

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

CLAYTOM BARBALHO DE ARAUJO  
FABIO KEIJI NAKAJIMA VILLARMOSA  
GUSTAVO SILVA PINTO FUGIHARA  
JOÃO PAULO OLIVEIRA GUERRA  
MARIO FELIPE VASQUES VICENTE  
RAFAEL APARECIDO DA SILVA PERES  
RAYSSA GUIDIA SANTOS CORREA

**RAY:** determinação da influência dos parâmetros construtivos de uma suspensão veicular na capacidade regenerativa de energia com auxílio de uma equação matemática obtida experimentalmente em bancada

São Bernardo do Campo

2023

CLAYTOM BARBALHO DE ARAUJO  
FABIO KEIJI NAKAJIMA VILLARMOSA  
GUSTAVO SILVA PINTO FUGIHARA  
JOÃO PAULO OLIVEIRA GUERRA  
MARIO FELIPE VASQUES VICENTE  
RAFAEL APARECIDO DA SILVA PERES  
RAYSSA GUIDIA SANTOS CORREA

**RAY:** determinação da influência dos parâmetros construtivos de uma suspensão veicular na capacidade regenerativa de energia com auxílio de uma equação matemática obtida experimentalmente em bancada

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, com ênfase em Mecânica Automobilística. Orientado pelo Prof. Dr. Carlos Rodrigues dos Santos Neto

São Bernardo do Campo

2023

RAY : determinação da influência dos parâmetros construtivos de uma suspensão veicular na capacidade regenerativa de energia com auxílio de uma equação matemática obtida experimentalmente em bancada / Claytom Barbalho de Araújo...[et al.]. São Bernardo do Campo, 2023.

33 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Universitário FEI. Orientador:  
Prof. Dr. Carlos Rodrigues dos Santos Neto.

1. modelo matemático. 2. regeneração de energia. 3. suspensão veicular. I. Barbalho de Araújo, Claytom. II. Keiji Nakajima Villarmosa, Fábio. III. Silva Pinto Fugihara, Gustavo. IV. Paulo Oliveira Guerra, João. V. Felipe Vasques Vicente, Mario. VI. Aparecido da Silva Peres, Rafael. VII. Guidia Santos Correa, Rayssa. VIII. Rodrigues dos Santos Neto, Carlos, orient. IX. Título.

CLAYTOM BARBALHO DE ARAUJO  
FABIO KEIJI NAKAJIMA VILLARMOSA  
GUSTAVO SILVA PINTO FUGIHARA  
JOÃO PAULO OLIVEIRA GUERRA  
MARIO FELIPE VASQUES VICENTE  
RAFAEL APARECIDO DA SILVA PERES  
RAYSSA GUIDIA SANTOS CORREA

**RAY:** determinação da influência dos parâmetros construtivos de uma suspensão veicular na capacidade regenerativa de energia com auxílio de uma equação matemática obtida experimentalmente em bancada

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel Engenharia Mecânica com ênfase em Automobilística.

Comissão julgadora

---

Orientador e presidente

---

Examinador (1)

---

Examinador (2)

São Bernardo do Campo

2023

Este trabalho é dedicado a todos que nos ajudaram de alguma forma, desde as nossas famílias até aos nossos professores e mentores da FEI que nos auxiliaram na germinação das ideias e durante todo o processo de desenvolvimento deste projeto.

## AGRADECIMENTOS

A partir da seguinte frase: “*Nós, sozinhos, não podemos fazer nada*” do chanceler Oswaldo de Castro Aranha, damos início aos nossos agradecimentos.

Agradecemos ao nosso coordenador, o Professor Me. Marco Barreto por ter aceitado acompanhar nosso grupo no desenvolvimento deste projeto. O seu empenho foi essencial para a nossa evolução e motivação à medida que as dificuldades foram surgindo ao longo do percurso.

Queremos expressar gratidão também ao orientador do nosso Trabalho de Conclusão de Curso, Professor Doutor Carlos Rodrigues Neto, cuja dedicação e atenção foram imprescindíveis para superar os desafios desta jornada.

Queremos registrar também a nossa gratulação ao corpo discente do curso de Engenharia Mecânica com Ênfase em Automobilística, e todos que trabalham diretamente e indiretamente na capacitação, desenvolvimento e aprendizagem de todos os alunos.

“Quando algo é importante o suficiente, você realiza, mesmo que as chances não estejam a seu favor.”

Elon Musk

## RESUMO

Com o avanço das tecnologias os padrões de megatendências sofrem transformações de longo prazo que moldam o futuro de diversas áreas e maneiras, como economia, sociedade e meio ambiente. São influenciadas por uma variedade de fatores como, avanços tecnológicos, mudanças demográficas, comportamentais e culturais, além de grandes desafios globais, como mudanças climáticas e escassez de recursos. As principais megatendências têm se destacado com tecnologia avançada, urbanização, sustentabilidade, mudanças climáticas, saúde e bem-estar, globalização, dentre muitos outros. Após reconhecer estas mudanças mundiais, e com a ideia de dar sequência a um projeto chamado BERS, assim surge o projeto RAY. O BERS é um sistema que converte o deslocamento vertical linear da suspensão em movimento rotativo, com objetivo de rotacionar o eixo de um gerador elétrico, e que através de um gerenciador de demandas, possibilitará o alívio da carga que o alternador exige do motor, resultando em redução de consumo e emissões. O projeto RAY é a criação de um modelo matemático capaz de apreçoar os melhores cenários e os principais componentes que podem ser modificados para garantir os maiores níveis de geração de energia elétrica regenerativa. Pensando em um futuro próspero e de longo prazo, essa seria uma das principais tendências de geração de energia elétrica regenerativa que poderá ser instalada em suspensões veiculares, e para que isso aconteça a bancada do projeto BERS foi cedida pelo Prof. Dr. Carlos Rodrigues dos Santos Neto, para que, após feitas as devidas modificações necessárias, fosse possível realizar os testes de regeneração de energia elétrica.

Palavras chave: renegeração de energia, suspensão, modelagem matemática.

## **ABSTRACT**

With the advancement of technologies, megatrend patterns undergo long-term transformations that shape the future in different areas and ways, such as economy, society, and the environment. They are influenced by a variety of factors such as technological advances, demographic, behavioral and cultural changes, as well as major global challenges, such as climate change and scarcity of resources. The main megatrends have stood out with advanced technology, urbanization, sustainability, climate change, health and well-being, globalization, among many others. After recognizing these global changes, and with the idea of continuing a project called BERS, the RAY project emerged. BERS is a system that converts the linear vertical displacement of the suspension into a rotary movement, with the aim of rotating the axis of an electrical generator, and which, through a demand manager, will enable the relief of the load that the alternator demands from the engine, resulting in reducing consumption and emissions. The RAY project is the creation of a mathematical model capable of announcing the best scenarios and the main components that can be modified to guarantee the highest levels of regenerative electrical energy generation. Thinking about a prosperous and long-term future, this would be one of the main trends in generating regenerative electrical energy that can be installed in vehicle suspensions, and for this to happen, the BERS project bench was provided by Prof. Dr. Carlos Rodrigues dos Santos Neto, so that, after making the necessary modifications, it would be possible to carry out electrical energy regeneration tests.

**Keywords:** energy regeneration, automotive suspension, mathematical modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Salar de Atacama, norte do Chile.....	16
Figura 2 – eROT (eletromechanical rotary damper) .....	17
Figura 3 – Golden circle .....	19
Figura 4 – Amortecedor <i>GenShock</i> .....	20
Figura 5 – Amortecedor adaptado para regeneração por indução.....	21
Figura 6 – Sistema de regeneração mecânico.....	21
Figura 7 – <i>Storyboard</i> .....	24
Figura 8 – <i>Boundary diagram</i> .....	25
Figura 9 – <i>P-diagram</i> .....	28
Figura 10 – Canvas de projeto.....	31
Figura 11 – Canvas de projeto.....	32
Figura 12 – <i>Business model canvas</i> .....	33
Figura 13 – <i>Business model canvas</i> .....	34
Figura 14 – Bancada de teste com dispositivo BERS .....	35
Figura 15 – Gerador elétrico.....	35
Figura 16 – Especificações técnicas LVDT Penny+Giles MLS130/150/R/N.....	37
Figura 17 – LVDT .....	37
Figura 18 – Strain gauge.....	38
Figura 19 – Célula de carga.....	39
Figura 20 – Amplificador universal HBK QuantumX MX840A .....	39
Figura 21 – Diagrama de instalação do LVDT.....	40
Figura 22 – Diagrama de instalação strain gauge e célula de carga .....	40
Figura 23 – Identificação dos .....	41
Figura 24 – Identificação da funcionalidade de cada pino do conector .....	41
Figura 25 – Esquema hidráulico .....	42
Figura 26 – Bancada Vickers .....	43
Figura 27 – Atuador tipo MS2.....	43
Figura 28 – Esquema da válvula Parker .....	44
Figura 29 – Válvula da Parker.....	44
Figura 31 – Dados para simulação e geração de gráficos.....	52

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Matriz de decisão.....	23
Quadro 2 – Engenharia reversa .....	26
Quadro 3 – Engenharia reversa .....	26
Quadro 4 – Análise de valor .....	27
Quadro 5 - Análise de valor.....	27
Quadro 6 – DFMEA .....	30
Quadro 7 – DFMEA .....	30

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Matriz energética total do mundo.....	11
Gráfico 2 – Projeção de vendas até 2036 de veículos elétricos.....	12
Gráfico 3 – Projeção de vendas de veículos elétricos e híbridos no Brasil de .....	13
Gráfico 4 – Fontes de eletricidade no mundo.....	14
Gráfico 5 – Reservas mundiais de lítio - 2022 .....	15
Gráfico 6 – Dispersão.....	52
Gráfico 7 – <i>Heatmap</i> .....	53
Gráfico 8 – <i>Residuals vs leverage</i> .....	54
Gráfico 9 – <i>Q-Q residuals</i> .....	55
Gráfico 10 – <i>Residuals vs fitted</i> .....	56

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DE VIABILIDADE .....</b>	<b>18</b>
2.1	PROBLEMA .....	18
2.2	PROPÓSITO E GOLDEN CIRCLE .....	18
2.3	REQUISITOS DO PROJETO.....	19
2.4	BENCHMARKING .....	19
<b>2.4.1</b>	<b>Sistema de regeneração hidráulico .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Sistema de regeneração por indutor eletromagnético .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Sistema de regeneração mecânico.....</b>	<b>21</b>
2.5	MATRIZ DE DECISÃO .....	22
2.6	BERS (BUS ENERGY RECOVERY SYSTEM).....	23
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE ENGENHARIA .....</b>	<b>24</b>
3.1	STORYBOARD .....	24
3.2	BOUNDARY DIAGRAM .....	<b>25</b>
3.3	ENGENHARIA REVERSA .....	25
3.4	ANÁLISE DE VALOR - FAST .....	27
3.5	P-DIAGRAM .....	28
3.6	DFMEA .....	28
3.7	CANVAS DE PROJETO .....	31
3.8	SCAMPER .....	32
3.9	BUSINESS MODEL CANVAS .....	33
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO MODELO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>35</b>
4.1	LVDT .....	36
4.2	STRAIN GAUGE E CÉLULA DE CARGA .....	37
4.3	SISTEMA HIDRÁULICO .....	41
4.4	ENSAIO .....	44
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>45</b>
5.1	LINGUAGEM R .....	45
5.2	MÉTODO DO MÍNIMO QUADRADO (MMQ).....	45
5.3	REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA.....	47
5.4	MÉTODO STEPWISE.....	47

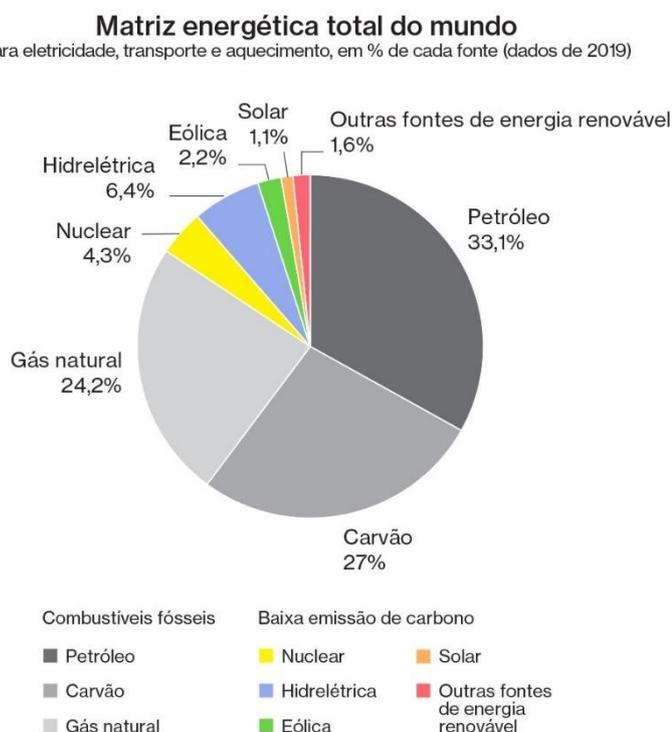
5.5	TESTE F.....	48
5.6	INTERVALO DE CONFIANÇA .....	49
5.7	P-VALUE.....	50
5.8	OVERFITTING .....	51
5.9	GRÁFICOS .....	51
<b>5.9.1</b>	<b>Dispersão .....</b>	<b>52</b>
<b>5.9.2</b>	<b><i>Heatmap</i>.....</b>	<b>53</b>
<b>5.9.3</b>	<b><i>Residuals vs leverage</i> .....</b>	<b>53</b>
<b>5.9.4</b>	<b><i>Q-Q Residuals</i> .....</b>	<b>54</b>
<b>5.9.5</b>	<b><i>Residuals vs Fitted</i> .....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos tempos, a indústria automobilística tem mostrado uma tendência crescente em direção ao aumento da eficiência energética. Essa mudança é motivada por diversos fatores, incluindo preocupações ambientais, regulamentações mais rigorosas de emissões, a busca por maior autonomia em veículos elétricos e o interesse em reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

De acordo com o Millena Brasil (2022), durante o ano de 2022, mais de 40,6 bilhões de toneladas de gás carbônico foram emitidos na atmosfera, 1% a mais que no ano de 2021 e o dobro emitido em 1990. Dos 40,6 bilhões, cerca de 7,31 bilhões de toneladas (18%) provém dos veículos automotores. Liz Matsunaga (2022), relata em uma pesquisa realizada que, em 2019, a matriz energética utilizada para eletricidade, transporte e aquecimento, tem como principal fonte, combustíveis fósseis, representando 84,3%, dos quais, em ordem crescente, tem-se 24,2% de gás natural, 27% carvão e 33,1% de petróleo. A energia renovável representa apenas 15,7% da matriz energética mundial, conforme mostra o Gráfico 1 a seguir:

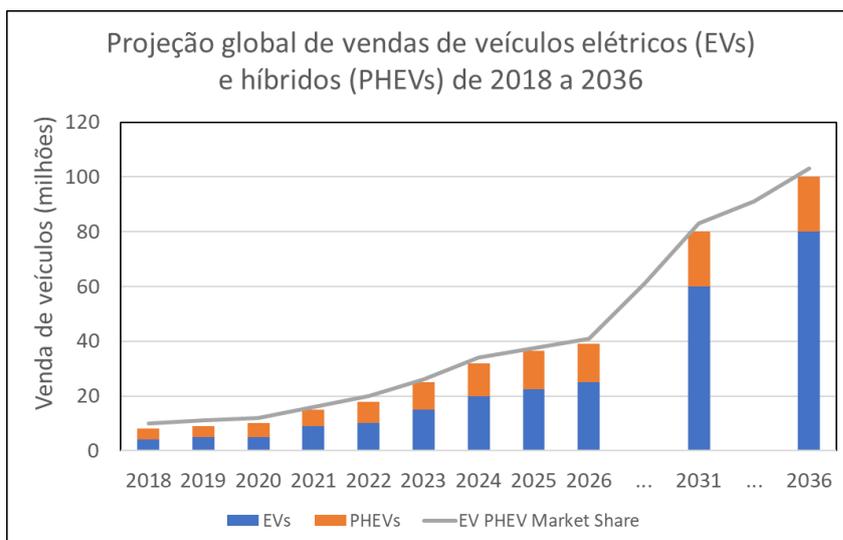
Gráfico 1 – Matriz energética total do mundo



Fonte: Por que?, 2022

De acordo com uma estimativa da Global Data (2022), um *forecast* realizado no ano de 2022 evidencia o crescimento exponencial dos veículos elétricos e híbridos, atingido uma frota de mais de 24 milhões de veículos eletrificados por ano para a casa dos 100 milhões em 2036 como mostra o Gráfico 2 a seguir:

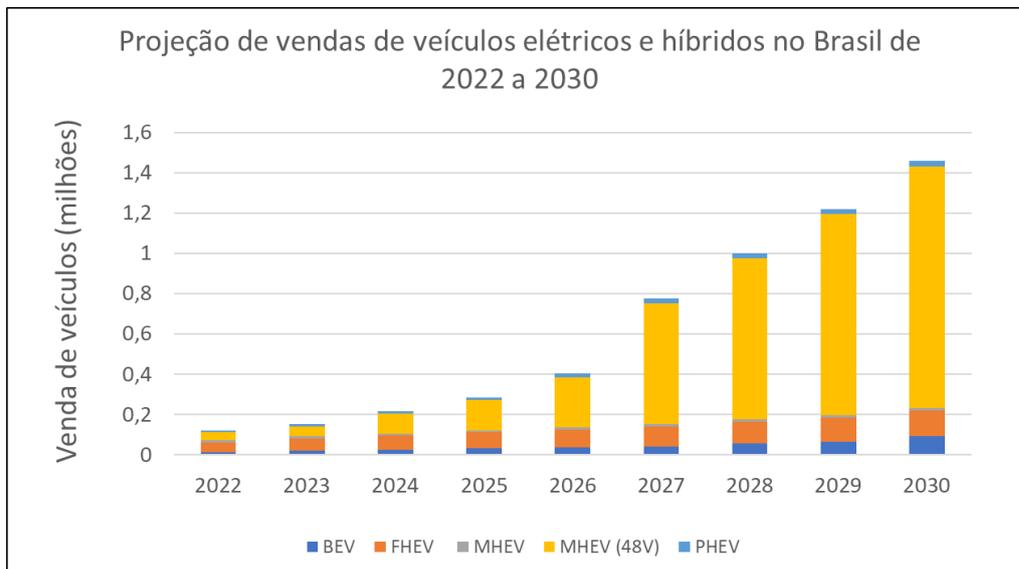
Gráfico 2 – Projeção de vendas até 2036 de veículos elétricos e híbridos



Fonte: Autores “adaptado de” GlobalData, 2022

No caso do Brasil, o crescimento é proporcional ao global, com um número aproximado de 126 mil veículos vendidos no ano de 2022, para um volume de venda aproximada de 1,45 milhões de veículos eletrificados no ano de 2030, sendo este, um número extremamente expressivo para a indústria automobilística. O Gráfico 3 seguir evidencia a projeção de vendas de veículos no Brasil até 2030:

Gráfico 3 – Projeção de vendas de veículos elétricos e híbridos no Brasil de 2022 a 2030



Fonte: Autores “adaptado de” Global Data, 2022

No texto de Robert Hart (2022), o autor afirma que no mundo há cerca de 8,04 bilhões de pessoas e segundo estudos da ONU, a população terá números aproximados de 8,5 bilhões em 2030; 9,7 bilhões em 2050 e atingirá um pico de cerca de 10,4 bilhões durante a década de 2080, permanecendo neste nível até 2100. Tendo em vista essas informações, há de se questionar a logística deste volume populacional e nos impactos ambientais que poderão existir para atender tamanha demanda. Com o crescimento da população mundial e a notável presença dos transportes rodoviários, normas e regulamentos são definidos a fim de minimizar os respectivos impactos ambientais. A indústria automobilística tem desafios cada vez maiores para se manter competitiva, ter um preço adequado ao consumidor final atendendo à todas as novas exigências de normas e regulamentos. A pauta principal é o aumento de eficiência, ou, em palavras resumidas, percorrer distâncias cada vez maiores com quantidades de energia cada vez menores, seja essa energia provinda diretamente de combustíveis fósseis ou fontes renováveis.

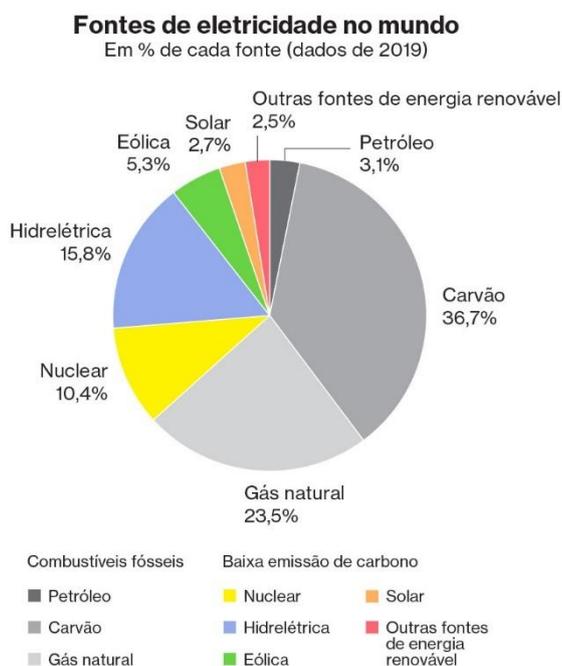
A crescente frota de veículos elétricos tem sido uma das principais estratégias para aumentar a eficiência energética na indústria automobilística. Estes veículos, por sua vez, geralmente têm maior eficiência energética em comparação com veículos à combustão, pois convertem uma porcentagem significativamente maior da energia elétrica da bateria em movimento. Além disso, alguns veículos elétricos e híbridos já contam com tecnologias de recuperação de energia a partir da frenagem, que reaproveitam a energia que normalmente seria

dissipada durante a desaceleração, aumentando assim a eficiência geral do veículo. Outra tecnologia também implantada nos veículos dos últimos tempos, são os sistemas avançados de gerenciamento de energia, automação e conectividade para otimizar o desempenho. Isso inclui tecnologias que ajustam dinamicamente a eficiência do motor com base em condições de condução em tempo real.

Na engenharia de alto nível, os projetos são desenvolvidos com materiais mais leves, como por exemplo, ligas de alumínio e fibra de carbono, que reduzem a massa final do veículo e conseqüentemente, o consumo de energia. Os designs são mais aerodinâmicos, que resulta em menor resistência do ar e maior economia de combustível.

Nas baterias, há um constante desenvolvimento guiado para aumentar cada vez mais a autonomia dos veículos elétricos. Nesta vertente, pesquisas na área de armazenamento de energia estão focadas em baterias mais leves, mais eficientes e de maior capacidade. É importante salientar que a fonte de eletricidade no mundo é composta em 63,3% a partir de combustíveis fósseis, sendo 3,1% do petróleo, 23,5% do gás natural e 36,7% do carvão natural, conforme aponta Liz Matsunaga (2022). O Gráfico 4 a seguir, mostra as fontes de eletricidade no mundo.

Gráfico 4 – Fontes de eletricidade no mundo



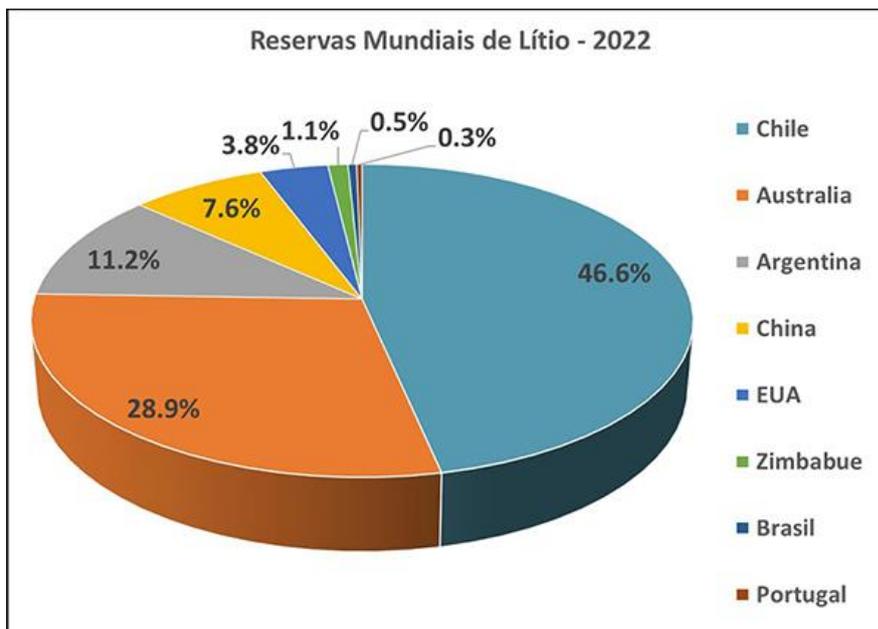
Fonte: Por que?, 2022

Apesar dos veículos elétricos apresentarem eficiência energética superior comparado aos híbridos e à combustão, a fonte de energia elétrica é, em grande parte, altamente poluente.

O segundo contraponto da bateria é a extração de lítio significativamente danosa ao meio ambiente. O lítio tem sido denominado o “O novo Ouro mundial”, porque sua aplicação vai além das baterias automotivas, atingido praticamente, qualquer dispositivo ou recurso que tenha demanda por energia elétrica para seu funcionamento, como por exemplo, *smartphones*, *notebooks* e *tablets*.

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2023) Atualmente, 95% das reservas de lítio estão no Chile (46,6%), Austrália (28,9%), Argentina (11,2%) e China (7,6%), conforme mostra o Gráfico 5 a seguir:

Gráfico 5 – Reservas mundiais de lítio - 2022



Fonte: Serviço Geológico do Brasil 2022

Na redação de Um Só Planeta (2022), relata-se que a extração de lítio é poluente porque contamina o ar e as reservas subterrâneas de água subterrâneas, comprometendo também o acesso a estes recursos naturais, principalmente para agricultores e comunidades da região. A Figura 1 a seguir mostra as piscinas escavadas nas salinas do Salar de Atacama, norte do Chile.

Figura 1 – Salar de Atacama, norte do Chile



Fonte: Um Só Planeta, 2022

A coloração destas piscinas ocorre pelas diferentes concentrações de sais e outros elementos químicos como, cálcio, magnésio e potássio.

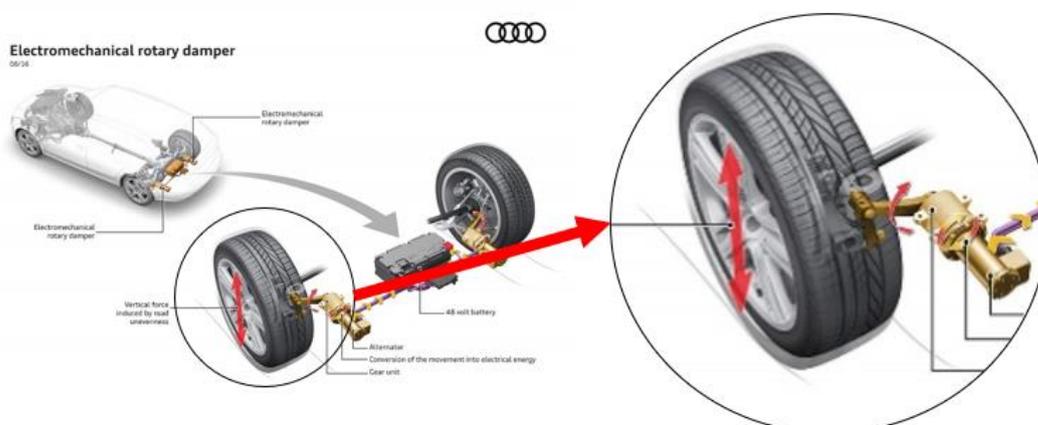
A crescente demanda mundial pelo lítio somada às regulamentações ambientais mais recentes podem fomentar não só uma crise mineral, como também, um paradoxo das soluções “verdes”, uma vez que não tem sido considerado nas pautas, toda a cadeia produtiva e seus respectivos impactos.

Contextualizando, o cenário mundial atual apresenta busca incessante por soluções mais verdes, crescentes eficiências energéticas nos mais variados setores e principalmente, no da mobilidade, alternativas para reduzir ou mitigar a emissão de gases poluentes e neste percurso, a atuação da engenharia mecânica abre inúmeros caminhos possíveis. Tratando-se de eficiência energética global, o veículo elétrico atual tem de 40% até 90% de eficiência em média, enquanto um veículo à combustão atinge valores entre 16% até 35%. O resto da energia é dissipada pelos sistemas do carro como freios, suspensões, aerodinâmica, transmissão, motor etc. por meio de atritos, calor e demais perdas mecânicas. A indústria automobilística vem trabalhando em estudos, pesquisas e desenvolvimento de tecnologias a fim de reduzir perdas ou recuperar parte da energia dissipada, como por exemplo, nos veículos à combustão, a inserção do turbo compressor, alterações em comandos de válvulas, bicos injetores mais precisos, softwares de câmbio, softwares de controle da ECU (*Electronic Control Unit*) e nos veículos elétricos, o

destaque é na ECU, que otimiza o gasto energético a partir leitura de dados em tempo real dos sensores e no freio regenerativo. Há oportunidades a serem exploradas no desenvolvimento de um veículo para recuperar energia e das alternativas citadas anteriormente, destaca-se a suspensão, cujo elemento é comum a qualquer tipo de veículo, seja elétrico, híbrido ou à combustão; de passeio ou comercial. Independente das características construtivas, dos tipos ou da aplicação, o objetivo da suspensão é o mesmo em qualquer veículo, realizar a absorção de energia provinda das irregularidades do terreno onde se trafega e pelas transferências de cargas laterais e longitudinais ao acelerar, frear e realizar curvas; cuja energia seria propagada para toda a estrutura veicular além do motorista e dos passageiros. É possível notar a dimensão da quantidade energia que é absorvida pela suspensão.

Neste caminho, a Audi desenvolveu um sistema de amortecimento capaz de gerar energia a partir do movimento oscilatório do amortecedor, denominado de eROT, cujo significado é *electromechanical rotary damper*, ou amortecedor rotativo eletromecânico. Trata-se de um motor elétrico de 48 volts instalado horizontalmente. Segundo a reportagem de Hugo Santos (2016), a montadora afirma ser possível poupar 0,7 litros de combustível a cada 100 quilômetros e redução de 3 gramas de CO<sub>2</sub> por quilômetro percorrido, pois é possível gerar de 3 W a 613 W e a média de geração é por volta de 100 a 150 W, diz Henrique Rodriguez (2016). Essa potência gerada permite reduzir a dependência do alternador do motor. A Figura 2 a seguir evidencia o eROT.

Figura 2 – eROT (eletromecanical rotary damper)



Fonte: Autores “adaptado de” Quatro Rodas, 2016

Baseado nas informações destacas anteriormente, este trabalho será desenvolvido na possibilidade do potencial de regeneração de energia a partir do amortecedor.

## 2 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Os tópicos a seguir irão abordar a análise de viabilidade do projeto em questão. Primeiramente foi identificado um problema e em seguida definido o propósito. A visão geral do projeto segue a estrutura do “*Golden Circle*”, começando pela resposta ao "por quê". Explora-se a motivação fundamental e os benefícios mais amplos que o projeto almeja alcançar, analisando-se o "como" e o "o quê", abordando as estratégias e as ações específicas que serão implementadas para atingir os objetivos propostos. O *benchmarking* apoiará nas comparações no desempenho e resultados de soluções utilizadas pela indústria ou de projetos similares. Esse processo fornece *insights* valiosos, identifica oportunidades de melhoria e ajuda a manter o projeto em sintonia com as melhores práticas do setor.

### 2.1 PROBLEMA

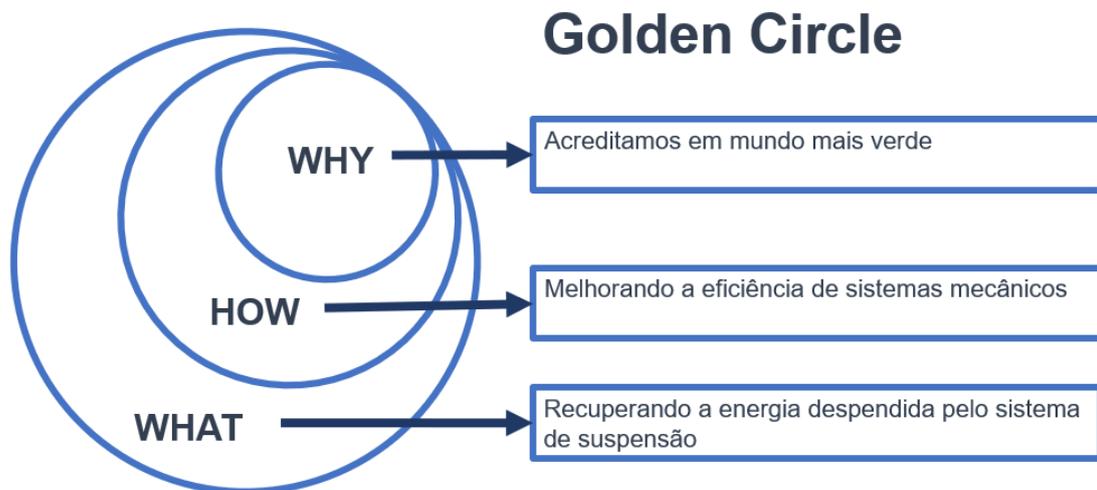
Tendo em vista a eficiência energética global de um veículo, notou-se que, parte da energia é perdida pelo trabalho realizado pela suspensão, devido à fatores relacionados à própria dinâmica veicular, como por exemplo, as transferências de carga longitudinal e lateral, assim como irregularidades no terreno ao qual se trafega.

### 2.2 PROPÓSITO E GOLDEN CIRCLE

A partir do problema identificado e citado anteriormente, o propósito definido para este trabalho é recuperar a energia dissipada pelo trabalho da suspensão. Para isso, o sistema de suspensão é composto por diversos elementos como mola, braços e suas características de apoio e geometria, barra de torção, entre outros; sendo o ponto focal, estudar, compreender e analisar as características inerentes do amortecedor.

A motivação e a clareza do desenvolvimento deste trabalho partem do uso da ferramenta Golden Circle, como mostra a Figura 3 a seguir:

Figura 3 – Golden circle



Fonte: Autores

### 2.3 REQUISITOS DO PROJETO

Para definição dos requisitos do projeto, foram consideradas a potência regenerada, o custo do equipamento, a massa do conjunto e a quantidade de componentes. Desta forma, tem-se como requisitos:

- a) quantidade de energia regenerada;
- b) peso;
- c) eficiência do sistema;
- d) quantidade de componentes.

### 2.4 BENCHMARKING

Analisando os sistemas disponíveis no mercado e objetos de estudo da regeneração de energia a partir do trabalho do amortecedor, obtém-se sistemas hidráulicos, sistemas eletromecânicos e sistemas mecânicos, aos quais serão detalhados e comparados nos tópicos a seguir.

### 2.4.1 Sistema de regeneração hidráulico

O princípio de funcionamento do sistema hidráulico de regeneração é a atuação do amortecedor em compressão e expansão, que faz com que o fluido na linha gire as pás do rotor de um motor hidráulico conectado a um gerador. Desta forma, o trabalho do amortecedor é convertido em energia elétrica. De acordo com a dissertação de João Ferreira (2013), a suspensão regenerativa hidráulica da *LevantPower* desenvolvida por estudantes do MIT, Zack Anderson e Shakeel Avadhany denominada de *GenShock* é capaz de produzir energia por volta de 2 MJ com um curso de trabalho de 9 centímetros. A Figura 4 a seguir mostra a *GenShock*.

Figura 4 – Amortecedor *GenShock*

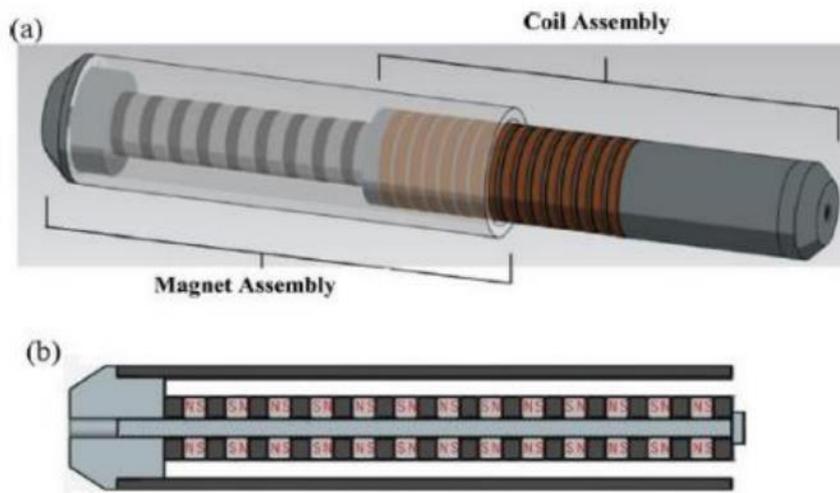


Fonte: Hypescience, 2009

### 2.4.2 Sistema de regeneração por indutor eletromagnético

Este sistema de amortecedor pode ser apresentado de duas formas diferentes, ou o projeto nasce com este propósito ou amortecedores convencionais são adaptados para atender essa demanda. Nas hastes do amortecedor contém ímãs permanentes e no corpo há bobinas de fio de cobre. Com o movimento oscilatório do amortecedor, uma conturbação é gerada no campo magnético provocando o fluxo de elétrons e, conseqüentemente, gerando corrente elétrica. Esse sistema exige a atuação de inversor de frequência com a finalidade de converter a corrente alternada em corrente contínua para carregamento da bateria. A Figura 5 a seguir, exemplifica o amortecedor adaptado para regeneração por indução eletromagnética.

Figura 5 – Amortecedor adaptado para regeneração por indução eletromagnética

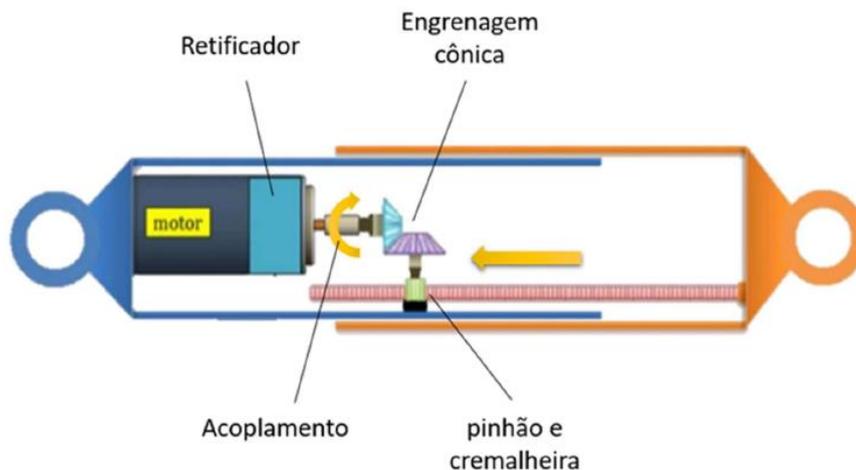


Fonte: Autores “adaptado de” João Ferreira, 2013

### 2.4.3 Sistema de regeneração mecânico

De todos os sistemas apresentados anteriormente, o sistema mecânico é o menos complexo. Basicamente, utiliza de um conjunto mecânico de transmissão de cremalheira fixa e um pinhão conectado a um eixo composto por dois rolamentos de contra recuo cuja finalidade é manter a rotação do gerado elétrico sempre no mesmo sentido. O uso destes componentes dispensa a necessidade de um inversor de frequência. A Figura 6 a seguir mostra o sistema de regeneração mecânico.

Figura 6 – Sistema de regeneração mecânico



Fonte: Douglas Almeida et.al, 2018

## 2.5 MATRIZ DE DECISÃO

A matriz de decisão é uma ferramenta que apoiará, a partir dos sistemas de regeneração avaliados, os respectivos pontos positivos e negativos, qual melhor atenderá aos critérios estabelecidos para o desenvolvimento deste trabalho. Os critérios definidos são:

- a) capacidade de geração de energia;
- b) custo;
- c) massa adicionada;
- d) número de componentes;
- e) dinâmica veicular.

Para apoiar na matriz de decisão, utilizou-se o estudo Abdelkareem et. al. (2018). De acordo com os autores, o sistema mecânico como vantagens, tem considerável potencial energético e densidade de potência, alta eficiência na conversão energética, alta precisão de montagem alcançável e o curso depende do comprimento da cremalheira. Como desvantagens tem-se capacidade de transmissão de torque limitado pelo módulo da engrenagem, eixos de entrada e saída perpendiculares entre si e limitados para projetos de grandes espaços, mecanismo difícil de controlar para entrada não uniforme devido à sua não linearidade.

O sistema hidráulico tem como vantagens o alto potencial e densidade de potência para pequenas alterações de curso, alta controlabilidade e durabilidade, pode ser implementado em um veículo com quatro conjuntos de suspensão sendo um modulador comum de geração de energia, pode suportar altas forças e impactos corroborando para ciclo de vida operacional mais longo sem danos comparando-se com outros sistemas e pode ser utilizado para captação de energia em larga escala, como por exemplo, caminhões. Como desvantagens, o sistema pode apresentar problemas de vazamento de óleo, aumento no volume de empacotamento da suspensão, altas perdas de potência no circuito hidráulico, fabricação complexa e alto custo.

O sistema por indutor eletromagnético não necessita de mecanismos de transmissão sendo este integrado de forma fácil e confiável, pode gerar energia no curso de compressão e descompressão, pode obter energia a partir de pequenas velocidades, mais aplicável aos veículos de mercado, fácil de ser fabricado e melhor escolha para se obter um comportamento dinâmico do veículo como suspensão ativa ou semi-ativa. Como desvantagens tem-se que o tamanho ainda é grande devido à velocidade de atuação relativamente baixa, baixa densidade

de potência, campo magnético pode ser afetado pelo ambiente gerando um alto custo de produção para que a força de excitação seja retida no sistema e baixa eficiência de conversão ocasionada pela mudança contínua na direção de atuação gerando altas perdas de potência.

Analisando e ponderando o estudo de Abdelkareem et. al. (2018) com os critérios de seleção e os objetivos deste trabalho, conclui-se que o sistema mais adequado é o mecânico. O Quadro 1 a seguir evidencia o resultado obtido da matriz de decisão.

Quadro 1 – Matriz de decisão

Critérios	Peso	Alternativas		
		Hidráulico	Indutor eletromagnético	Mecânico
Capacidade de Geração de Energia	x3	-	+	+
Custo	x3	-	-	+
Massa Adicionada	x2	-	+	-
Número de Componentes	x2	-	0	+
Dinâmica Veicular	x1	+	0	-
NOTA:	N/A	-9	2	5

Fonte: Autores

## 2.6 BERS (BUS ENERGY RECOVERY SYSTEM)

Douglas Almeida et. al. (2018) realizaram um estudo e pesquisa de um dispositivo denominado de BERS, acrônimo para *Bus Energy Recovery System* ou Sistema de Recuperação de Energia de Ônibus. Este dispositivo utiliza o princípio de atuação citado no tópico anterior de sistema mecânico. O estudo focou na aplicação em veículos pesados, principalmente ônibus e demonstrou potencial de recuperação de energia na ordem de 2,5% da energia necessária para o deslocamento do veículo.

No entanto, não houve aprofundamentos em modelagens matemáticas que caracterizassem a influência dos parâmetros construtivos da suspensão na regeneração de energia, sendo este, o fundamento do desenvolvimento deste presente trabalho.

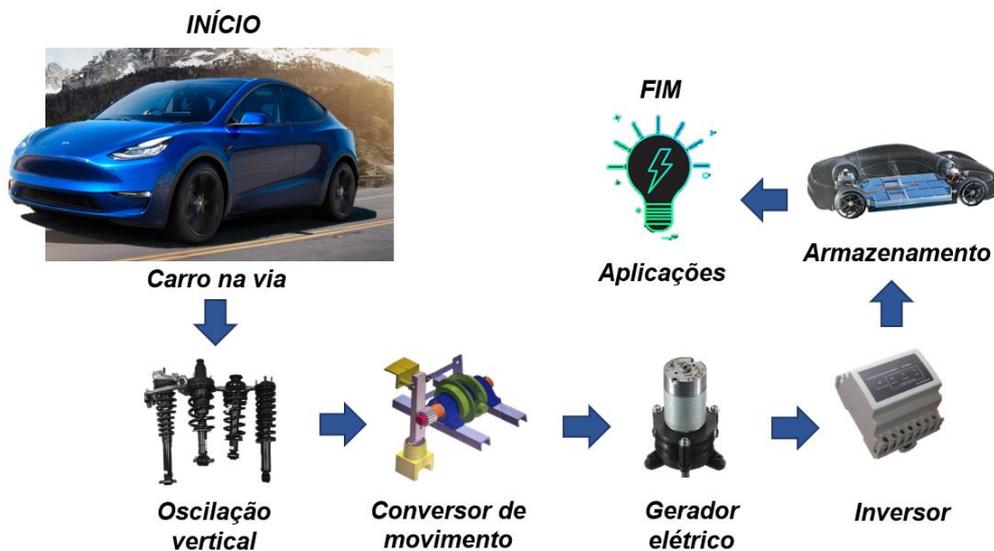
### 3 ANÁLISE DE ENGENHARIA

A análise de engenharia foi baseada em várias ferramentas e métodos, como por exemplo, *Storyboard*, *Boundary Diagram*, Engenharia Reversa e *P-Diagram* que proporcionaram uma compreensão holística do sistema, desde a sequência de eventos até a identificação de variáveis críticas e riscos potenciais. Essa abordagem abrangente contribuiu significativamente para o desenvolvimento assertivo deste trabalho alinhadas com os objetivos e requisitos definidos anteriormente.

#### 3.1 STORYBOARD

O *Storyboard* é uma ferramenta que permite visualizar de forma simplificada a sequência de eventos de um determinado objeto de análise. A Figura 7 a seguir mostra o Storyboard:

Figura 7 – *Storyboard*



Fonte: Autores

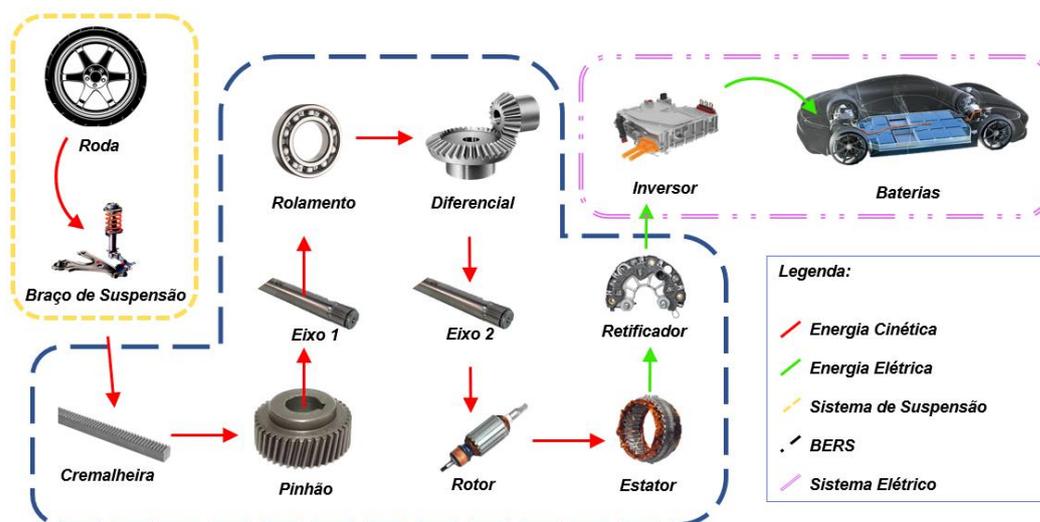
A sequência de eventos é composta por, inicialmente, um veículo que trafega em uma via irregular que irão gerar oscilações verticais na suspensão. Estas oscilações ocorrem porque o conjunto mola amortecedor absorve a energia provida das irregularidades da via. Com um mecanismo de pinhão e cremalheira, o movimento vertical é convertido em rotacional uniaxial para o eixo de um gerador elétrico conectado à um inversor responsável por converter a corrente

alternada em corrente contínua para carregamento da bateria. Com a energia armazenada, poderá ser utilizada em dispositivos que demandem essa matriz energética.

### 3.2 BOUNDARY DIAGRAM

O Boundary Diagram é uma ferramenta que analisa as interfaces de conjuntos, subconjuntos e componentes de cada tipo de interação entre os cada elemento de forma a ilustrar o funcionamento do sistema, sendo a base para a aplicação do DFMEA. A partir da definição das fronteiras do sistema foi possível identificar as interações físicas, a conversão de energia cinética em elétrica e a transmissão de sinal que o dispositivo tem com os demais componentes do veículo. A Figura 8 mostra o *Boundary Diagram* desenvolvido.

Figura 8 – *Boundary diagram*



Fonte: Autores

### 3.3 ENGENHARIA REVERSA

A engenharia reversa é um processo pelo qual um produto, sistema ou software é detalhado minuciosamente para entender seu funcionamento interno e os fundamentos utilizados no desenvolvimento. É realizada com o objetivo de se obter informações sobre como o produto foi pensado, projetado, construído e/ou programado. As ferramentas de “engenharia reversa” podem ser usadas em diversos contextos, incluindo engenharia de software, engenharia eletrônica, engenharia mecânica e muitos outros campos. Na engenharia mecânica, a engenharia

reversa envolve a desmontagem e análise de produtos físicos, como máquinas, peças automotivas ou produtos de consumo. Os engenheiros usam essa técnica para projetar produtos semelhantes, melhorar a eficiência ou reparar itens que possam estar danificados e até mesmo prever em conjunto com outras técnicas de engenharia um estudo para analisar quais peças tem mais probabilidade de serem danificadas por desgastes ou outros critérios de falha. O Quadro 2 e Quadro 3 a seguir mostram a engenharia reversa.

Quadro 2 – Engenharia reversa

Principais componentes que compõem a bacanda de teste	Pinhão	Cremalheira	Eixo	Gerador	Engrenagem cônica
					
Quantidade:	1	1	2	1	2
Preço unitário:	R\$ 40,00	R\$ 60,00	R\$ 130,00	R\$ 210,00	R\$ 175,00
Custo por conjunto montado:	R\$ 40,00	R\$ 60,00	R\$ 130,00	R\$ 210,00	R\$ 350,00
Massa aproximada [KG]:	0,04	2,45	0,27	0,5	0,03
Características:	Engrenagem de dentes retos com modulo 2,5mm	Cremalheira possui comprimento conforme o cursor do amortecimento	Eixo liso usinado	Motor-gerador de tensão nominal de 24v e corrente de 30Ah	Engrenagem cônica com modulo de 1,75mm
Dimensões (mm):	Conforme desenho	Conforme desenho	Conforme desenho	Conforme desenho	Conforme desenho
Material:	Aço	Aço	Aço	Diversos	Aço
Processo de fabricação	Usinagem	Usinagem	Usinagem	Diversos	Usinagem
Fornecedores:	A.T.I Brasil	A.T.I Brasil	A.T.I Brasil	Bosch	A.T.I Brasil

Fonte: autores

Quadro 3 – Engenharia reversa

Principais componentes que compõem a bacanda de teste	Rolamento de contato angular	Mancal	Gerenciador de demanda	Rolamento catrcusado
				
Quantidade:	2	2	1	2
Preço unitário:	R\$ 95,00	R\$ 110,00	R\$ 1.850,00	R\$ 297,00
Custo por conjunto montado:	R\$ 190,00	R\$ 220,00	R\$ 1.850,00	R\$ 594,00
Massa aproximada [KG]:	0,15	1,6	1,15	0,1
Características:	Rolamento utilizado junto ao mancal para permitir a rotação do eixo.	Mancal par eixos de 25mm	Gerenciador de demanda de energia responsável por dividir a solicitação de energia do ônibus entre o sistema estudado e o	Rolamento que permite a rotação em apenas um sentido, no sentido contrário ele gira livre.
Dimensões (mm):	Ø 25	Conforme desenho	145x138x75	Ø 20
Material:	Diversos	Aço	Diversos	Diversos
Processo de fabricação	Diversos	Usinagem	Diversos	Diversos
Fornecedores:	NSK/SKF	Rolimac	CCK	NSK/SKF

Fonte: autores

### 3.4 ANÁLISE DE VALOR - FAST

A análise de valor – FAST (*Function Analysis System Technique*) é uma categorização de funções de cada componente, evidenciando os mecanismos primordiais para serem analisados e cuidadosamente calculados, verifica componentes cujas funções não são relevantes ou se são indesejáveis. Além disso, define se a função do componente é útil ou estética. Diante dessas informações, avalia-se a necessidade de redefinir componentes do produto, com o objetivo de se extrair melhor custo x benefício em a partir da funcionalidade de todo o conjunto. O Quadro 4 e Quadro 5 mostram a análise de valor.

Quadro 4 – Análise de valor

Componente	Função
Amortecedor	Dissipar energia
	Promover conforto
Mola	Sustentar o veículo
	Armazenar e devolver energia
	Manter contato do pneu com o solo
Cremalheira	Oscilar verticalmente
Pinhão	Receber movimento
	Rotacionar
Eixo 1	Transferir movimento
Rolamento	Permitir movimento rotativo
Diferencial	Inibir um dos sentidos de rotação
Eixo 2	Transferir movimento
Gerador Elétrico	Receber movimento
	Gerar energia elétrica
Inversor	Adequar a energia a ser armazenada
Bateria	Armazenar energia

Fonte: Autores

Quadro 5 - Análise de valor

Função	Classificação		
	P/S	R/I/ND	U/E
Oscilar verticalmente	P	R	U
Rotacionar	P	R	U
Armazenar energia	P	R	U
Dissipar energia	P	ND	U
Armazenar e devolver energia	P	R	U
Receber movimento	P	R	U
Transferir movimento	P	R	U
Sustentar o veículo	P	I	U
Manter contato do pneu com o solo	P	I	U
Permitir movimento rotativo	P	R	U
Inibir um dos sentidos de rotação	P	R	U
Gerar energia elétrica	P	R	U
Adequar a energia a ser armazenada	P	R	U

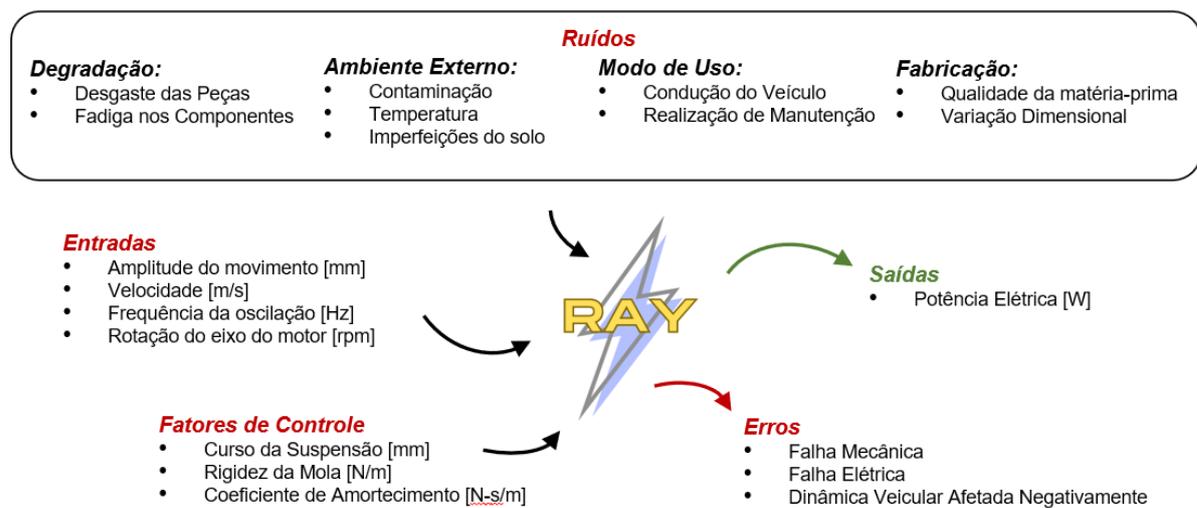
**Legenda:**  
**(P/S) – Função Primária e Secundária**  
  
**(R/I/ND) – Relevante, Irrelevante e Indesejada**  
  
**(U/E) – Uso e Estética**

Fonte: Autores

### 3.5 P-DIAGRAM

O *P-diagram* foi elaborado para analisar os parâmetros do sistema e avaliar os riscos associados a cada variável. Isso fornece uma estrutura para entender as fontes potenciais de variação e garantir que o projeto aborde eficazmente as variáveis críticas que afetam o desempenho ou a qualidade de um produto ou processo. A Figura 9 a seguir ilustra o *P-diagram* desenvolvido.

Figura 9 – *P-diagram*



Fonte: Autores

### 3.6 DFMEA

O DFMEA (*Design Failure Mode and Effects Analysis*) é uma ferramenta sistemática de análise de riscos utilizada na indústria para identificar, avaliar e mitigar potenciais falhas no design de um produto ou processo. Essa abordagem é fundamental para garantir a qualidade, confiabilidade e desempenho desejados em diversos setores. Essa ferramenta é importante porque:

a) atua na prevenção de problemas, pois é uma abordagem proativa que visa prevenir falhas ao antecipar e abordar potenciais problemas durante a fase de design. Isso contribui significativamente para evitar custos e atrasos associados a correções após a implementação;

b) atua como melhoria contínua ao analisar possíveis modos de falha e seus efeitos, permitindo que as equipes identifiquem áreas de aprimoramento e refinem constantemente seus processos e produtos;

c) redução de riscos, pois permite a identificação precoce de potenciais modos de falha permite que as equipes tomem medidas preventivas para reduzir ou eliminar esses riscos antes que impactem o produto.

O DFMEA geralmente envolve uma equipe multidisciplinar que inclui membros de diferentes áreas, como engenharia, manufatura, qualidade e outras partes interessadas relevantes. A equipe lista todos os modos de falha possíveis associados a cada componente, processo ou função do produto. Em seguida, cada modo de falha é avaliado em termos de seus efeitos potenciais no produto ou processo, considerando a severidade desses efeitos. Realiza-se a análises das causas potenciais de cada modo de falha identificadas, bem como a probabilidade de ocorrência dessas falhas. A eficácia dos métodos de detecção existentes para identificar ou prevenir a ocorrência do modo de falha é avaliada. Cada modo de falha é pontuado com base em sua severidade, probabilidade de ocorrência e eficácia de detecção. Essas pontuações ajudam a priorizar as ações corretivas. Com base nas análises, a equipe desenvolve ações corretivas para abordar os modos de falha prioritários e reduzir os riscos associados.

A aplicação eficaz do DFMEA ao longo do ciclo de vida do produto contribui para aprimorar a qualidade, reduzir custos e garantir a conformidade com os requisitos e padrões aplicáveis. O Quadro 6 e o Quadro 7 a seguir evidenciam o DFMEA desenvolvido.

Quadro 6 – DFMEA

Item	Requisito	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(ais) de Falha	Severidade	Classificação	Causa (s) Potencial (ais) de Falha	Controles Prevenção	Ocorrência
Função								
Pinhão e cremalheira	Transformação de movimento linear em rotativo e transmissão de torque	Quebra do pinhão/cremalheira	Falha no sistema de regeneração de energia	8		Baixa resistência mecânica	Dimensionamento correto do pinhão e cremalheira	1
Eixo	Suporte estrutural do sistema e transmissão de torque	Quebra e/ou trinca	Falha no sistema de regeneração	8		Baixa resistência mecânica	Dimensionamento correto do eixo	1
Mancal Bi-partido	Proteção externa dos rolamentos	Quebra do mancal	Falha no sistema de regeneração de energia	8		Rolamento inapropriado	Escolha correta do rolamento	1
Rolamento cônico	Possuir resistência estrutural	Quebra de rolamento	Falha no sistema de regeneração de energia	8		Rolamento inapropriado	Escolha correta do rolamento	1
Rolamento de contra recuo	Sistema que garante a rotação unidirecional do eixo	Falha nos travamentos das engrenagens	Travamento do sistema	8		Rolamento inapropriado	Escolha correta do rolamento quanto a sua funcionalidade	1

Fonte: Autores

Quadro 7 – DFMEA

Item	Controles Detecção	Detecção		Ação Recomendada	Responsabilidade e Data de Conclusão Pretendida	Ações Implementadas		Severidade	Ocorrência	Detecção	NPR
		Detecção	NPR			Data de Conclusão	Implementadas				
Função											
Pinhão e cremalheira	Cálculos analíticos, simulação por MEF e teste em bancada	2	8	Utilizar coeficiente de segurança que garanta a integridade do produto	Grupo RAY	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Eixo	Cálculos analíticos simulação por MEF razoável	2	16	Utilizar coeficiente de segurança que garanta a integridade do produto	Grupo RAY	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Mancal Bi-partido	Teste de bancada	2	16	Utilizar catálogos de rolamentos		NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rolamento cônico	Teste de bancada	2	16	Utilizar catálogos de rolamentos		NA	NA	NA	NA	NA	NA
Rolamento de contra recuo	Teste em bancada	3	24	Utilizar catálogos de rolamentos/mancais confiáveis		Projeto Ray	NA	NA	NA	NA	NA

Fonte: Autores

### 3.7 CANVAS DE PROJETO

O Canvas de Projeto é uma ferramenta importante porque facilita a comunicação de ideias complexas de maneira clara e concisa, promovendo uma compreensão compartilhada entre os membros do projeto envolvido e stakeholders. Além disso, permite iterações rápidas, adaptando-se a novas informações ou insights à medida que o projeto evolui, ajudando a equipe a se manter focada nos elementos chaves do projeto, evitando dispersão de esforço e recursos. A Figura 10 e a Figura 11 a seguir ilustram o Canvas de Projeto.

Figura 10 – Canvas de projeto

<p style="text-align: center;">Justificativas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transportes mais sustentáveis</li> <li>- Melhor eficiência energética</li> </ul>	<p style="text-align: center;">Produto</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Solução de suspensão que reaproveita energia cinética transformando-a em energia elétrica</li> </ul>
<p style="text-align: center;">Objetivos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Solução sustentável que melhora o consumo de combustível aumentando a autonomia</li> </ul>	<p style="text-align: center;">Requisitos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar a eficiência energética</li> <li>- Reduzir o consumo de combustível</li> <li>- Reduzir emissões de CO<sup>2</sup></li> <li>- Estar em acordo com as novas diretrizes globais de sustentabilidade</li> </ul>
<p style="text-align: center;">Benefícios</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduz emissões de CO<sup>2</sup></li> <li>- Redução de custos</li> <li>- Ampliação da cultura sustentável, através do aumento do custo benefício</li> </ul>	

Fonte: Autores

Figura 11 – Canvas de projeto

<b>Stakeholders</b>	<b>Equipe</b>	<b>Riscos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Montadoras automotivas</li> <li>- Empresas de ônibus urbanos e interurbanos</li> <li>- Empresas de transportes</li> <li>- Equipes de corrida automobilística</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Líder</li> <li>- Mercado</li> <li>- Custos</li> <li>- Projeto</li> <li>- Simulações</li> <li>- Orientadores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento no preço de material para produção</li> <li>- Falta de peças</li> <li>- Desistência das indústrias no mercado automotivo híbrido</li> </ul>
<b>Premissas</b>	<b>Grupo de entregas</b>	<b>Linha do tempo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualidade de produto diminuindo manutenções</li> <li>- Elevada venda de veículos híbridos e elétricos nos próximos anos</li> <li>- Leis ambientais mais rígidas às indústrias automotivas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análise de mercado</li> <li>- Oficinas de instalação</li> <li>- Análise financeira</li> <li>- Vedores técnicos</li> <li>- Vendas online</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definição do problema</li> <li>- Estudo de mercado</li> <li>- Ênfase inicial da solução</li> <li>- Estudo de montagem do sistema</li> <li>- Análise de viabilidade</li> <li>- Aplicação do equacionamento nos veículos</li> </ul>
<b>Restrições</b>		<b>Custos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo viável de produção compatível com as diretrizes do mercado</li> <li>- Energeticamente eficiente, tornando o sistema um diferencial com elevado valor agregado</li> <li>- Atendendo todas as leis de circulação, leis de conforto, leis ambientais tanto do produto, tanto as leis de produção do produto</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Preço dos componentes</li> <li>- Aplicação do equacionamento no veículo</li> <li>- Instalação do sistema</li> <li>- Manutenção</li> </ul>

Fonte: Autores

### 3.8 SCAMPER

O SCAMPER é uma técnica de geração de ideias que oferece uma abordagem estruturada para explorar e expandir a criatividade em processos de inovação, resolução de problemas e desenvolvimento de projetos. O termo SCAMPER é um acrônimo para uma série de perguntas que orientam o pensamento criativo. Cada letra do acrônimo representa uma palavra-chave relacionada a uma ação específica: S – substituir; C – combinar; A – adaptar; M – modificar; P – propor; E – eliminar e R – reordenar. Para este trabalho, definiu-se para:

- a) substituir total ou parcial do amortecedor convencional por um gerador elétrico;
- b) combinar o sistema de redução/ transmissão ao amortecedor;
- c) adaptar o suporte para atender maior número de veículos possível;
- d) diminuir a folga entre os dentes da engrenagem;
- e) propor suspensão ativa;
- f) eliminar massa a partir de um estudo e simulação da estrutura;

- g) reordenar a forma de atuação do dispositivo para geração de energia em outras aplicações.

### 3.9 BUSINESS MODEL CANVAS

O *Business Model Canvas* ou Canvas de Modelo de Negócios é uma representação visual que compreende nove blocos principais, cada um representando um aspecto crítico do modelo de negócios. Esses blocos incluem Segmentos de Mercado, Proposta de Valor, Canais, Relacionamento com o Cliente, Fontes de Receitas, Recurso Chave, Atividades Chave, Parcerias Chave e Estrutura de Custos. O canvas permite uma síntese eficaz das principais características de um modelo de negócios em um único espaço visual. Isso corrobora para uma visão holística e compartilhada da estrutura do negócio. A estrutura simplificada do canvas facilita a compreensão do modelo de negócios por diferentes partes interessadas, incluindo membros da equipe, investidores, parceiros e clientes. A Figura 12 e Figura 13 ilustram o Business Model Canvas elaborado pela equipe RAY.

Figura 12 – *Business model canvas*

<b>Parceiros Chave</b>	<b>Atividades Chave</b>	<b>Proposta de valor</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stema, usinagem e solda</li> <li>- V4 company soluções de marketing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realização de consultoria</li> <li>- Análise de dados</li> <li>- Ensaio de validação</li> <li>- Atendimento técnico</li> <li>- Vendas</li> </ul>	<p style="text-align: center;">Sistema de amortecimento automotivo que regenera energia mecânica, aumentando a eficiência energética do veículo e diminuindo as emissões de gases poluentes</p>
<b>Estrutura de custos</b>	<b>Recursos Chave</b>	
<p style="text-align: center;"><b>Custo fixo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aluguel, serviços essenciais, licença de software</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Custo variável:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo de ensaios/coleta de dados</li> <li>- Comissão de vendas</li> <li>- Deslocamento ao cliente</li> <li>- Aquisição de material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bancada de ensaios</li> <li>- Softwares de engenharia</li> <li>- Equipe de engenharia</li> <li>- Equipamentos de teste</li> </ul>	

Fonte: Autores

Figura 13 – *Business model canvas*

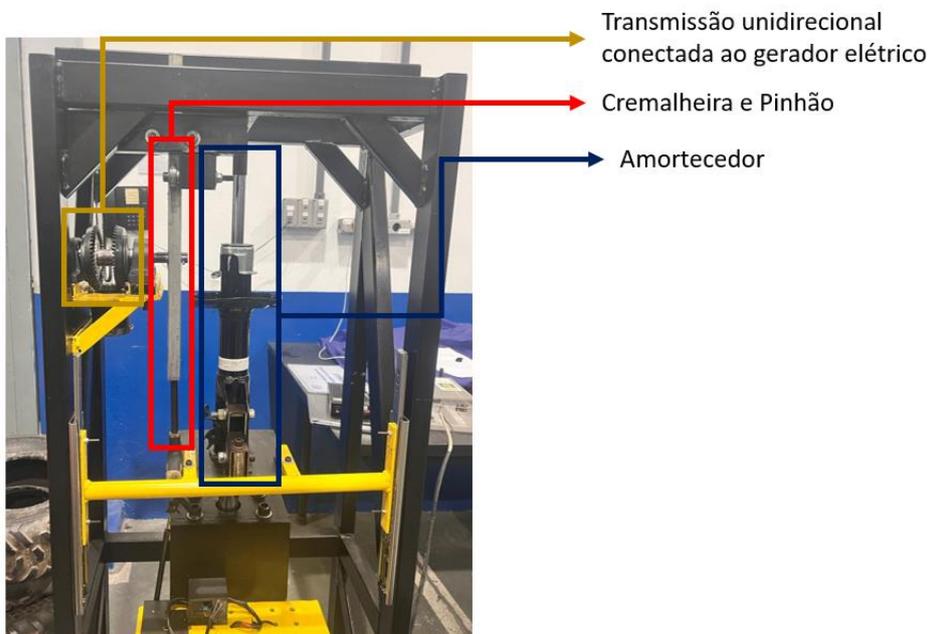
<p><b>Relacionamento com o cliente</b></p> <p>Atendimento personalizado através de serviços de consultoria e acompanhamento do cliente</p>	<p><b>Segmento de Mercado</b></p> <p>Montadoras de veículos leves e pesados</p>
<p><b>Canais</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Feiras de exposição</li> <li>- Revistas especializadas</li> <li>- Site da empresa</li> <li>- Mídias educativas</li> </ul>	<p><b>Fontes de Renda</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Consultoria empresarial</li> <li>- Realização de manutenção especializada</li> </ul>

Fonte: Autores

#### 4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento do modelo experimental e posteriormente, modelo matemático, será utilizada uma bancada capaz de realizar pulsos verticais constantes em uma suspensão veicular e, a partir os variados deslocamentos, será possível determinar a quantidade de energia gerada pelo conversor mecânico BERS, constituído por pinhão, cremalheira e transmissão unidirecional conectada ao gerador elétrico. A Figura 14 ilustra a bancada de teste com o dispositivo BERS.

Figura 14 – Bancada de teste com dispositivo BERS



Fonte: Autores

A Figura 15 a seguir mostra o gerador elétrico utilizado na bancada.

Figura 15 – Gerador elétrico



Fonte: Autores

Para modelagem experimental serão considerados a velocidade de atuação do amortecedor, deslocamento do amortecedor, força vertical, constante elástica da mola e frequência. O objetivo é equacionar todos os dados a fim de conceber um modelo matemático capaz de prever o nível de regeneração que um veículo pode ter e possibilitar determinar os parâmetros mais influentes na geração de energia elétrica.

Desta bancada, o valor da potência gerada pelo gerador elétrico será coletado a partir de um osciloscópio; deslocamento do amortecedor e frequência, a partir de um transdutor de deslocamento variável linear ou LVDT; força vertical a partir do Strain Gauge;

#### 4.1 LVDT

O LVDT é um dispositivo de medição utilizado para converter um deslocamento linear ou movimento axial em um sinal elétrico proporcional. É amplamente usado em aplicações onde é necessário medir com precisão pequenos deslocamentos, como em instrumentação industrial, sistemas de controle de processos e em experimentos laboratoriais. O princípio de operação do LVDT pode ser expresso matematicamente através da relação:

$$V_{saída} = \frac{N_{saída1} - N_{saída2}}{N_{saída1} + N_{saída2}} \times V_{entrada} \quad (1)$$

onde:

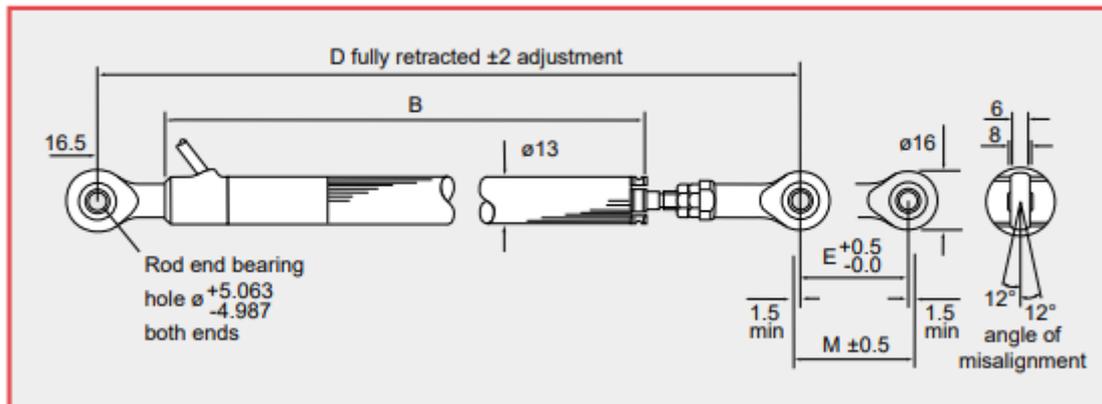
$V_{saída}$  é a tensão de saída.

$N_{saída1}$  e  $N_{saída2}$  são as tensões induzidas nas bobinas secundárias.

$V_{entrada}$  é a tensão de entrada na bobina primária.

O LVDT utilizado na bancada é da fabricante Penny+Giles (2012) modelo MLS130/150/R/N, cujo significado é “*Model*” MLS130; “*Electrical Stroke*” 150; “*Mounting*” Metal Rod End Bearings e “*Protective Sleeve*” None. A Figura 16 evidencia as especificações técnicas deste LVDT.

Figura 16 – Especificações técnicas LVDT Penny+Giles MLS130/150/R/N



Fonte: Penny+Giles, 2012

A Figura 17 a seguir evidencia o LVDT utilizado na bancada de testes.

Figura 17 – LVDT



Fonte: Autores

#### 4.2 STRAIN GAUGE E CÉLULA DE CARGA

Um *strain gauge*, ou extensômetro, é um sensor utilizado para medir deformações ou tensões em um objeto. Ele funciona com base no princípio de que a resistência elétrica de certos materiais varia proporcionalmente à sua deformação.

O *strain gauge* é feito de um material condutor, como uma fina folha metálica ou um material composto. Este material é escolhido por sua capacidade de sofrer deformações quando o objeto ao qual está aplicado é submetido a uma tensão ou deformação. O *strain gauge* é colado

ou fixado à superfície do objeto que se deseja monitorar. Geralmente, é aplicado ao longo da direção na qual se espera que ocorram as deformações. Quando o objeto sofre deformação ou tensão, o material condutor do *strain gauge* também é deformado. Isso resulta em mudanças na sua geometria e, conseqüentemente, na sua resistência elétrica. A deformação do material condutor leva a uma variação na resistência elétrica do *strain gauge*. A relação entre a deformação e a variação na resistência é conhecida como fator de *gauge* (ou fator de deformação).

A variação na resistência elétrica do *strain gauge* é medida usando um circuito elétrico. Geralmente, isso envolve a criação de uma ponte de *Wheatstone*, um arranjo de quatro resistências que permite medir pequenas mudanças na resistência com alta precisão. A variação da resistência é então convertida em unidades de deformação ou tensão, dependendo da aplicação específica. Isso geralmente envolve a utilização de calibrações conhecidas para relacionar a mudança de resistência às deformações reais. A Figura 18 a seguir evidencia a instalação do *strain gauge* no formato de ponte de *Wheatstone*.

Figura 18 – Strain gauge



Fonte: Dewesoft, 2022

A célula de carga, também conhecida como célula de tensão ou transdutor de força, é um dispositivo utilizado para medir a força ou carga aplicada a um objeto. Ela converte a força mecânica em um sinal elétrico que pode ser lido e interpretado por instrumentos de medição. A Figura 19 a seguir mostra a célula de carga utilizada na bancada.

Figura 19 – Célula de carga



Fonte: Autores

Para a leitura de dados, será utilizado o amplificador universal de medição da fabricante HBK modelo QuantumX MX840A, sendo esta, a interface que de conexão entre os sensores e os sensores.

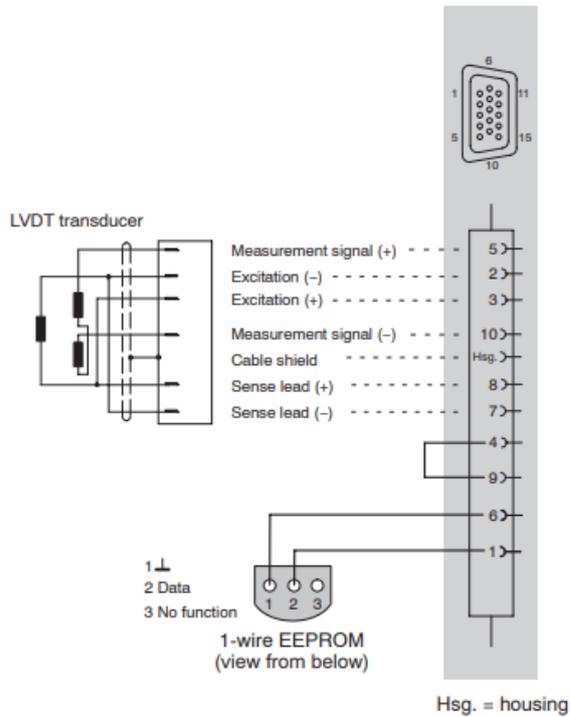
Figura 20 – Amplificador universal HBK QuantumX MX840A



Fonte: HBK, 2023

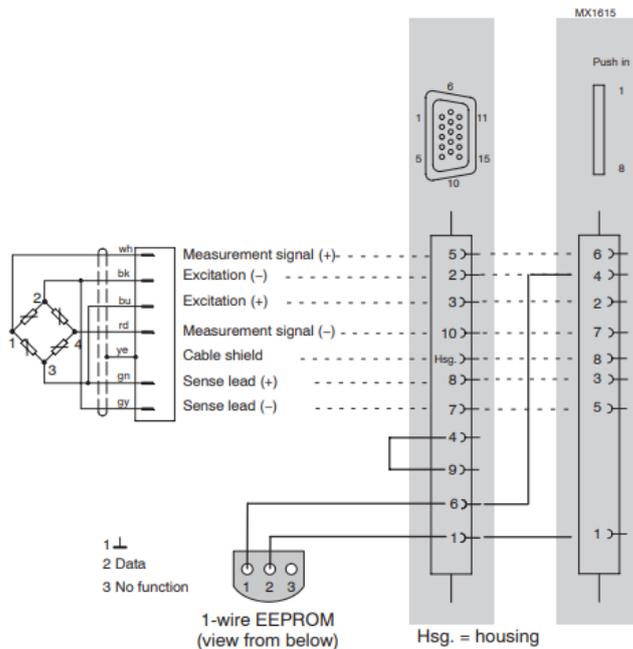
Para realizar a conexão do LVDT ao HBK, adotou-se o diagrama descrito na Figura 21 a seguir:

Figura 21 – Diagrama de instalação do LVDT



Fonte: HBK, 2023.

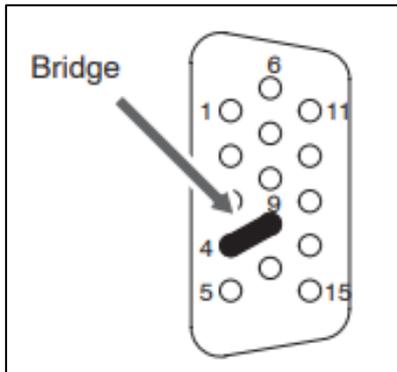
Para conectar a célula de carga e o *strain gauge* ao HBK, foi utilizado o diagrama a seguir:

Figura 22 – Diagrama de instalação *strain gauge* e célula de carga

Cable color code:  
wh= white; bk= black; bu= blue; rd= red; ye = yellow; gn= green; gy= gray

Fonte: HBK, 2023.

Figura 23 – Identificação dos pinos do conector



Fonte: HBK, 2023.

A Figura 24 a seguir mostra a identificação do pino e sua respectiva funcionalidade na interface da HBK.

Figura 24 – Identificação da funcionalidade de cada pino do conector

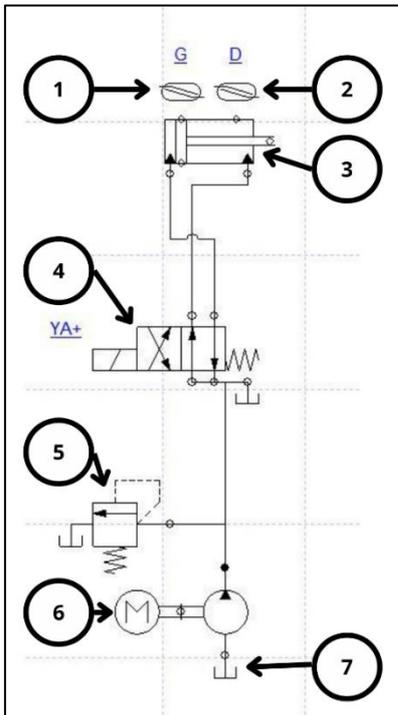
Pin	Connection
1	TEDS (+)
2	Bridge Excitation voltage (-), 0° reference pulse (zeroing pulse) (-)
3	Bridge Excitation voltage (+), 0° reference pulse (zeroing pulse) (+)
4	Always connect with Pin 9! (Plug identification)
5	Measurement signal (+), potentiometer measurement signal(+), voltage input 100 mV (+), $f_1(-)$ signal differential, SSI data (-)
6	TEDS (-), ground frequency measurement
7	Sense lead (-), $f_2(-)$ signal differential, CAN-High, SSI clock (-)
8	Sense lead (+), $f_2(+)$ signal differential, CAN-Low, SSI clock (+)
9	Signal ground
10	Measurement signal (-), $f_1(+)$ signal differential, SSI data (+)
11	Active sensor supply 5 ... 24 V (0 V)
12	Active sensor supply 5 ... 24 V (+)
13	Current input $\pm 30$ mA (+)
14	Voltage input 10 V (+), 60 V (+)
15	Calibration signal T10F(S) and T40, 5 V/max. 10 mA

Fonte: HBK, 2023.

#### 4.3 SISTEMA HIDRÁULICO

O sistema hidráulico foi adaptado do trabalho de iniciação científica de Bruno Francisco (2013). A Figura 25 a seguir mostra o esquema hidráulico da bancada.

Figura 25 – Esquema hidráulico  
da bancada



Fonte: Autores.

Legenda: 1 – Fim de Curso Inferior;  
2 – Fim de Curso Superior; 3 – Atuador  
Hidráulico; 4 – Válvula Direcional  
de 4 vias e 2 posições; 5 – Válvula  
Limitadora de Pressão; 6 – Conjunto  
Motor Elétrico e Bomba Hidráulica;  
7 – Tanque

Sendo o conjunto motor elétrico, bomba hidráulica e tanque, utilizado da bancada Vickers, conforme mostra a Figura 26 a seguir.

Figura 26 – Bancada Vickers



Fonte: Bruno Francisco, 2013

A pressão do sistema é 200 bar, tanque de 50 litros e a bomba é de palheta de  $V_g = 20$   $\text{cm}^3/\text{rot}$ . O atuador é do tipo MS2, conforme mostra a Figura 27 a seguir.

Figura 27 – Atuador tipo MS2



Fonte: Bruno Francisco, 2013

A válvula utilizada é uma direcional da fabricante Parker modelo D1VW020BNJPH. A Figura 28 a seguir mostra o esquema da válvula utilizada.

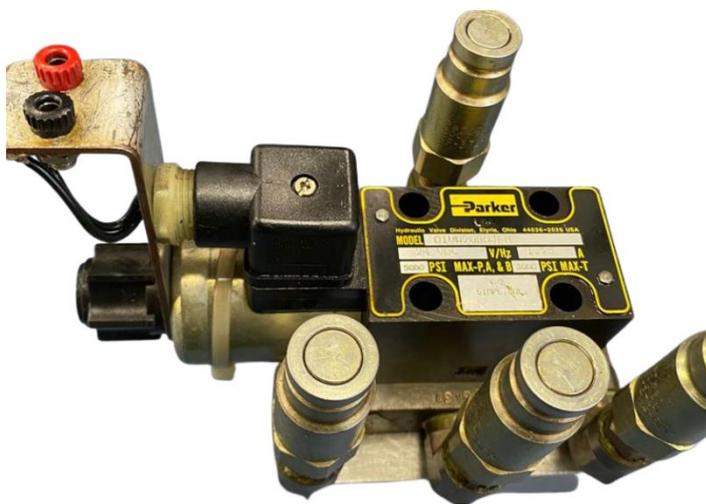
Figura 28 – Esquema da válvula Parker

2 position spools			Standard
Code	Spool type		
<b>020</b>	a	<b>B</b>	
	b		

Fonte: Parker; 2022

A Figura 29 a seguir evidencia a válvula da Parker.

Figura 29 – Válvula da Parker



Fonte: Autores

#### 4.4 ENSAIO

Para realização do ensaio, verificou-se a possibilidade de realizar algum de acordo com normas vigentes. A norma que mais se adequaria ao ensaio seria a NBR 13308, onde descreve ensaios de durabilidade para amortecedores de ônibus, caminhão e utilitários com capacidade de carga acima de 1,5T. No entanto, por se tratar de um ensaio de durabilidade, os requisitos normativos não atendem ao propósito deste trabalho e para tanto não foi utilizado. O ensaio considera um mínimo de 4 amortecedores a serem ensaiados, temperatura a 80°C e 600 mil ciclos.

## 5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

Os tópicos a seguir irão abordar o desenvolvimento do modelo matemático, desde a linguagem de programação R e os recursos que ela dispõe para modelagem, como por exemplo, método do mínimo quadrado, regressão linear simples e múltipla, método *stepwise* etc. A análise destes métodos torna-se fundamental para compreender quais performam.

### 5.1 LINGUAGEM R

A linguagem R é, de acordo com Thiago Coutinho (2021), uma linguagem de programação e ambiente de software projetada para computação estatística e gráficos. Ela foi desenvolvida no início da década de 1990 por Robert Gentleman e Ross Ihaka na Universidade de Auckland, Nova Zelândia. Essa linguagem de programação foi escolhida porque projetada para facilitar a manipulação, visualização dos dados e reprodutibilidade.

### 5.2 MÉTODO DO MÍNIMO QUADRADO (MMQ)

O método dos mínimos quadrados, de acordo com Renato Almeida (2015) é uma técnica estatística utilizada para encontrar a melhor linha de ajuste para um conjunto de dados, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores previstos pela linha de ajuste. Esse método é amplamente empregado em estatística, matemática aplicada, engenharia, econometria e diversas outras áreas para modelar relacionamentos entre variáveis.

Passo 1: Inicia-se com a fórmula do modelo matemático que descreve a relação entre as variáveis. Exemplificado: para um modelo linear, a equação geral seria igual a:

$$y = mx + b \tag{2}$$

Onde,

y = variável dependente;

x = variável independente;

m = inclinação da linha;

$b$  = interceptação no eixo  $y$

Passo 2: coleta de dados que, no exemplo, trata-se de um par ordenado  $(x, y)$ .

Passo 3: cálculo das médias  $(\bar{x}, \bar{y})$

Passo 4: diferença entre os dados e as médias

$$(x - \bar{x}) \quad (3)$$

$$(y - \bar{y}) \quad (4)$$

Passo 5: produto das diferenças

$$(x - \bar{x})(y - \bar{y}) \quad (5)$$

Passo 6: somatória dos produtos e das diferenças quadráticas

$$(x - \bar{x})^2 \quad (6)$$

Passo 7: cálculo dos coeficientes

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2} \quad (7)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (8)$$

Passo 8: com os coeficientes  $m$  e  $b$ , a equação da linha de ajuste é obtida, conforme a equação 1.

Passo 9: plotar o gráfico da linha de ajuste em relação aos dados observados para analisar e avaliar a qualidade do ajuste

Passo 10: calcular o coeficiente de determinação  $R^2$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y - (mx + b))^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (9)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica o quanto o modelo se ajusta aos dados, variando de 0 a 1. Se o valor estiver próximo à 1, significa que o modelo se ajusta aos dados.

Passo 11: calcular e analisar os resíduos.

$$\text{Resíduo} = y - (mx + b) \quad (10)$$

Os resíduos representam as diferenças entre os valores reais e os valores previstos pela linha de ajuste. Cada ponto contém seu próprio resíduo. Na análise deve-se considerar se os resíduos são pequenos, isso indica que o modelo está fornecendo boas previsões. Quanto à aleatoriedade, não deve exibir padrão discernível. Caso exista um padrão nas aleatoriedades, isso pode indicar que a relação entre as variáveis não é totalmente linear e o modelo deve ser ajustado.

### 5.3 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A regressão linear múltipla, de acordo com Bruno Damásio (2021) é uma extensão da regressão linear simples, permitindo modelar a relação entre uma variável dependente e múltiplas variáveis independentes. Enquanto na regressão linear simples temos uma equação do tipo  $y = mx + b$ , a regressão linear múltipla tem a forma

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \dots + \epsilon, \quad (11)$$

onde:

y = variável independente;

b = intercepto;

$b_1, b_2, b_n \dots$  = coeficientes associados às variáveis independentes;

$x_1, x_2, x_n \dots$  = são as variáveis independentes

Este método matemático é útil quando a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes é complexa e envolve múltiplos fatores, podendo proporcionar previsões mais precisas. Além disso, permite identificar quais variáveis tem impacto significativo e em qual direção.

### 5.4 MÉTODO STEPWISE

De acordo com a IBM (2021), o método *stepwise*, uma abordagem amplamente empregada na seleção de variáveis em análises de regressão, desempenha um papel crucial na construção de modelos preditivos robustos. Sua aplicação visa identificar um subconjunto ótimo de variáveis independentes que melhor explicam a variação na variável dependente. Essa

técnica é implementada de maneira iterativa, envolvendo adição ou remoção de variáveis com base em critérios estatísticos criteriosos.

A implementação do método *stepwise* pode assumir duas abordagens principais: *forward stepwise* e *backward stepwise*.

Na abordagem *forward stepwise*, o processo inicia-se com um modelo vazio, ao qual variáveis independentes são acrescentadas sequencialmente, escolhidas com base em critérios como o valor-p ou critérios de informação. Este acréscimo prossegue até que a adição adicional não resulte em aprimoramentos estatisticamente significativos ou até que um critério de parada seja atingido.

Por outro lado, a abordagem *backward stepwise* começa com um modelo que incorpora todas as variáveis independentes e, em cada etapa, remove a variável que, ao ser retirada, resulta na menor perda estatística. Este processo continua até que a remoção adicional de variáveis não cause uma perda estatística significativa ou até que um critério de parada seja satisfeito.

A escolha entre a abordagem *forward* e *backward*, bem como a combinação bidirecional, depende da natureza específica do problema e dos dados em questão. Critérios de seleção de variáveis, como p-valores, ou outros, são utilizados para orientar a decisão de inclusão ou exclusão de variáveis.

É imperativo ressaltar que, embora o método *stepwise* seja uma ferramenta eficiente na seleção de variáveis, deve ser empregado com cautela. O risco de *overfitting*, especialmente em conjuntos de dados limitados em comparação com o número de variáveis, exige uma validação cuidadosa do modelo resultante em conjuntos de dados independentes. A interpretação dos resultados deve ser fundamentada em uma compreensão profunda do domínio do problema, e a generalização do modelo deve ser verificada rigorosamente.

Em síntese, o método *stepwise*, por meio de suas abordagens *forward*, *backward*, ou combinada, representa uma ferramenta valiosa na seleção criteriosa de variáveis em modelos de regressão, desempenhando um papel essencial na construção de modelos robustos e generalizáveis.

## 5.5 TESTE F

O Teste F, de acordo com Minitab (2019), é uma ferramenta estatística que desempenha um papel fundamental na análise de variância, comumente utilizada em pesquisas acadêmicas para avaliar a significância de diferenças entre médias de diferentes grupos. Este teste é importante na validação estatística de hipóteses e na compreensão de variações nas amostras e

é baseado na razão de duas variâncias amostrais, permitindo a comparação das médias de dois ou mais grupos. A fórmula básica do teste é:

$$F = \frac{\text{Variância entre grupos}}{\text{Variância dentro dos grupos}} \quad (12)$$

Na “Variância entre grupos”, mede-se a variação das médias dos grupos em relação à média geral e se esta variância for significativamente maior do que a esperada, indica que pelo menos um grupo é estatisticamente diferente dos outros. Na “Variância dentro dos grupos”, representa a variação dos dados dentro de cada grupo, refletindo a dispersão de dados em torno das médias dos grupos. Se essa variância é alta, pode indicar heterogeneidade dentro dos grupos. Por fim, o Teste F compara a razão entre essas duas variâncias. Se a razão for significativamente diferente de 1, sugere que há diferenças estatísticas entre as médias dos grupos.

## 5.6 INTERVALO DE CONFIANÇA

Na pesquisa estatística, a estimativa pontual de um parâmetro populacional é uma abordagem comum, mas é essencial reconhecer a incerteza inerente a essa estimativa. O conceito de intervalo de confiança (IC), de acordo com Thiago Coutinho (2023), emerge como uma ferramenta valiosa para quantificar e comunicar essa incerteza, fornecendo uma faixa de valores plausíveis para o verdadeiro valor do parâmetro. Este capítulo explora a definição, a formulação e a aplicação do intervalo de confiança, destacando sua relevância na inferência estatística e na tomada de decisões informadas.

O intervalo de confiança é construído em torno de uma estimativa pontual, como a média amostral, e é delimitado por uma margem de erro. A fórmula geral do intervalo de confiança é expressa como:

$$\text{Intervalo de Confiança} = \text{Estimativa pontual} \pm \text{Margem de Erro} \quad (13)$$

A margem de erro é influenciada pelo tamanho da amostra, variabilidade na amostra e nível de confiança escolhido. No contexto de um estudo, por exemplo, sobre a média de altura de uma população, por exemplo, a aplicação do intervalo de confiança envolveria a estimativa da média amostral e a determinação da margem de erro associada. O resultado seria um

intervalo de confiança que, com uma probabilidade específica (como 95%), abrange a verdadeira média da população.

Diversos fatores desempenham um papel na construção do intervalo de confiança, incluindo o tamanho da amostra, a variabilidade nos dados e o nível de confiança desejado. Uma compreensão aprofundada desses fatores é crucial para interpretar corretamente a amplitude do intervalo de confiança.

## 5.7 P-VALUE

Gabriel Rodrigues (2021) define que o valor de  $p$ , conhecido como *p-value* ou  $p$ -valor, é uma métrica fundamental na inferência estatística, desempenhando um papel central na avaliação da significância estatística de resultados obtidos a partir de amostras de dados. Este indicador oferece uma medida da evidência contra uma hipótese nula e orienta a tomada de decisões fundamentadas com base nos resultados obtidos em experimentos ou estudos estatísticos.

O valor de  $p$  é a probabilidade de observar uma estatística de teste tão extrema quanto (ou mais extrema) do que a observada, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira. Em termos simples, representa a chance de que os resultados observados sejam meramente fruto do acaso, considerando a hipótese nula.

Um *p-value* baixo (geralmente  $< 0,05$ ) sugere que os resultados são estatisticamente significativos. Isso indica que a probabilidade de obter tais resultados devido ao acaso é baixa, fornecendo evidências para rejeitar a hipótese nula.

Um *p-value* alto sugere que os resultados podem ser explicados pelo acaso. Nesse caso, não há evidências convincentes para rejeitar a hipótese nula.

Para tomar uma decisão, é necessário estabelecer hipóteses, sendo uma nula ( $H_0$ ) e uma alternativa. Em seguida, coleta-se dados e aplica-se um teste estatístico apropriado. Após esta etapa, calcula-se o *p-value* para determinar a probabilidade de se obter os resultados observados, assumindo que a hipótese nula ( $H_0$ ) seja verdadeira. Compara-se com um nível de significância pré-definido, geralmente de 0,05. Se o *p-value* estiver acima do nível de significância, rejeita-se a hipótese nula e caso contrário, considera-se a hipótese nula. Comparação do valor de  $p$  com um nível de significância predefinido (geralmente 0,05). Além disso, o *p-value* pode ser influenciado pelo tamanho da amostra; portanto, é crucial considerar o contexto e o tamanho amostral ao interpretar os resultados.

## 5.8 OVERFITTING

No cenário cada vez mais complexo da análise de dados e modelagem preditiva, a busca por modelos precisos e generalizáveis é de suma importância. Contudo, um desafio recorrente que merece atenção especial é o fenômeno conhecido como *overfitting*. De acordo com a AWS (2023), este fenômeno ocorre quando um modelo se ajusta excessivamente aos dados de treinamento, capturando não apenas os padrões subjacentes, mas também o ruído e as particularidades específicas desse conjunto de dados. Esta tendência pode resultar em uma performance excepcional nos dados de treinamento, mas falhar na capacidade de generalizar para novos dados não utilizados durante o treinamento.

O *overfitting* se manifesta quando o modelo se torna excessivamente complexo em relação à quantidade de dados disponíveis. Um modelo complexo pode não apenas ajustar-se aos padrões reais, mas também memorizar características específicas dos dados de treinamento, incluindo variações aleatórias.

Os sintomas clássicos de *overfitting* incluem uma excelente performance nos dados de treinamento, mas um desempenho inferior ao esperado em dados de validação ou teste. Esta dissonância indica que o modelo não está conseguindo generalizar efetivamente para novos cenários, comprometendo sua utilidade prática.

## 5.9 GRÁFICOS

Os gráficos são importantes ferramentas de análise de modelos estatísticos. Os tópicos a seguir irão descrever os principais, como por exemplo, o gráfico de dispersão, *heatmap*, *Q-Q residuals*, entre outros. A Figura 30 a seguir evidencia a simulação de dados para geração dos gráficos dos tópicos posteriores.

Figura 30 – Dados para simulação e geração de gráficos

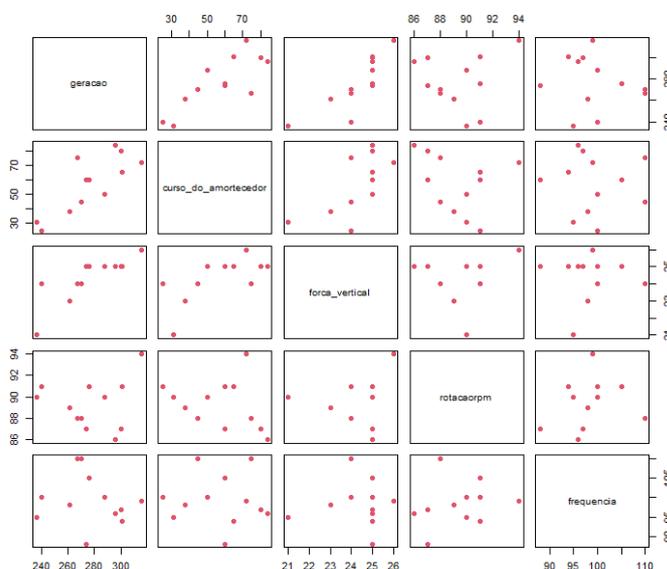
geracao	curso_do_amortecedor	forca_vertical	rotacao_rpm	frequencia	
1	240	25	24	91	100
2	236	31	21	90	95
3	270	45	24	88	110
4	274	60	25	87	88
5	301	65	25	91	94
6	316	72	26	94	99
7	300	80	25	87	97
8	296	84	25	86	96
9	267	75	24	88	110
10	276	60	25	91	105
11	288	50	25	90	100
12	261	38	23	89	98

Fonte: Autores

### 5.9.1 Dispersão

O gráfico de dispersão é uma representação visual que exibe a relação entre duas variáveis. Cada ponto no gráfico representa uma observação e sua posição em relação aos eixos x e y revela padrões, tendências ou agrupamentos, sendo particularmente útil na identificação de correlações entre variáveis. O Gráfico 6 a seguir evidencia um exemplo de gráfico de dispersão.

Gráfico 6 – Dispersão

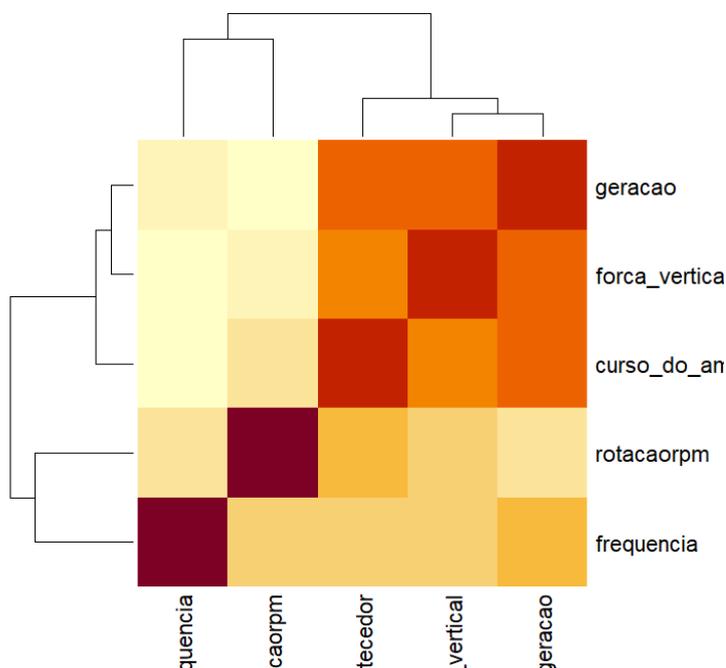


Fonte: Autores

### 5.9.2 Heatmap

O *heatmap* é uma representação gráfica de dados em formato de matriz, onde as cores indicam valores. É frequentemente utilizado para visualizar a intensidade de uma variável em relação a duas outras variáveis. Em modelos estatísticos, um *heatmap* pode ser usado, por exemplo, para examinar a matriz de correlação entre variáveis preditoras. O Gráfico 7 a seguir evidencia um exemplo de *heatmap*.

Gráfico 7 – *Heatmap*



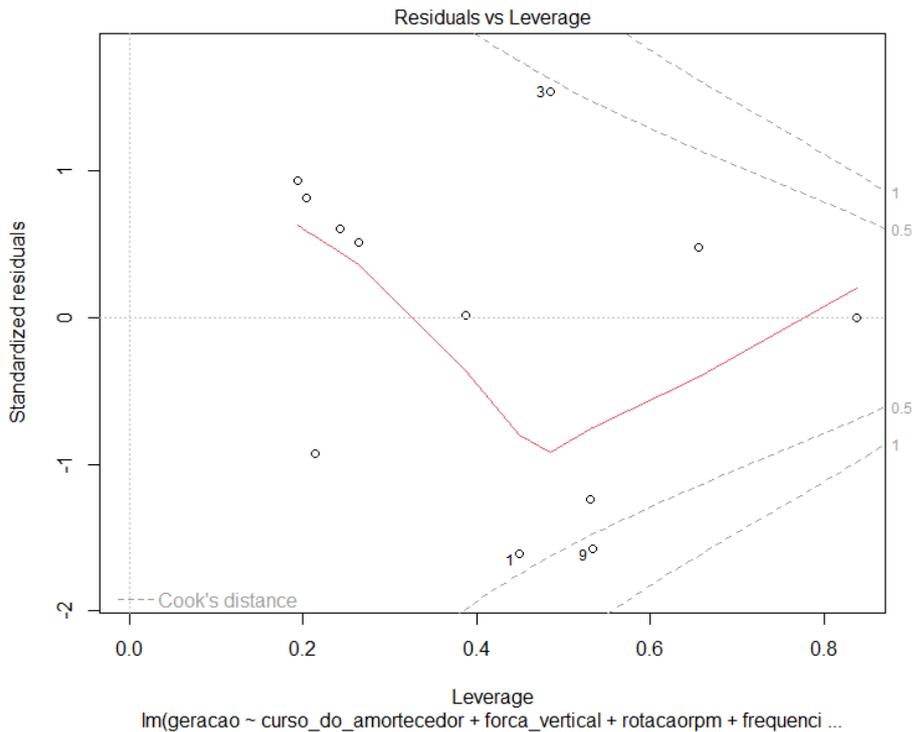
Fonte: Autores

### 5.9.3 Residuals vs leverage

Este gráfico é útil na identificação de observações que têm um impacto desproporcional nos resultados do modelo. Os resíduos representam a diferença entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo. A alavancagem mede o quanto uma observação influencia na estimativa dos coeficientes do modelo. O gráfico *Residuals vs Leverage* ajuda a identificar observações com alto impacto (alta alavancagem) e grandes resíduos.

A alavancagem mede o quanto uma observação influencia nos resultados do modelo e observações com alta alavancagem têm um impacto desproporcional nos coeficientes do modelo. O Gráfico 8 a seguir mostra um exemplo da análise “*residuals vs leverage*”

Gráfico 8 – *Residuals vs leverage*

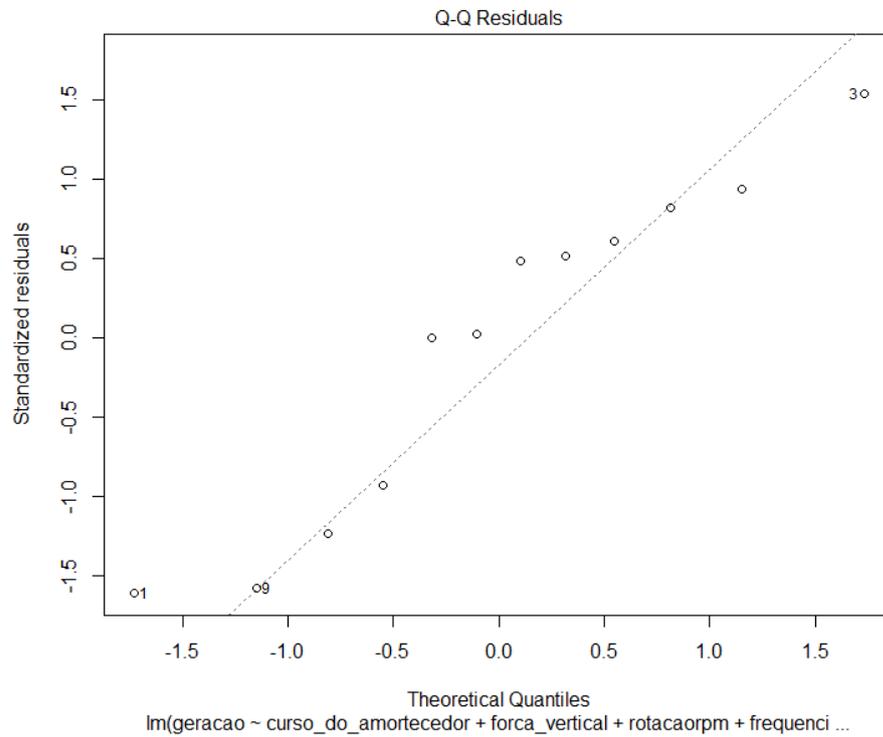


Fonte: Autores

#### 5.9.4 Q-Q Residuals

O gráfico *Quantile-Quantile* (Q-Q) de resíduos compara a distribuição dos resíduos com uma distribuição teórica (normal, por exemplo). Se os pontos do gráfico seguem aproximadamente uma linha diagonal, indica que os resíduos têm uma distribuição semelhante à distribuição teórica escolhida.

Os resíduos são as diferenças entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo. Resíduos grandes podem indicar áreas onde o modelo tem dificuldade em se ajustar aos dados. O Gráfico 9 a seguir mostra um exemplo de *Q-Q residuals*.

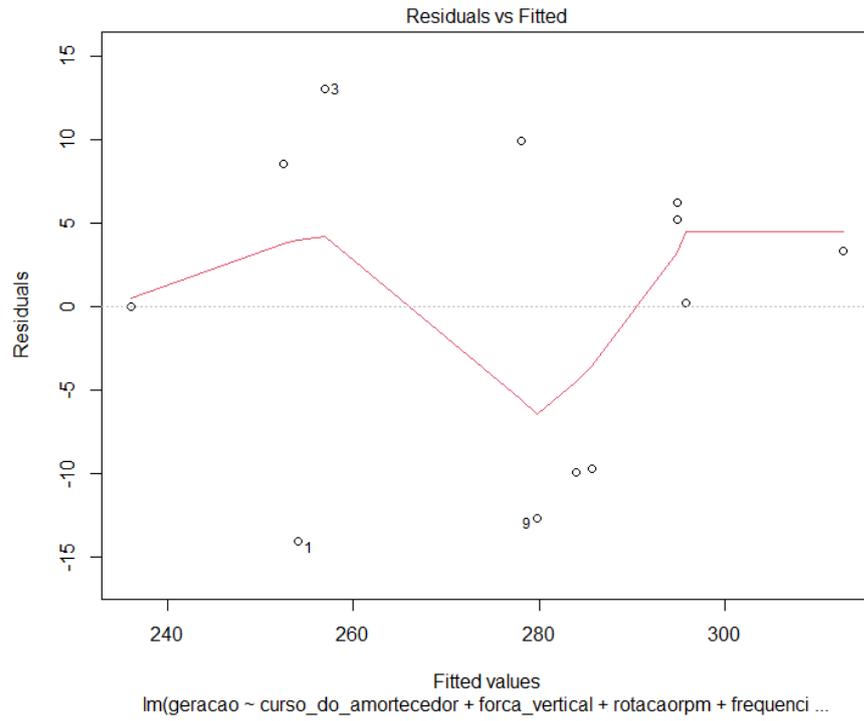
Gráfico 9 – *Q-Q residuals*

Fonte: Autores

### 5.9.5 *Residuals vs Fitted*

Esse gráfico examina se há padrões nos resíduos em relação aos valores previstos pelo modelo. Padrões podem indicar que o modelo não capturou completamente a estrutura dos dados. Idealmente, os resíduos devem ser distribuídos aleatoriamente ao redor de zero.

Os valores previstos são as estimativas do modelo para os valores da variável dependente com base nos valores das variáveis independentes. Eles representam a resposta predita pelo modelo para cada observação. O Gráfico 10 a seguir evidencia um exemplo de “*residuals vs fitted*”:

Gráfico 10 – *Residuals vs fitted*

Fonte: Autores

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Após analisar o método experimental na bancada, concluiu-se que os fatores listados abaixo contemplariam uma modelagem matemática ineficiente e errônea não correspondente à realidade. Os fatores são:

- a) hipóteses simplificadoras que comprometem a qualidade do modelo matemático, como por exemplo, a ausência de mola no amortecedor. A mola, junto ao amortecedor, tem como função absorver energia e analisar um modelo matemático descrito por um conjunto de apenas amortecedor, pode gerar significativas conclusões errôneas sobre o potencial de regeneração de energia por meio da suspensão automotiva. Desta forma, é imprescindível adotar mola ao realizar o experimento para que o modelo matemático, além de assertivo, seja condizente com a realidade;
- b) os amortecedores disponíveis para realização dos testes não contêm disponível informações relevantes para este estudo, limitando a quantidade de dados necessárias para uma modelagem assertiva. Para solucionar este problema, é necessário adotar amortecedores cujas informações descritivas sejam fornecidas pela fabricante, a fim de se realizar ‘inputs’ no modelo matemático de forma mais ágil e precisa;
- c) ausência de uma abordagem clara e concisa na quantificação de perda de energia nos veículos, visto que, pode-se variar conforme inúmeros fatores que variam desde a qualidade dos materiais empregados nas construções dos componentes dos sistemas até ao modo de condução do motorista, além da qualidade asfáltica em que o veículo trafega. É necessário realizar profundo estudo e compreensão sobre as perdas de energias que antecedem as perdas na suspensão para se realizar análises adequadas;
- d) no artigo de Abdelkareem et. al (2018) aborda-se que o coeficiente de amortecimento do amortecedor é um dos fatores que limita o potencial de regeneração de energia, desta forma, a própria característica construtiva do amortecedor limita o potencial de regeneração. Ao adotar um amortecedor, é imprescindível que se conheça qual é o coeficiente de amortecimento do mesmo e utilizar, no experimento, amortecedores com construções similares, mas de

coeficiente de amortecimento diferente a fim de identificar o quão influente este fator pode ser na regeneração de energia;

- e) quantidade insuficiente de testes de bancada para modelagem matemática. A grande parte dos métodos estatísticos necessitam de um grande volume de dados para uma quantidade significativa de variáveis independentes. A suspensão automotiva é composta por muitos parâmetros construtivos que influenciam o comportamento, desde os mais diversos tipos de amortecedores, até características geométricas de todo o conjunto. Para tanto, a bancada experimental possibilitava gerar poucos testes e, com todos os equipamentos que a constituem, algumas informações não estavam disponíveis dificultando a validação e assertividade do modelo matemático. O volume de dados coletados deve ser suficiente para que os erros atinjam uma distribuição normal e, se caso não for atendida, pode gerar resultados viesados. Outro problema que pode ocorrer com baixo volume de dados é a multicolinearidade, que ocorre quando duas ou mais variáveis independentes estão altamente correlacionadas. Por fim, outro fator que deve ser minuciosamente analisado ao utilizar da modelagem matemática por métodos estatísticos é o *overfitting*, que representa um desafio significativo na construção de modelos preditivos, por realizar excessivamente ajustes à curva, impossibilitando gerar quaisquer conclusões. É necessário estabelecer um método experimental padronizado e com gamas ampliados de testes a fim de se validar o procedimento como um todo e volume de dados necessário para a utilização dos métodos matemáticos de forma assertiva;

Tendo em vista os desafios encontrados o trabalho de conclusão de curso Ray, como sugestões de trabalhos futuros tem-se:

- a) reprojeta a bancada experimental considerando fatores como: uso de mola no amortecedor, alta quantidade de testes, usar amortecedores que contenham dados da fabricante, usar gerador elétrico desenvolvido para tal função, estruturar um sistema robusto e confiável para aquisição de dados da bancada e utilizar uma validação secundária, como por exemplo, tecnologias de metrologia óptica para verificar a coerência dos dados aquisitados. Adotar como referência a norma NBR 13308 e adaptar o ensaio a fim de simplificar requisitos, pois a norma tem como objetivo avaliar a durabilidade do amortecedor. Como requisito simplificado, realizar o ensaio em temperatura ambiente, ou, pelo menos com temperatura controlada e a

quantidade de ciclos precisa ser definida por meio de um método iterativo, em que se realiza o ensaio, partindo, por exemplo, da premissa de que a duração deve ser de 2 minutos e calcular quantos ciclos seriam necessários para cada frequência. A partir desta coleta, avaliar no R Studio (software utilizado para programação na linguagem R) se o volume de dados é suficiente para definição de um modelo matemático confiável e, caso não, aumentar o tempo de ensaio;

- b) realizar estudos para assegurar que a regeneração de energia pelo amortecedor é devidamente viável, visto que, montadoras como a Audi desenvolveu tecnologias com este propósito, mas não foi ao mercado;
- c) realizar estudos para elencar as melhores abordagens matemáticas que caracterizam e definam qual é o parâmetro construtivo de uma suspensão automotiva que mais influencia na regeneração de energia. Para isso, é sugerido adotar uma matriz de decisão que auxilie qual metodologia adotar para este estudo. Como critérios, pode se avaliar a acurácia com peso 35%, pois reflete a importância dos dados precisos; complexidade computacional com peso de 12%, pois, a depender do modelo utilizado, uma alta demanda computacional pode se tornar necessário para gerar resultados assertivos; requisitos de dados com 18%, ou seja, a quantidade e os tipos de dados que serão considerados na análise; facilidade de implementação com peso de 6%; interpretabilidade com peso de 12%; adaptabilidade a novos dados com peso de 12%, robustez com peso de 12% e tempo de processamento com peso de 5%. Estes podem ser os principais critérios e respectivos pesos para avaliar o quão aplicável um método matemático pode ser para as condições deste estudo;
- d) determinar um método padronizado em bancada e realizar estudos com amortecedores de construções diferentes, por exemplo, monotubo e bitubo, e molas de diferentes constantes elásticas para verificar qual é a combinação com o maior potencial de regeneração de energia;

## 7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABDELKAREEM, MOHAMED A. A. et. al. **Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review**, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261918311851>>. Acesso em: 29 jun 2023.

ABNT **NBR 13308:2014** – Veículos rodoviários automotores — Amortecedor da suspensão — Verificação de desempenho e durabilidade — Método de ensaio

ALMEIDA, DOUGLAS MENEZES DE et. al. **BERS: modelagem matemática e física e análise experimental de um sistema de regeneração de energia através da absorção de impacto na suspensão de um ônibus urbano**. 194 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica Automobilística) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2018.

ALMEIDA, RENATO NEVES DE. **O método dos mínimos quadrados: Estudo e aplicações para o ensino médio**, 2015. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/matematica/wp-content/uploads/sites/14/2017/09/28052015Renato-Neves-de-Almeida.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

AWS. **O que é overfitting?**, 2023. Disponível em: <<https://aws.amazon.com/pt/what-is/overfitting/>>. Acesso em: 31 ago. 2023.

BRASIL, MILLENA. **Emissões globais de CO2 devem bater novo recorde em 2022, alerta relatório**, 2022. Disponível em: <<https://epbr.com.br/emissoes-globais-de-co2-devem-bater-novo-recorde-em-2022-alerta-relatorio.>>. Acesso em: 22 mar 2023.

COUTINHO, THIAGO. **Entenda o que é a Linguagem R, como usá-la e ainda, confira 4 dicas!**, 2021. Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/linguagem-r>>. Acesso em: 19 ago. 2023.

COUTINHO, THIAGO. **Saiba o que é o Intervalo de Confiança e como usá-lo em análises estatísticas**, 2023. Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/o-que-e-intervalo-de-confianca>>. Acesso em: 07 set. 2023.

DAMASIO, BRUNO FIGUEIREDO. **O que é regressão linear múltipla?**, 2021. Disponível em: <[https://www.blog.psicometriaonline.com.br/o-que-e-regressao-linear-multipla/?ltk\\_gcm=17931339741&ltk\\_gag=142884992791&ltk\\_gac=615943752685&ltk\\_gne=g&gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiA04arBhAkEiwAuNOsIrpIDqxCDFa\\_E4jkVLxEyWcoNzSrdhqSbcCZUkmFuuuPwrYM0PvHcxoCzUcQAvD\\_BwE](https://www.blog.psicometriaonline.com.br/o-que-e-regressao-linear-multipla/?ltk_gcm=17931339741&ltk_gag=142884992791&ltk_gac=615943752685&ltk_gne=g&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA04arBhAkEiwAuNOsIrpIDqxCDFa_E4jkVLxEyWcoNzSrdhqSbcCZUkmFuuuPwrYM0PvHcxoCzUcQAvD_BwE)>. Acesso em: 31 jul. 2023.

DEWESOFT. **Strain Gauge Applications - Practical Uses of Strain Gage Sensors**, 2022. Disponível em: <<https://dewesoft.com/blog/strain-gauge-applications>>. Acesso em: 19 out. 2023.

FERREIRA, JOÃO CARLOS SANTOS. **Projeto e desenvolvimento de um sistema de regeneração da energia de amortecimento em suspensão de veículos**. Disponível em: <[https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28178/1/Dissertação\\_João%20Ferreira\\_2013.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28178/1/Dissertação_João%20Ferreira_2013.pdf)>. Acesso em: 17 jun 2023.

FRANCISCO, BRUNO SILVA. **Capacidade de teste de um dinamômetro por acionamento hidráulico para amortecedores**. Projeto de Pesquisa – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2013.

GLOBAL DATA. **Electric Vehicles Market Analysis by Region, Propulsion Type, End-user Type and Forecast to 2030**, 2022. Disponível em: <<https://www.globaldata.com/industries-we-cover/automotive/>>. Acesso em: 30 jun 2023.

HART, ROBERT. **8 bilhões de humanos: quais são as previsões até 2030**, 2022. Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbeslife/2022/11/8-bilhoes-de-humanos-quais-sao-as-previsoes-ate-2030/>>. Acesso em: 25 de jun de 2023.

HBK. **QuantumX MX840B and MX440B: 24-Bit Universal Measuring Amplifier for All Common Sensor Technologies**, 2023. Disponível em: <<https://www.hbm.com/en/2129/quantumx-mx840b-8-channel-universal->

amplifier/?product\_type\_no=QuantumX%20MX840B/MX440B:%20Universal%20Data%20Acquisition%20Module>. Acesso em: 19 out. 2023.

IBM. **Métodos de Seleção de Variável de Regressão Linear**, 2021. Disponível em: <<https://www.ibm.com/docs/pt-br/spss-statistics/saas?topic=regression-linear-variable-selection-methods>>. Acesso em: 07 set. 2023.

MATSUNAGA, LIZ. **Uma visão sobre a matriz energética mundial**, 2022. Disponível em: <<https://porque.com.br/uma-visao-sobre-a-matriz-energetica-mundial/>>. Acesso em: 15 ago 2023.

MINITAB. **O que é o teste F de significância global na análise de regressão?**, 2019. Disponível em: <<https://blog.minitab.com/pt/o-que-o-teste-f-de-significancia-global-na-analise-de-regressao>>. Acesso em: 02 set. 2023.

PARKER. **Catalogue MSG11-3500/UK**, 2022. Disponível em: <<https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Industrial-Systems-Division-Europe/Catalogues/Industrial-Valves-UK/02/D1VW-UK.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2023.

PENNY+GILES. **SLS & MLS Series Linear Position Sensors**, 2012. Disponível em: <<https://www.controldevices.group/PDFS/Penny%20&%20Giles/CW%20Penny%20&%20Giles%20SLS%20&%20MLS%20Full%20Brochure.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2023.

RIBAS, CEZAR. **Carro gera energia a partir de buracos na pista, economiza combustível**, 2009. Disponível em: <<https://hypescience.com/carro-gera-energia-a-partir-de-buracos-na-pista/>>. Acesso em: 09 jun 2023.

RODRIGUES, GABRIEL. **O que o p-valor significa?**, 2021. Disponível em: <<https://medium.com/psicodata/o-que-o-p-valor-significa-2680dc4729e8>>. Acesso em: 11 set. 2023.

RODRIGUEZ, HENRIQUE. **Audi cria sistema que recupera energia do movimento da suspensão**, 2016. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/audi-cria-sistema-que-recupera-energia-do-movimento-da-suspensao>>. Acesso em: 28 mai 2023.

SANTOS, HUGO ESPÍRITO. **eROT: conhece as suspensões revolucionárias da Audi**, 2016. Disponível em: <<https://www.razaoautomovel.com/autopedia/audi-esta-desenvolver-suspensao-recupera-energia/>>. Acesso em: 28 mai 2023.

SERVIÇO GEOLOGICO DO BRASIL – CPRM. **Lítio no mundo**, 2023. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/litio/nomundo.html>>. Acesso em: 06 jun 2023.

UM SÓ PLANETA. **Fotógrafo capta imagens impressionantes da mineração de lítio na América do Sul**, 2022. Disponível em: <<https://umsoplaneta.globo.com/sociedade/noticia/2022/02/09/fotografo-capta-imagens-impressionantes-da-mineracao-de-litio-na-america-do-sul.ghtml>>. Acesso em: 17 jul 2023.