões	
Diâmetro	10 mm
Espessura	10 mm
Tolerância	± 0,1 mm
Dados técnicos	
Força de atração	Aprox. 4,00 kg *Valor apenas para referência, podendo variar dependendo o uso.
Grade	N42
Temperatura máxima	80°C
Densidade de fluxo magnético	5.900 Gauss

Fonte: Casa do Ímã, magnéticos, vibratórios de Curitiba

O ímã em questão está posicionado dentro de um componente cilíndrico que irá fazer as vezes da haste do amortecedor, conforme ilustrado na Figura 21 no componente tubo da haste.

Além do ímã, a bancada também faz uso de uma bobina de diâmetro interno 13,5 mm e diâmetro externo de 16 mm, feita de um fio de cobre esmaltado AWG32 e composta por 350 voltas. O fio possui as seguintes especificações de acordo com a empresa Altana Tubes.

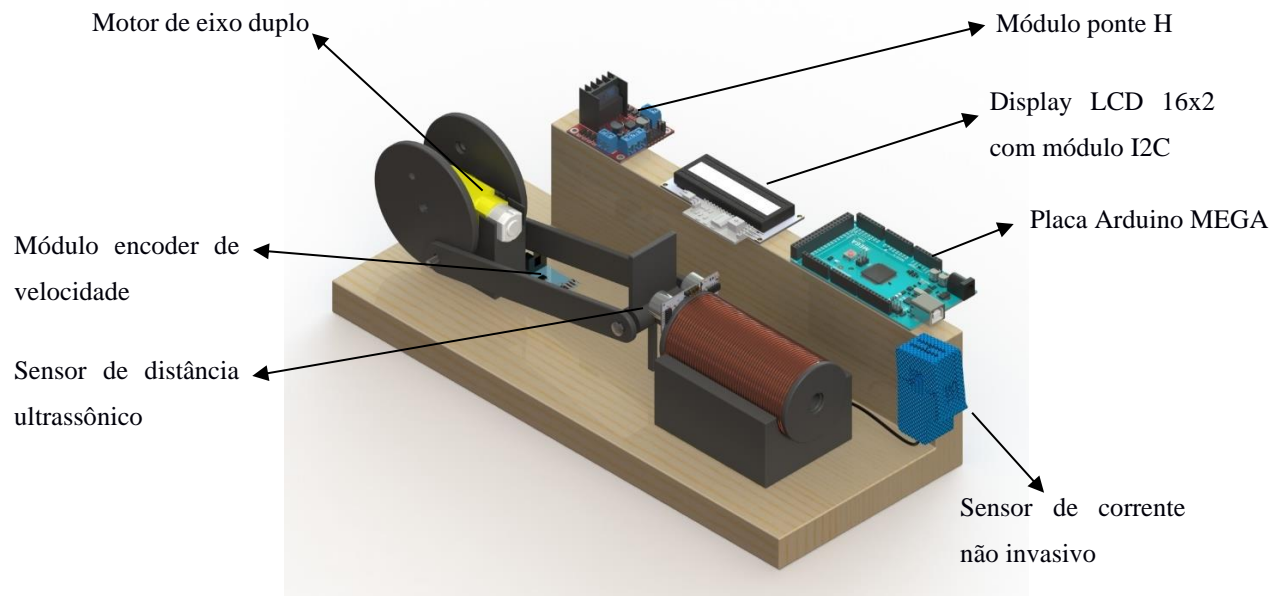
Tabela 2 - Propriedades fio de cobre

Numero AWG	Diâmetro (mm)	Espiras por cm	Área (mm ²)	Resistência (Ω/km)	Peso (kg/km)	Comprim. (m/kg)	Corrente máxima (A)			Frequência máx. (kHz)
							2,5A/mm ²	3A/mm ²	6A/mm ²	
32	0,202	49,514	0,032	536,912	0,287	3483,9	0,0801	0,0961	0,192	427,261

Fonte: Altana Tubes

Na Figura 19 é apresentado o projeto da bancada constituída pelos componentes indicados.

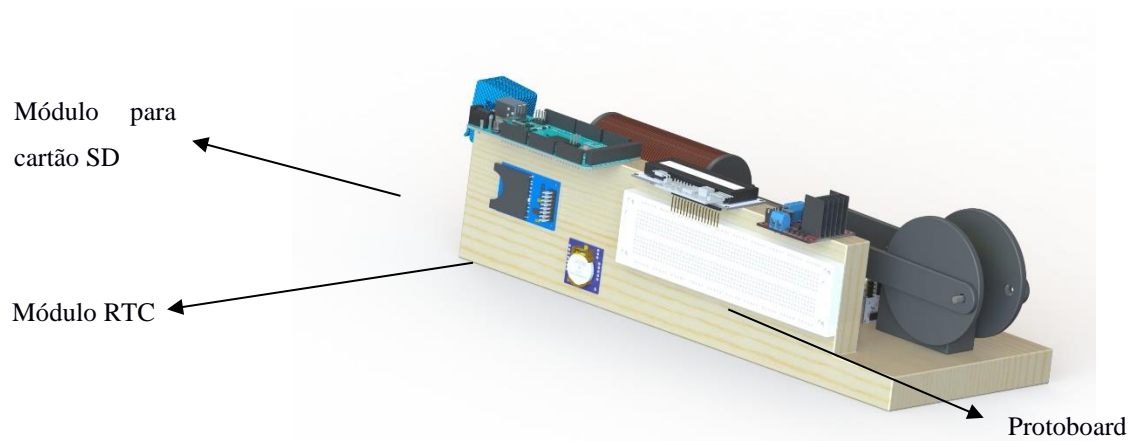
Figura 19 - Projeto da bancada em vista isométrica.



Fonte: Autor.

Na Figura 20 é apresentada a vista posterior da bancada onde se encontram os sensores de tensão, o módulo RTC, o módulo para cartão SD e a protoboard utilizada na construção do modelo.

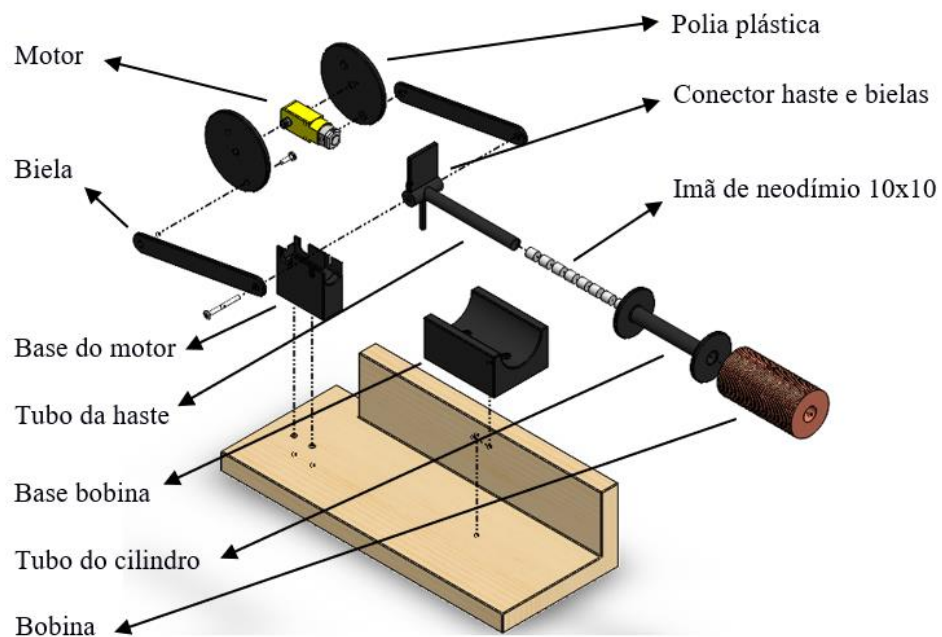
Figura 20 - Projeto da bancada em vista posterior



Fonte: Autor.

Na Figura 21 é possível observar a bancada sem o sistema de sensoriamento com os componentes apresentados em forma de explosão. Na figura é possível visualizar todos os componentes estruturais e também o posicionamento dos ímãs e da bobina que constituem o sistema de geração de energia propriamente dito.

Figura 21 - Vista explodida da bancada



Fonte: Autor.

3.2.1 Funcionamento

Ao absorver as oscilações da pista, o conjunto da suspensão irá também transferir parte desse movimento para os amortecedores. Uma vez que esse movimento seja transferido o pistão, e o embolo consequentemente, irão movimentar-se em relação à carcaça e, portanto, em relação à bobina de cobre. Logo, esse movimento será responsável pela indução de corrente na espira. Assim que induzida a corrente, essa energia será convertida e disponibilizada para a bateria do veículo no caso de aplicações em escala industrial.

Já no caso da bancada de testes, esse movimento oscilatório será gerado pelo motor e o conjunto de bielas. Mesmo assim, o princípio de funcionamento permanece o mesmo, entretanto, sem a presença do amortecimento hidráulico que funcionaria em paralelo no caso

de uma aplicação real. Vale ressaltar que para fins de teste o sistema foi submetido à uma oscilação média de 57 mm em uma frequência média de 5,6 Hz.

3.3 TESTES

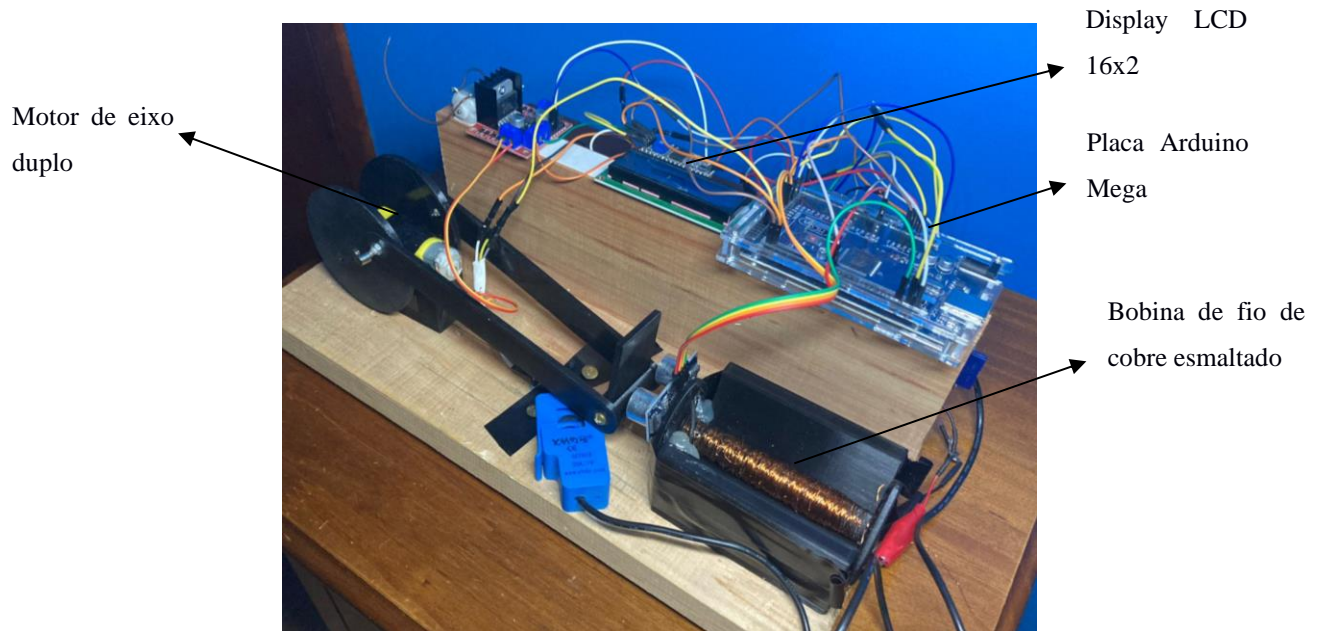
Uma vez que o sistema seja inicializado ocorre uma checagem dos sistemas e em seguida é iniciada a aceleração do motor de eixo duplo que é responsável pelo movimento linear. Junto da aceleração gradual as medições iniciam, bem como o registro das mesmas no módulo SD, o qual é responsável por registrar os dados em formato “.txt” em um cartão de memória. Ao mesmo tempo, algumas das informações são apresentadas no display para que o processo possa ser acompanhado em tempo real. Finalizado o ciclo de testes, o arquivo é gerado e o cartão é desconectado do módulo.

Uma vez com os dados em um computador, os mesmos são separados em uma planilha para posterior envio ao PowerBI. Uma vez no PowerBI, os dados podem ser analisados de diferentes formas e em diferentes visualizações.

A apresentação dos dados de forma individual, bem como a análise dos mesmos será abordada no tópico de conclusões. Na Figura 22 é apresentado o protótipo desenvolvido para testes. São também indicados o motor que faz a movimentação do sistema e a bobina de fio de cobre que foi construída para a realização dos testes. Na imagem é apresentado o sensor de corrente não invasivo sobre a bancada, mas durante os testes o mesmo foi instalado na parte externa onde estão localizados fios conectados às extremidades da bobina. Portanto, o sensor não fica na posição apresentada na imagem e sim em um local onde não interfere no funcionamento da bancada.

É importante ressaltar que tanto a base da bobina quanto a base de fixação do motor estão parafusadas na estrutura de madeira para evitar movimentações indesejadas durante os testes.

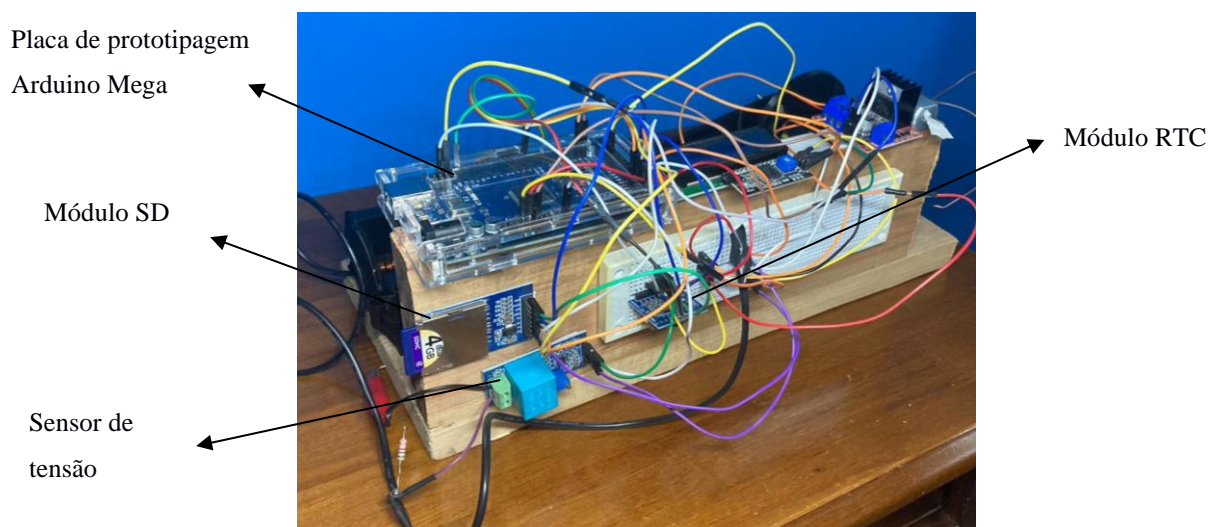
Figura 22 - Banca de testes pronta vista isométrica



Fonte: Autor

Na parte posterior do protótipo, apresentada na Figura 23, é possível observar o módulo RTC, o módulo para cartão SD e também o sensor de tensão em destaque. Também é indicada a placa de prototipagem onde são conectados os sensores e módulos de comando.

Figura 23 - Bancada de testes pronta vista posterior

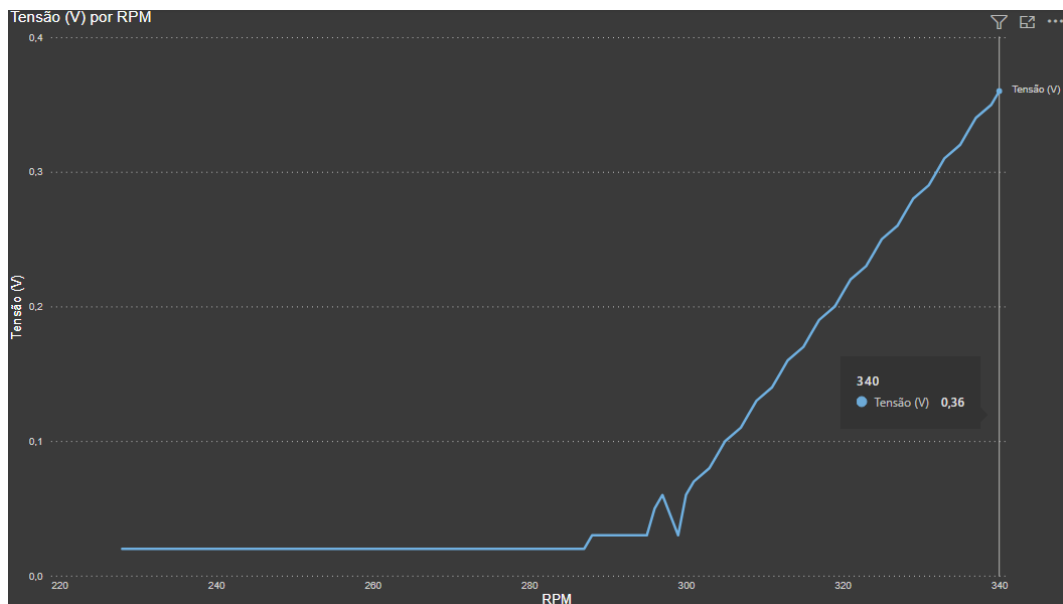


Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a configuração exposta foram obtidos os valores de tensão rms apresentados no gráfico da Figura 24. Em rosa os valores de rpm alcançados durante os testes e em azul os valores de tensão registrados pelos sensores ao longo do tempo. No eixo x, o tempo é apresentado em milissegundos e no canto inferior direito são apresentados os valores de pico obtidos na rotação máxima de 340 rpm.

Figura 24 - Gráfico tensão x rotação no tempo.

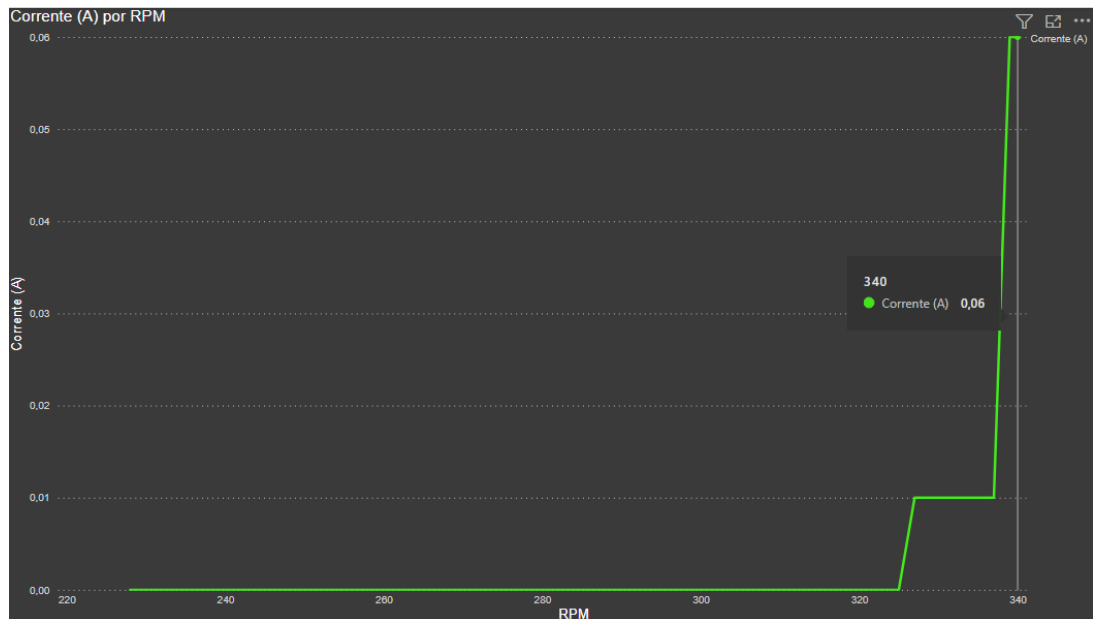


Fonte: Autor.

Observando o gráfico da Figura 24 é possível perceber que o pico tensão ocorre junto ao pico de rotação do motor utilizado na bancada, o que era esperado levando em conta a relação direta entre a variação da velocidade e da indução de corrente na bobina.

Além disso, foi também aferida a corrente durante os testes, a qual é apresentada na Figura 25. No gráfico da imagem é possível notar o aumento da corrente captada pelo sensor ao longo do tempo. O aumento ocorre juntamente com o aumento das rotações representadas pela linha rosa do gráfico e alcança seu pico no mesmo momento em que a rotação e a tensão captada pelo sensor.

Figura 25 - Gráfico corrente x rotação no tempo.



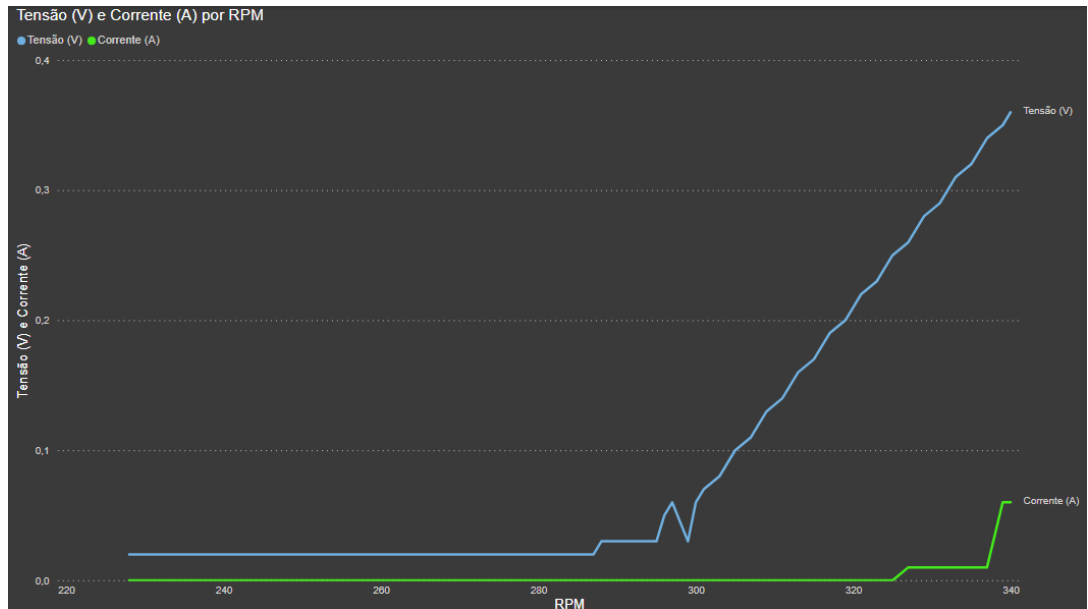
Fonte: Autor.

Na parte superior direita é possível visualizar os valores captados no valor máximo de rotação. De forma análoga à tensão, os valores são mais elevados nesse instante por conta do aumento da variação do fluxo magnético no tempo.

Através dos gráficos da Figura 26, é possível perceber que tensão e corrente aumentam gradativamente durante o início dos testes, no qual o motor trabalha com uma aceleração constante. Entretanto, há variações no gráfico que indicam a falha na captação de dados através dos sensores, sendo esse um ponto de melhoria para estudos futuros.

Ao atingir aproximadamente quarenta segundos de trabalho, o motor atinge sua velocidade máxima e a potência do motor começa a ser reduzida gradualmente. Também é possível perceber que o valor de corrente é bastante reduzido no início do teste, chegando ao ponto de não ser captado pelo sensor instalado na bancada.

Figura 26 - Gráfico de tensão x corrente x rotação no tempo.



Fonte: Autor.

O pico coincidir com a velocidade máxima do motor corresponde com o previsto pelas equações de indução citadas nos capítulos anteriores. Dessa forma, o pico de geração de energia ocorreu no momento em que houve a maior taxa de variação do fluxo magnético no tempo, ou seja, o momento em que o motor linear atingiu também sua velocidade máxima.

Vale ressaltar que a estimativa de geração de energia apresentadas pelos cálculos foi bastante aproximada se comparada com a que foi captada pelos sensores. Abaixo consta a planilha elaborada com base nas equações apresentadas no tópico 1.4.2 que foi preenchida com as informações fornecidas pelos fabricantes dos itens e dimensionamentos de projeto.

Tabela 3 - Tabela para cálculo de geração de energia

Dados	
Diâmetro Bobina (m)	0,013601
Comprimento Bobina (m)	0,09
Diâmetro (bitola) Fio (m)	0,000202
Resistência Fio (ohm/m)	5,36
Número total de espiras (un)	350
Comprimento aproximado do fio (m)	14,95508059
Número de imãs	10
Campo Magnético unitário (Tesla)	0,59
Campo Magnético (Tesla)	5,9
Área da circunferência da bobina (m ²)	0,000145289
Ângulo entre a normal da superfície e o campo magnético	0
Fluxo magnético na bobina (Weber)	
phy	0,030002098
Força Eletromagnética na bobina (Volt)	
Épsilon	0,340023772
Corrente (Amper)	
I	0,063437271
Tempo para variação máxima (s)	
	0,088235294

Fonte: Autor.

Em azul os dados de entrada da planilha de cálculos, já em vermelho são apresentados os dados de saída (calculados automaticamente). Através dessa planilha é possível observar que a previsão para tensão é de 0,34 Volts e corrente de 0,06 Amperes para uma variação máxima de 0,088 segundos, o que corresponde à 680 ciclos por minuto. Levando em conta a oscilação máxima ocorrendo a cada 180° percorridos pelo disco acoplado ao eixo do motor, esse dado corresponde as 340 rpm aplicadas sobre o sistema na prática.

Comparando os dados calculados com os dados obtidos pelos sensores no protótipo, verifica-se que os dados são coerentes, entretanto não suficientes para utilização da energia gerada.

Para fins de comparação, foram consumidos aproximadamente 2.4 W pelo motor para que o movimento em velocidade máxima fosse produzido. Para tanto, foram gerados 0.0216 W na bobina através da indução. Levando em conta esses dados, é possível definir a eficiência de reaproveitamento da bancada, sendo a mesma de 0.9 %.

Entretanto, vale ressaltar que em uma aplicação real, os 2,4 W estariam sendo desperdiçados pelo amortecedor através de calor para o meio ambiente de qualquer forma, logo, o ganho do gerador seria totalmente isento de gastos para gerá-los. Muito embora, existam gastos energéticos para transportar o sistema, tendo em vista que o mesmo ocuparia espaço e também geraria aumento da massa do veículo.

Tendo em vista os valores obtidos, a transformação da corrente alternada para corrente contínua consumiria praticamente toda a carga gerada. Logo, a energia gerada não seria aproveitada pelo usuário. Por conta disso, o modelo proposto não teria aplicabilidade prática na escala em que foi construído. Entretanto, vale ressaltar que o conceito foi devidamente comprovado, o que viabiliza estudos e testes mais refinados para o desenvolvimento e aplicação dessa tecnologia.

Considerando uma aplicação prática em um veículo de passeio por exemplo, seriam quatro unidades de geração trabalhando de forma normalmente simultânea. Além disso, em um veículo há também a possibilidade de utilização de outros materiais e componentes mais robustos.

Considerando a validação dos resultados apresentados pela planilha de cálculo é possível estimar a geração de energia de um sistema com componentes mais adequados por exemplo. Um possível caso de estudo seria a fabricação de uma bobina com quatro mil espiras, ao invés de trezentas e cinquenta. Nesse caso, a tensão máxima gerada chegaria a 3.88 V e a corrente a 0.72 A para cada um dos amortecedores. Em uma outra configuração com a utilização de ímãs de 6.400 Gauss e a mesma espira, a tensão gerada seria de 4.22 V e 0.78 A. Com esses valores (em corrente contínua) por exemplo seria possível fazer o carregamento de um barbeador modelo *Philips One Blade*, que é vendido com uma fonte que fornece 4.3 V e 0.7 A.

Ou seja, com maiores estudos e testes é possível atingir valores maiores de geração de energia o que pode viabilizar a utilização de um sistema de amortecimento regenerativo em veículos elétricos.

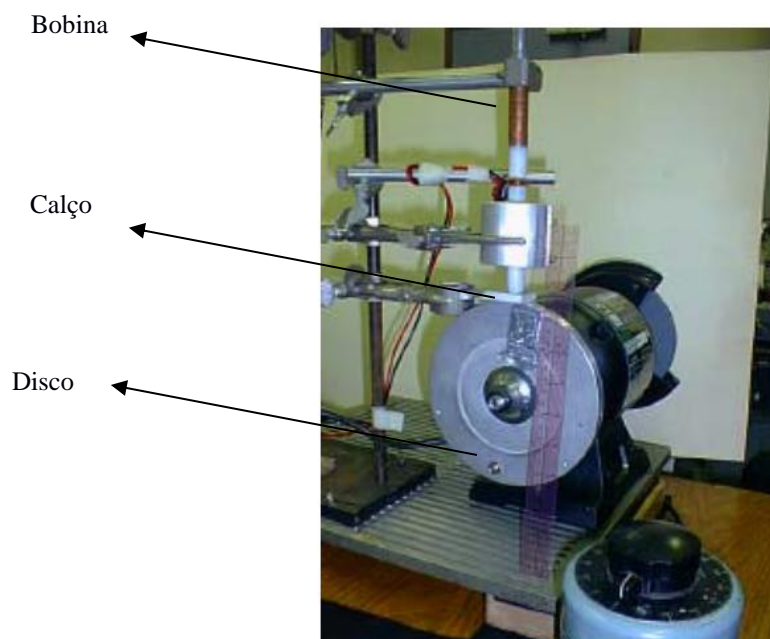
Em concordância com essa afirmação, há no experimento de Goldner (GOLDNER; ZERIGIAN; HULL, 2001) um pico de 1.3V, o qual foi alcançado quando o sistema foi exposto a uma frequência de 20 Hz em uma oscilação média de 2 mm.

No estudo desenvolvido por Goldner uma bancada que funcionou com amplitudes bastante inferiores e com uma frequência bem maior comparada com as que foram utilizadas nesse estudo. Na Figura 27 é apresentada uma imagem da bancada desenvolvida por Goldner e

seus colegas. Nela é possível observar um disco de metal com um pequeno calço em sua extremidade. Quando em funcionamento o calço de 2 mm se choca com um cilindro conectado à uma série de ímãs na parte superior da foto.

Assim que ocorre o impacto do calço com o cilindro, os ímãs são movimentados para cima e ocorre o movimento relativo entre os ímãs e a bobina que está fixa no suporte apresentado na figura.

Figura 27 - Bancada de testes de Goldner.



Fonte: (GOLDNER; ZERIGIAN; HULL, 2001)

Nesse sentido, a bancada de Goldner trabalha com variações maiores do fluxo magnético e, portanto, gera mais energia. Esse cenário é comparável ao deslocamento de um veículo em alta velocidade através de um trajeto regular. Haverão oscilações leves na pista que fariam o sistema de suspensão ter uma baixa amplitude de movimentação, entretanto, bastante rápida devido à velocidade do veículo. Um contexto ideal para a geração de energia, conforme apresentam os resultados.

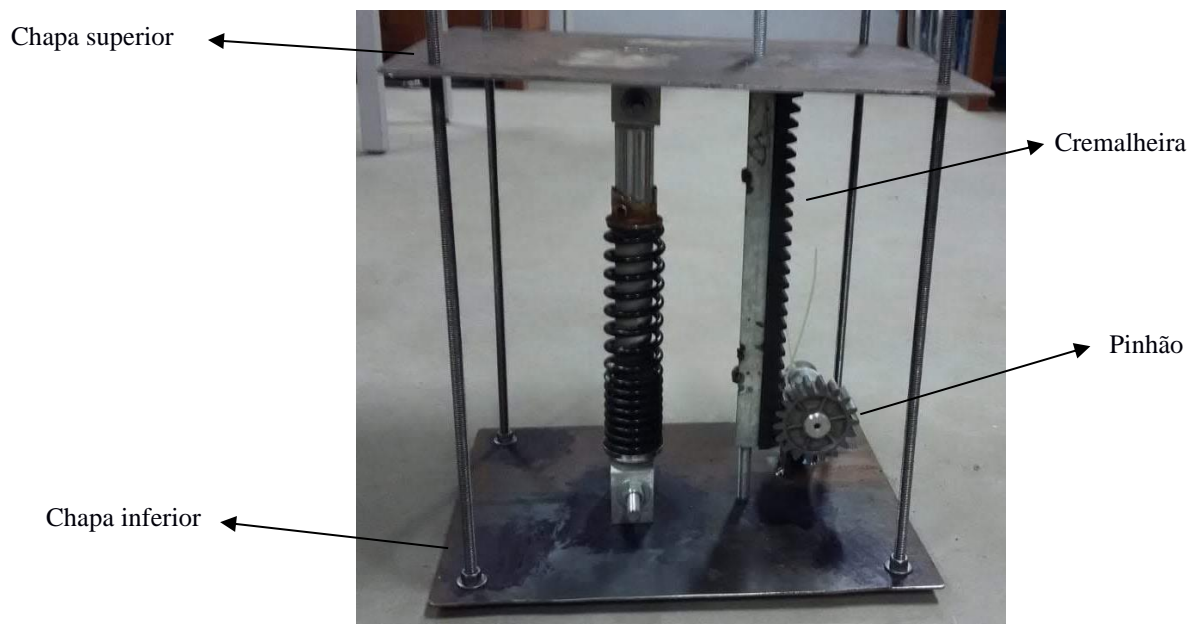
Em contrapartida, com os valores obtidos nesse trabalho é possível constatar um desempenho inferior com relação ao de Goldner. Com oscilações maiores e em velocidade inferior (aproximadamente 5.6 Hz) foram gerados apenas 0.36 V.

No caso da bancada construída, esse comportamento corresponderia a um deslocamento lento em uma estrada acidentada, com grandes oscilações do sistema de amortecimento, mas que ocorrem de maneira lenta. Desse modo, um péssimo cenário para geração de energia, visto que a mesma é amplificada com o aumento da taxa de variação do fluxo.

Outra comparação pode ser feita com o estudo desenvolvido no trabalho de (ORTIZ;, 2018, et al), apresentada na Figura 28, no qual foi utilizado um sistema de amplificação do movimento dos ímãs.

No sistema o movimento relativo entre as chapas superior (móvel) e inferior (fixa) era transmitido para o eixo de um sistema de amplificação através de um sistema de pinhão e cremalheira. Uma vez transmitidos para a caixa de amplificação, a rotação do pinhão era multiplicada para o eixo do motor. Desse modo, a geração de energia foi otimizada com um movimento oscilatório reduzido.

Figura 28 - Bancada de testes com amplificação de movimento.



Fonte: (ORTIZ;, 2018, et al).

Vale ressaltar que nos testes realizados, a tensão de pico aferida foi de 6.8 V, sendo a média de 3 V, valores esses que justificam a aplicação de um sistema de amplificação da variação do fluxo magnético em relação a bobina.

Nesse sentido, uma possível combinação para estudos futuros seria o desenvolvimento de uma bancada planejada para alcançar taxas de variação maiores em amplitudes reduzidas. Esse último aspecto podendo ser muito interessante tendo em vista a possibilidade de desenvolvimento de um modelo compacto e leve, sem a necessidade da utilização de toda a amplitude do amortecedor por exemplo.

Dessa forma, a aplicação de uma tecnologia de geração de energia através do movimento oscilatório de suspensão de veículos deve ser estudada para cada tipo de aplicação. Ou seja, em cada tipo de veículo e para cada tipo de utilização, levando em conta frequência de uso, terreno de condução, velocidade média, entre outros aspectos.

Para outros estudos, é sugerida uma melhoria na forma de captação dos sinais e também a confecção de uma bobina com fios de cobre esmaltado AWG32 com mais espiras a utilização de ímãs com campo magnético mais forte.

Além disso, sugere-se também um cálculo estimado do atrito gerado pela indução de energia em cada modelo de bobina. Isso se torna relevante uma vez que esse atrito trabalhará como um amortecedor paralelo ao já existente no veículo e será levado em conta para fins de projeto de amortecedores.

Em destaque, sugere-se o desenvolvimento de um sistema capaz de amplificar a variação do fluxo magnético na bobina e assim otimize a geração de energia com variações baixas no movimento dos braços de suspensão. Nesse contexto a geração de energia será otimizada e o real potencial do projeto apresentado, permitindo assim, conclusões mais concretas a respeito do sistema como um todo.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida uma bancada de testes para simular o movimento oscilatório de um sistema de suspensão automotivo. A bancada visa aferir a quantidade de energia que pode ser regenerada com um sistema de indução de corrente acoplado ao amortecedor do sistema. Com base nos resultados obtidos é possível concluir que:

1. O protótipo construído gerou 0.36 V e 0.06 A, em uma amplitude de oscilação de 57 mm e em uma frequência de 5.6 Hz;
2. A bancada apresentou uma eficiência de transformação de energia de aproximadamente 0.9 %, o que ainda pode ser aumentado com melhorias no sistema;
3. Um sistema com ímãs de 6400 Gauss e uma bobina de quatro mil espiras em condições ideais poderia gerar uma tensão de 4.22 V e uma corrente de 0.7 A. Os valores serão ainda maiores com o aumento da frequência de oscilações, que conseqüentemente aumenta o fluxo magnético ao qual a bobina é exposta.

REFERÊNCIAS

ALIZON, Fabrice; SHOOTER, Steven B.; SIMPSON, Timothy W. Henry Ford and the Model T: lessons for product platforming and mass customization. **Design Studies**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 588–605, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.03.003>

BARBOSA, Chico. **Audi do brasil passado presente futuro**. São Paulo: CBNEWS Editora, 2019.

BOSE, Amar G. **ACTIVE SUSPENSION CONTROLLER**. US 7.421,954 B2. Concessão: 2008.

BRITANNICA, T. EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/Karl-Benz>. Acesso em: 4 abr. 2020.

CÔRTE-REAL, Edilmar Wanderley. Dessensibilização da estrutura de controle LQG aplicada ao modelo de uma suspensão ativa utilizando a técnica PRABI. [s. l.], 2002.

D'OLIVEIRA, Felipe Sarabando. Projeto de um amortecedor para protótipo de veículo off-road. [s. l.], p. 79, 2014.

DA CUNHA SOARES JUNIOR, Renan; ALVES LIMA, Ana Cristina; FREIRE, Heloisa Bruna Grubits. O comportamento do consumidor de automóveis. **Multitemas**, [s. l.], v. 21, n. 50, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20435/1117>

DIXON, John C. **Suspension Geometry and Computation**. 1. ed. Southern Gate: John Wiley & Sons Ltd, 2009.

FORD MOTOR CREDIT COMPANY. **FORD MUSTANG : COMO FUNCIONA A TECNOLOGIA Sobre a Ford Motor Company Brasil**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://media.ford.com/content/fordmedia/fsa/br/pt/news/2018/05/11/ford-mustang--como-funciona-a-tecnologia-avancada-da-suspensao-a.html>. Acesso em: 14 jun. 2020.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics - Thomas D.Gillespie**. [S. l.: s. n.], 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/ehp.1408989>

GOLDNER, R. B.; ZERIGIAN, P.; HULL, J. R. A preliminary study of energy recovery in vehicles by using regenerative magnetic shock absorbers. **SAE Technical Papers**, [s. l.], 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2001-01-2071>

MACPHERSON, Earle S. **VEHICLE WHEEL SUSPENSION SYSTEM**. US2624592. Concessão: 1953.

ORTIZ;, ChayanneP. D. Rech; Jonas O. de Jesus; Leonardo T. Manfroi; José V. **GERADOR OSCILO-DINÂMICO GERADOR OSCILO-DINÂMICO**. Lages: [s. n.], 2018.

PAUL A. TIPLER; GENE MOSCA. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 6. ed. [S. l.]: LTC, 2009.

PINSKY, Jaime. **AS PRIMEIRAS CIVILIZAÇÕES**. 25. ed. São Paulo: Schaffer

Editorial, 2011.

PRETI, Rodrigo De Oliveira. Modelagem e simulação de um sistema hidráulico proposto para funcionar como um amortecedor para pequenas amplitudes. [s. l.], p. 156, 2007.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Person Education Brasil, 2009.

REIMPELL, Jornsens; STOLL, Helmut; BETZLER, Jurgen W. **The automotive chassis: Engineering principles**. 2. ed. Wtirzburg: Butterworth-Heinemann, 2002. ISSN 0954-4070.v. 1 Disponível em: <https://doi.org/10.1177/095440700221600809>

RILL, Georg. **VEHICLE DYNAMICS**. [S. l.: s. n.], 2005. Disponível em: <http://homepages.fh-regensburg.de/~rig39165/>.

SANZ, Fernando Quesada. **CARROS EN EL ANTIGUO MEDITERRÁNEO : DE LOS ORÍGENES A ROMA**. [s. l.],

SCHOEGGL, Peter; HAIMANN, Andreas; RESS, Leo. Electrification in Motorsports. **AutoTechnology**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 4–11, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1365/s35595-012-0093-0>

SHI, Dehua *et al.* Design and experiment study of a semi- active energy-regenerative suspension system. [s. l.], p. 12, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/1/015001>

SOARES, Antonio Rafael. **PROJETO E DETALHAMENTO DE UMA SUSPENSÃO INDEPENDENTE DIANTEIRA PARA VEÍCULOS BAJA**. 78 f. 2007. - Universidade de Passo Fundo, [s. l.], 2007.

TAYLOR, Paul Lienert; Norihiko Shirouzu; Edward. **Volkswagen e China lideram investimento global de US\$300 bi em carros elétricos**. [S. l.]: Thompson Reuters, 2019. Disponível em: <https://br.reuters.com/article/dassaultuk/idBRKCN1P42JM-OBRIN>

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física para Cientistas e Engenheiros Vol 1**. 6. ed. [S. l.]: LTC, [s. d.].

ANEXO A – Código de programação da bancada

```

#include <LiquidCrystal_I2C.h> //Biblioteca para o display
#include <EmonLib.h> //Biblioteca para o sensor de corrente
#include <Wire.h> //Biblioteca para o display
#include <SPI.h> //Biblioteca para o display
#include <SD.h> //Biblioteca para o gravador SD
#include <Ultrasonic.h> //Biblioteca para o sensor ultrasonico
#define pino_trigger 46 //Declaracao do pino do sensor ultrasonico
#define pino_echo 47 //Declaracao do pino do sensor ultrasonico
#define PINO_PWM 3 //Pino do Arduino que terá a ligação para o driver de motor
(ponte H) L298N
#define TEMPO_NA_MESMA_VELOCIDADE 250 //Tempo (ms) em que o motor
ficara na mesma velocidade
#define TEMPO_NA_VELOCIDADE_MAXIMA 1000 //Tempo (ms) em que o
motor ficara na velocidade maxima
#define pino_Contador 7 //Define o pino do contador do encoder
#define VOLT_CAL 600 //VALOR DE CALIBRAÇÃO (DEVE SER AJUSTADO
EM PARALELO COM UM MULTÍMETRO)
int CS = 53; //Declaracao do pino CS do gravador SD
int t = 0; //Declaracao da variavel t
int contador = 0; //Declaracao da variavel contador
int var = 1; //Declaracao da variavel var
int pino_sct = A15; //Declaracao da variavel pino_sct do sensor de corrente nao
invasivo
int RPM = 0;
int timeold = 0;
int Nome = 0;
int valor_pwm = 170; //Variavel que armazena o valor do PWM (0..255 -> 0%..100%
da rotação do motor)
volatile byte pulsos;

```

Ultrasonic ultrasonic(pino_trigger, pino_echo); //Declaracao dos pino conectados ao sensor ultrasonico

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE); //Declaracao dos pinos conectados ao display lcd

File arq; //Declaracao do arquivo de gravacao do SD

EnergyMonitor emon1; //Declaracao da variavel do sensor de corrente

void setup() {

Serial.begin(9600);

emon1.voltage(1, VOLT_CAL, 1.7); //PASSA PARA A FUNÇÃO OS PARÂMETROS (PINO ANALÓGICO / VALOR DE CALIBRAÇÃO / MUDANÇA DE FASE)

emon1.current(pino_sct, 60.606); //Pino, calibracao - Cur Const= Ratio/BurdenR.
2000/33 = 60

pinMode(pino_Contador, INPUT); //Declara pino do contador como uma entrada

pinMode(PINO_PWM, OUTPUT); //Configura como saída o pino que terá a ligação para o driver de motor (ponte H) L298N

analogWrite(PINO_PWM, 0); //Configura o pino com sinal 0

pinMode (CS, OUTPUT); //Configura o CS como pino de saída

//Inicializa o display

lcd.begin (16, 2); // Inicializa o display LCD 16x2

lcd.setBacklight(HIGH); // Liga a luz de fundo do LCD

//Configura pre definicoes do lcd

lcd.clear(); //Limpa a tela

lcd.setCursor(0, 0); //Determina o local de inicio da escrita

lcd.print("Inicio analise"); //Escreve o texto

delay(2500); //Delay para leitura

lcd.clear(); //Limpa a tela

SD.begin(); //Inicia carta SD

//Configuracao para checagem do start correto do SD

if (SD.begin())

{

lcd.setCursor(0, 0);

```
    lcd.print("SD Inicializado");
    delay(5000);
    lcd.clear();
}

else
{
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Falha na");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("inicializacao");
    delay(5000);
}

//Cria um novo arquivo para registro das informacoes
arq = SD.open("TCC2.txt", FILE_WRITE);

if (arq) {
    lcd.print("Criado .txt");
    delay(5000);
    lcd.clear();
}
else {
    while (t < 100000) {
        lcd.print("Erro ao criar");
    }
}
}

void loop() {
    if (t < 1) {
        switch (var)
        {
```

```

case 1:
    lcd.print("Coleta Dados");
    Passo1 ();
    break;
case 2:
    lcd.print("passo2");
    Passo2 (); // Passo de aceleracao do motor
    break;
}
} else
    Passo2();
}

//Passo de aceleracao do motor
void Passo1 ()
{
    if (t < 1) {
        lcd.clear(); //Limpa a tela
        lcd.setCursor(0, 0); //Determina o local de inicio da escrita
        lcd.print("Acelerando o"); //Escreve o texto
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("motor.");
        delay(2500); //Delay para leitura
        lcd.clear(); //Limpa a tela
        float cmMsec; //Configuracao da unidade de medida do sensor ultrasonico
        long microsec = ultrasonic.timing(); //Configuracao de tempo do sensor ultrasonico
        cmMsec = ultrasonic.convert(microsec, Ultrasonic::CM);
        double Irms = emon1.calcIrms(1500); //Variavel que armazena o valor de corrente
em Amperes
        emon1.calcVI(17, 2000); //FUNÇÃO DE CÁLCULO (17 SEMICICLOS, TEMPO
LIMITE PARA FAZER A MEDIÇÃO)

```

```
float supplyVoltage = (emon1.Vrms)/23; //VARIÁVEL RECEBE O VALOR DE
TENSÃO RMS OBTIDO
```

```
float P = supplyVoltage * (Irms); //Variavel que armazena o valor de potencia em
Watts
```

```
int rpm = 0;
```

```
unsigned int pulsos_por_volta = 2;
```

```
timeold = 0;
```

```
int contador; //Declaracao da variavel contador
```

```
analogWrite(PINO_PWM, 200);
```

```
//Aumento de velocidade
```

```
do
```

```
{
```

```
  valor_pwm++;
```

```
  if (digitalRead(pino_Contador) == HIGH && ((millis() - timeold) <= 6000)) {
```

```
    contador = contador + 1;
```

```
    delay(10);
```

```
  }
```

```
  arq.print("Tempo: ");
```

```
  arq.println(millis());
```

```
  arq.print(" ");
```

```
  arq.print("Tensao: ");
```

```
  arq.println(supplyVoltage);
```

```
  arq.print(" ");
```

```
  arq.print("Corrente: ");
```

```
  arq.println(Irms/1388);
```

```
  arq.print(" ");
```

```
  arq.print("Potencia: ");
```

```
  arq.println(P);
```

```
  arq.print(" ");
```

```
  long microsec = ultrasonic.timing(); //Configuracao de tempo do sensor
```

```
ultrasonico
```

```

float cmMsec; //Configuracao da unidade de medida do sensor ultrasonico
cmMsec = ultrasonic.convert(microsec, Ultrasonic::CM);
arq.print("Distancia em cm: ");
arq.println(cmMsec);
arq.print(" ");
analogWrite(PINO_PWM, valor_pwm);
delay(TEMPO_NA_MESMA_VELOCIDADE);
arq.print("POT enviada: ");
arq.println(valor_pwm);
arq.print(" ");
//Atualiza contador a cada segundo
if (millis() - timeold >= 6000)
{
    //Desabilita interrupcao durante o calculo
    detachInterrupt(0);
    rpm = 10 * contador;
    timeold = millis();
    contador = 0;
    arq.print("RPM encoder: ");
    arq.println(rpm);
    arq.print(" ");
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("RPM: ");
    lcd.setCursor(5, 0);
    lcd.print(rpm);
    attachInterrupt(0, contador, FALLING);
}
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("POT enviado: ");
lcd.setCursor(13, 1);
lcd.print(valor_pwm);

```

```

} while (valor_pwm < 255);

//Redução de velocidade
do
{
float cmMsec; //Configuracao da unidade de medida do sensor ultrasonico
long microsec = ultrasonic.timing(); //Configuracao de tempo do sensor
ultrasonico
cmMsec = ultrasonic.convert(microsec, Ultrasonic::CM);
double Irms = emon1.calcIrms(1500); //Variavel que armazena o valor de corrente
em Amperes
emon1.calcVI(17, 1500); //FUNÇÃO DE CÁLCULO (17 SEMICICLOS,
TEMPO LIMITE PARA FAZER A MEDIÇÃO)
float supplyVoltage = (emon1.Vrms)/23; //VARIÁVEL RECEBE O VALOR DE
TENSÃO RMS OBTIDO
float P = supplyVoltage * (Irms); //Variavel que armazena o valor de potencia em
Watts

int rpm = 0;
unsigned int pulsos_por_volta = 2;
timeold = 0;
int contador; //Declaracao da variavel contador
valor_pwm--;
if (digitalRead(pino_Contador) == HIGH && ((millis() - timeold) <= 6000)) {
contador = contador + 1;
delay(10);
}
arq.print("Tempo: ");
arq.println(millis());
arq.print(" ");
arq.print("Tensao: ");
arq.println(supplyVoltage);
arq.print(" ");

```



```

    arq.print("Corrente: ");
    arq.println(Irms/1388);
    arq.print(" ");
    arq.print("Potencia: ");
    arq.println(P);
    arq.print(" ");
    //      long microsec = ultrasonic.timing(); //Configuracao de tempo do sensor
ultrasonico
    //      float cmMsec; //Configuracao da unidade de medida do sensor ultrasonico
    cmMsec = ultrasonic.convert(microsec, Ultrasonic::CM);
    arq.print("Distancia em cm: ");
    arq.println(cmMsec);
    arq.print(" ");
    analogWrite(PINO_PWM, valor_pwm);
    delay(TEMPO_NA_MESMA_VELOCIDADE);
    arq.print("POT enviada: ");
    arq.println(valor_pwm);
    arq.print(" ");
    //Atualiza contador a cada segundo
    if (millis() - timeold >= 6000)
    {
        //Desabilita interrupcao durante o calculo
        detachInterrupt(0);
        rpm = 10 * contador;
        timeold = millis();
        contador = 0;
        arq.print("RPM encoder: ");
        arq.println(rpm);
        arq.print(" ");
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("RPM: ");

```

```
    lcd.setCursor(5, 0);
    lcd.print(rpm);
    attachInterrupt(0, contador, FALLING);
  }
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("POT enviado: ");
  lcd.setCursor(13, 1);
  lcd.print(valor_pwm);
  t = t + 1;
} while (valor_pwm >= 185);
}
else
  var = 2; //Envia para passo de finalizacao da analise
  analogWrite(PINO_PWM, 0);
}

void Passo2 () {
  arq.close();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Finalizada a");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("analise");
  delay(5000);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Retire o cartao");
  delay(5000);
  var = 1; //Recomeca ciclo de analises
}
```