



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Ciência e Tecnologia

Faculdade de Engenharia

Juan Carlos Azeredo Coutinho dos Santos

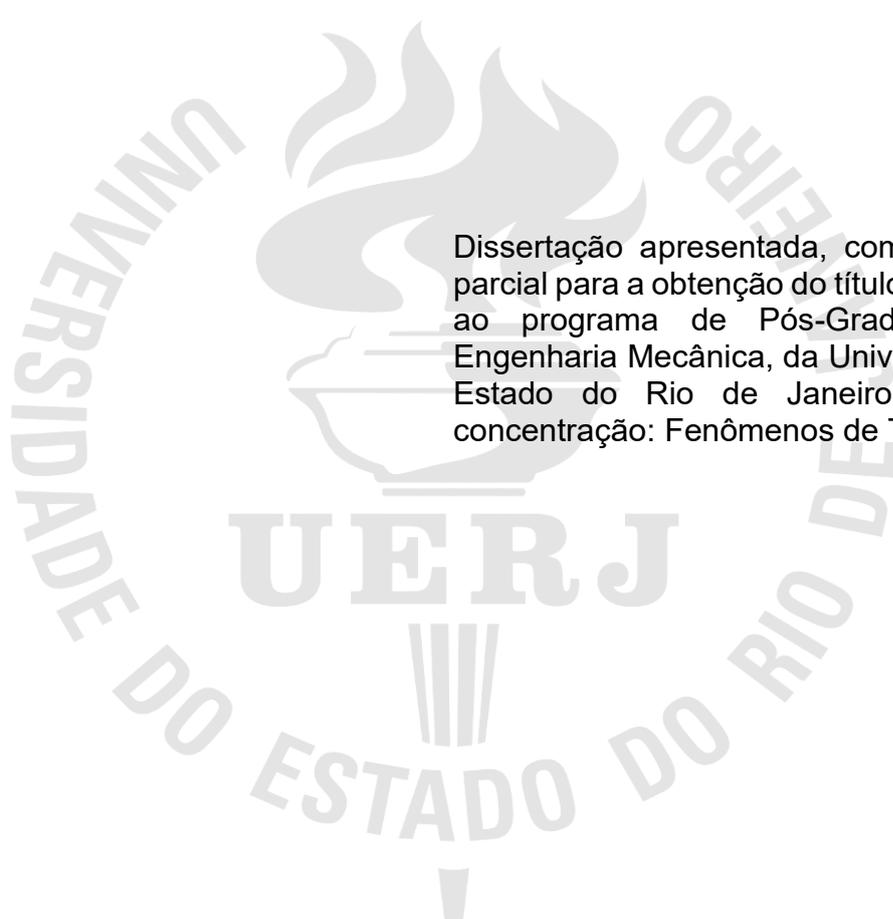
**Análise técnico-econômica de conversão de caminhões de
pequeno porte a combustão interna para tração elétrica com
geração fotovoltaica**

Rio de Janeiro

2024

Juan Carlos Azeredo Coutinho dos Santos

Análise técnico-econômica de conversão de caminhões de pequeno porte a combustão interna para tração elétrica com geração fotovoltaica



Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho, D.Sc.

Coorientador: Prof. Luiz Artur Pecorelli Peres, D.Sc.

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S237 Santos, Juan Carlos Azeredo Coutinho dos.
Análise técnico-econômica de conversão de caminhões de pequeno porte a combustão interna para tração elétrica com geração fotovoltaica / Juan Carlos Azeredo Coutinho dos Santos. – 2024.
124 f.

Orientador: Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho.
Coorientador: Luiz Artur Pecorelli Peres.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Veículos elétricos - Teses. 3. Geração de energia fotovoltaica - Teses. 4. Energia - Fontes alternativas - Teses. 5. Caminhões - Teses. I. Costa Filho, Manoel Antonio da Fonseca. II. Peres, Luiz Artur Pecorelli. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 621.337.4

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

 Documento assinado digitalmente
JUAN CARLOS AZEREDO COUTINHO DOS SANTOS
Data: 09/08/2024 10:02:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura

Rio de Janeiro, 09 de agosto de 2024.
Data

Juan Carlos Azeredo Coutinho dos Santos

Análise técnico-econômica de conversão de caminhões de pequeno porte a combustão interna para tração elétrica com geração fotovoltaica

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Aprovada em 05 de abril de 2024.

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br MANOEL ANTONIO DA FONSECA COSTA FILHO
Data: 02/08/2024 10:55:11-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho, D.Sc. (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Luiz Artur Pecorelli Peres, D.Sc. (Coorientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Daniel Henrique Nogueira Dias, D.Sc.
Universidade Federal Fluminense - UFF

Documento assinado digitalmente
gov.br FERNANDO JORGE MONTEIRO DIAS
Data: 02/08/2024 12:45:41-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Fernando Jorge Monteiro Dias, D.Sc.
Faculdade de Engenharia - UERJ

Documento assinado digitalmente
gov.br LEONARDO DE ARRUDA BITENCOURT
Data: 02/08/2024 13:56:20-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Leonardo de Arruda Bitencourt, D.Sc.
Faculdade de Engenharia - UERJ

Documento assinado digitalmente
gov.br BRUNO HENRIQUES DIAS
Data: 08/08/2024 00:41:39-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Bruno Henriques Dias, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus filhos, João Pedro e Mariana.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pela vida e oportunidade de concluir essa etapa da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho, cujas valiosas orientações, contribuições e apoio fizeram grande diferença.

Ao meu coorientador, Prof. Luiz Artur Pecorelli Peres, imprescindível à realização deste trabalho, o qual reconheço como meu referencial no segmento e tenho grande admiração. Seu enorme entusiasmo e dedicação sem igual, foram essenciais à evolução deste trabalho.

Aos membros das bancas de qualificação e defesa pela disponibilidade.

Ao Prof. Washington da Costa (*in memoriam*), e o Eng. Elifas Gurgel pelo apoio sobre o tema na época de minha graduação, que formaram a base do meu conhecimento sobre o tema.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UERJ, pelos conhecimentos transmitidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio. Código de Financiamento 001.

Nunca tenha medo de tentar algo novo. Lembre-se de que um amador solitário construiu a Arca. Um grande grupo de profissionais construiu o Titanic.

Luís Fernando Veríssimo

O primeiro passo é estabelecer que algo é possível. Então a probabilidade irá ocorrer.

Elon Musk

RESUMO

SANTOS, Juan Carlos Azeredo Coutinho dos. *Análise técnico-econômica de conversão de caminhões de pequeno porte a combustão interna para tração elétrica com geração fotovoltaica*. 2024. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

De acordo com o último Balanço Energético Nacional de 2023, o setor de Transportes consome a maior quantidade de energia utilizada no Brasil. Quase metade deste total é proveniente da utilização de óleo diesel, mostrando a alta dependência desse setor em relação aos combustíveis fósseis. O emprego da tração elétrica no Brasil é adequado, uma vez que a produção de eletricidade no país é predominantemente renovável. Este trabalho tem por objetivo contribuir para o aumento da eficiência energética e para a redução da emissão de gases de efeito estufa e de vários poluentes. Esta abordagem foi a base para a elaboração deste trabalho, que descreve uma metodologia para a conversão de caminhões urbanos de carga, com motor de combustão interna, em tração elétrica, o chamado "*retrofit*", incluindo a frenagem regenerativa e painel fotovoltaico no teto do baú, visando uma maior autonomia. Cálculos teóricos foram elaborados para estabelecer um código em MATLAB, que permite introduzir os dados originais do caminhão a combustão interna e obter os valores necessários para selecionar o motor elétrico mais adequado, disponível no mercado, visando substituir o motor original. Por fim, realizou-se uma análise técnico-econômica, comparando o caminhão convertido com sua versão a diesel e também com um caminhão elétrico novo de mesma categoria. Como resultado, concluiu-se pela viabilidade da conversão. Assim, o "*retrofit*" proposto permite a eletrificação de frotas existentes, o que proporciona um novo mercado de trabalho e uma opção técnica viável para acelerar a transição para a mobilidade sustentável em caminhões para transporte de mercadorias.

Palavras-chave: Veículo elétrico; Conversão de tração; Eficiência energética; Painel fotovoltaico.

ABSTRACT

SANTOS, Juan Carlos Azeredo Coutinho dos. *Technical-economic analysis of conversion small trucks from internal combustion to electric traction with photovoltaic generation*. 2024. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

According to the latest National Energy Balance of 2023, the Transportation sector is the one that consumes the largest amount of energy used in Brazil. Almost half of this total comes from diesel oil, showing the high dependence of this sector on fossil fuels. The use of electric traction in Brazil is appropriate since electricity production in the country is predominantly renewable. This work aims to contribute to increasing energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions and various pollutants. This approach was the basis for the elaboration of this work, which describes a methodology for the conversion of urban freight trucks, with internal combustion engine, to electric traction, the so-called "retrofit", including regenerative braking and a photovoltaic panel on the roof of the truck, aiming at greater autonomy. Theoretical calculations were prepared to establish a code in MATLAB, which allows introduce the internal combustion truck original data and to obtain the necessary values to select the most suitable electric motor available on the market, to replace the original engine. Finally, a technical-economic analysis was carried out, comparing the converted truck with its diesel version and also with a new electric truck of the same category. As a result, it was concluded that the conversion was viable. Thus, the proposed retrofit allows the electrification of existing fleets, which provides a new labor market and a viable technical option to accelerate the transition to sustainable mobility in freight trucks.

Keywords: Electric vehicle; Road vehicle traction conversion; Energy efficiency; Photovoltaic panel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo de energia por setores econômicos em 2022	20
Figura 2 - Participação percentual dos combustíveis consumidos pelo setor	20
Figura 3 - Emissões brasileiras de CO ₂ -eq.....	21
Figura 4 - Fornecimento total de eletricidade por fonte	21
Figura 5 - Itens retirados no <i>retrofit</i>	23
Figura 6 - Itens instalados no <i>retrofit</i>	23
Figura 7 - Veículo elétrico à bateria.....	30
Figura 8 - Veículo Elétrico Híbrido Série	31
Figura 9 - Veículo Elétrico Híbrido Paralelo	32
Figura 10 - Veículo Elétrico à Célula Combustível	33
Figura 11 - Veículo Elétrico à Célula Combustível à Etanol	34
Figura 12 - Trólebus	34
Figura 13 – Protótipo de carro solar da Honda.....	35
Figura 14 - Diagrama dos motores utilizados em veículos elétricos.....	36
Figura 15 - Motor CC.....	37
Figura 16 - Motor AC modelo AC-51 para VE	38
Figura 17 - Frenagem Regenerativa	40
Figura 18 - Motor CC com Controlador	43
Figura 19 - Motor CA com Inversor	43
Figura 20 - Demonstração Modulação DC por	44
Figura 21 - Controlador DC	44
Figura 22 - Controlador AC (Inversor de Frequência)	45
Figura 23 - Tipos de conectores mais usados.....	49
Figura 24 – Cabo para carregar veículo elétrico	51
Figura 25 – Relação conector e potência	51
Figura 26 - Tipos de carregadores para veículos elétricos.....	52
Figura 27 - Ligação em paralelo de células fotovoltaicas	56
Figura 28 - Ligação em série de células fotovoltaicas	57
Figura 29 - Possível ligação para um diodo by-pass entre células.....	57
Figura 30 - Diodo de bloqueio	58
Figura 31 - Curvas características dos módulos	59

Figura 32 - Efeitos causados pela variação de intensidade luminosa e pela temperatura	60
Figura 33 - As forças que atuam sobre um veículo em rampa	61
Figura 34 - Arrasto de forma na resistência aerodinâmica	63
Figura 35 - Coeficientes de arrasto em função da forma do veículo	64
Figura 36 - Medida de pneu	66
Figura 37 – Hyundai HR.....	69
Figura 38 - Diagrama de um veículo elétrico fotovoltaico.....	70
Figura 39 – Interface de usuário.....	72
Figura 40 - Motor AC-35X2 e inversor 1238SE-7971	73
Figura 41 - Gráfico do motor AC-35X2.....	73
Figura 42 - Exemplo de uma conversão.....	74
Figura 43 – Gráfico do ciclo de condução urbana (CCU) da NBR 6601:2021	75
Figura 44 - Bateria LiFePO4 48 V 200 Ah	77
Figura 45 - Banco de baterias	77
Figura 46 – Cálculo no Matlab com nova massa.....	79
Figura 47 – Valor futuro da Caderneta de Poupança do período de 10 anos	92
Figura 48 – Fluxograma do processo de conversão	100
Figura 49 - Potencial Solar - SunData v 3.0	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos para o coeficiente de resistência ao rolamento.....	63
Tabela 2 - Parâmetros para o veículo elétrico.....	70
Tabela 3 - Dados de catálogo do Hyundai HR.....	71
Tabela 4 – Consumo de energia por km.....	76
Tabela 5 – Autonomia.....	77
Tabela 6 – Componentes a serem substituídos.....	78
Tabela 7 – Componentes a serem instalados.....	78
Tabela 8 – Comparação de pesos e capacidade.....	79
Tabela 9 – Comparação de eficiência e emissões.....	80
Tabela 10 - Características do painel CS6R-445H-AG 445W, conforme ficha técnica do fabricante.....	81
Tabela 11 - Valores de n	82
Tabela 12 - Produção média mensal de energia por hora prevista (Wh) pelo painel fotovoltaico.....	84
Tabela 13 – Preço médio Hyundai HR 2.5 a Diesel.....	85
Tabela 14 – Valores de componentes.....	86
Tabela 15 – Valores de venda dos componentes usados.....	86
Tabela 16 – Comparativo de rendimento.....	87
Tabela 17 – Tabela de custos de investimento.....	87
Tabela 18 – Comparação VUC elétrico convertido x VUC diesel x VUC elétrico.....	88
Tabela 19 - Percentuais para o Hyundai HR 2013 convertido.....	89
Tabela 20 - Percentuais para o Hyundai HR 2023 diesel.....	89
Tabela 21 – Desvalorização anual e custos do Hyundai HR 2013 convertido.....	90
Tabela 22 – Desvalorização anual e custos do Hyundai HR 2023 diesel.....	90
Tabela 23 – Faturamento mensal com veículo convertido e a diesel.....	91
Tabela 24 – Fluxo de caixa.....	94
Tabela 25 - Comparação do VPL do veículo elétrico convertido e do veículo a diesel.....	94
Tabela 26 - Comparação do TIR do veículo elétrico convertido e do veículo a diesel.....	95
Tabela 27 – Comparativo de rendimento JAC iEV350T x veículo diesel.....	96

Tabela 28 - Desvalorização anual e custos do JAC iEV350T	96
Tabela 29 - Faturamento mensal com JAC iEV350T x veículo diesel.....	97
Tabela 30 - Fluxo de caixa JAC iEV350T x veículo diesel	97
Tabela 31 – Comparação do VPL e TIR do JAC iEV350T x veículo diesel.....	98
Tabela 32 - r_t = fração da radiação solar incidente na hora i em relação a radiação solar incidente no	122
Tabela 33 – Irradiação solar diária	122
Tabela 34 - Dados horários de Radiação solar (kWh/m^2) – Energia	123
Tabela 35 - Radiação Solar Horária Média (W/m^2) – Potência	123
Tabela 36 - Médias Mensais Horárias da Temperatura [$^{\circ}C$] (Média 2010 a 2020), calculadas a partir	123
Tabela 37 - Dados do catálogo do painel CS6R-445H-AG 445W	123
Tabela 38 - Temperatura horária da célula fotovoltaica	124
Tabela 39 - Potência Máxima na Irradiação de $1000 W/m^2$	124
Tabela 40 - Eficiência horária do painel fotovoltaico	124
Tabela 41 - Produção horária do painel fotovoltaico (kWh).....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Anti-lock Braking System
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Alternating Current
A _F	Area frontal
Al	Alumínio
CA	Corrente alternada
CBIE	Centro Brasileiro de Infraestrutura
CC	Corrente Contínua
CCS	Combined Charging System
C _D	Coeficiente de arrasto
CdTe	Telureto de Cádmio
CH ₄	Metano
CIGS	Cu(In,Ga)Se ₂
CIS	CuInSe ₂ – Disseleneto de Cobre
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
COVID	COrona Virus Disease
CTB	Código de Trâo Brasileiro
DC	Direct Current
DETRAN	Departamento Estadual de Trânsito
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FMI	Fundo Monetário Internacional
F _{AD}	Força para vencer a resistência aerodinâmica
F _D	Força para vencer a resistência de inclinação
F _i	Força para vencer a inércia
F _R	Força para vencer a resistência ao rolamento
F _{TR}	Força de tração total
GaAs	Arseneto de Gálio
GNV	Gás Natural Veicular

HC	Hidrocarbonetos
HFCs	Hidrofluorcarbonetos
HJT	Heterojunção de alta eficiência
HPEVS	Hi Performance Electric Vehicle Systems
I_D	Corrente do Diodo
IEC	International Eletrotechnical Comission
I_{mp}	Corrente de Potência Máxima
In	Índio
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
Ipen	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
I_{ph}	Fotocorrente
I_{sc}	Corrente de Curto Circuito
JIT	Just-in-time
LiFePo ₄	Lítio Ferro Fosfato
Li-ion	Lítio-Íon
MCI	Motor de Combustão Interna
M_e	Massa equivalente
M_v	Massa do veículo
NF ₃	Trifluoreto de Azoto
Ni-MH	Hidreto metálico de níquel
NO	Óxidos de Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
η_T	Rendimento da transmissão
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PFCs	Perfluorcarbonetos
P_m	Potência Máxima
R_m	Rotação no motor
RPM	Rotações por minuto
R_p	Resistência dos cristais da junção p-n
R_R	Rotação nas rodas
R_s	Resistência dos contatos metálicos entre as células
R_T	Relação de transmissão
Sb	Antimônio
SF ₆	Hexafluoreto de Enxofre

Si	Silício
T_m	Torque do motor
T_R	Torque nas rodas
VE	Veículo Elétrico
VEB	Veículo Elétrico à Bateria
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
V_{mp}	Tensão de Potência Máxima
V_{oc}	Tensão de Circuito Aberto
VUC	Veículo Urbano de Carga
ω_R	Velocidade angular na roda
ω_m	Velocidade angular no motor

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
$a(t)$	Aceleração do veículo
t	Tempo
g	Aceleração da gravidade
K	Coefficiente de resistência ao rolamento
kg	Quilograma
kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
km/h	Quilometro por hora
km/l	Quilometro por litro
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
M Mb/d	Milhões de barris por dia
m	Metro
m/s^2	Metro por segundo ao quadrado
m^2	Metro quadrado
mm	Milímetros
N	Newton
N/m	Newton por metro
r	Raio do pneu
rad/s	Radiano por segundo
s	Segundos
V	Volts
$v(t)$	Velocidade de deslocamento
W	Watt
Wh	Watt hora
W/m^2	Watt por metro quadrado
°C	Grau Celsius
ρ	Massa específica do ar

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
Objetivo	22
Metodologia	24
Estrutura do trabalho	25
ESTADO DA ARTE	26
1. REVISÃO TEÓRICA	29
1.1. Classificação dos veículos elétricos rodoviários	29
<u>1.1.1. Veículo Elétrico à Bateria (VEB)</u>	<u>29</u>
<u>1.1.2. Veículo Elétrico Híbrido (VEH) e Híbrido <i>Plug-in</i> (VEHP)</u>	<u>30</u>
1.1.2.1. VEH Série	31
1.1.2.2. VEH Paralelo	31
<u>1.1.3. Veículo Elétrico de Célula Combustível</u>	<u>32</u>
<u>1.1.4. Trólebus</u>	<u>34</u>
<u>1.1.5. Veículo Solar</u>	<u>35</u>
1.2. Componentes de um veículo elétrico à bateria – VEB	35
<u>1.2.1. Motor Elétrico</u>	<u>36</u>
1.2.1.1. Motor de Corrente Contínua	37
1.2.1.2. Motor de Corrente Alternada.....	37
<u>1.2.2. Frenagem Regenerativa</u>	<u>39</u>
<u>1.2.3. Controlador</u>	<u>42</u>
1.2.3.1. Funcionamento dos controladores	43
<u>1.2.4. Bateria</u>	<u>45</u>
1.2.4.1. Baterias recarregáveis	46
1.3. Dispositivos de abastecimento do veículo elétrico	47
<u>1.3.1. Conector de abastecimento do veículo elétrico</u>	<u>48</u>
<u>1.3.2. Potência do cabo</u>	<u>50</u>
<u>1.3.3. Estações de recarga</u>	<u>51</u>
1.3.3.1. Tipos de carregadores para veículos elétricos.....	52
1.3.3.1.1. Carregador de emergência.....	53
1.3.3.1.2. Carregador portátil.....	53
1.3.3.1.3. Carregador <i>Wallbox Standard</i> (sem função Smart).....	53

1.3.3.1.4.	Carregador <i>Wallbox/ Parking</i> (com função <i>Smart</i>)	54
1.3.3.1.5.	Carregador de Carga Rápida CC/ Eletroposto	54
1.4.	Painéis fotovoltaicos	55
<u>1.4.1.</u>	<u>Células fotovoltaicas de silício</u>	<u>55</u>
<u>1.4.2.</u>	<u>Módulos fotovoltaicos</u>	<u>56</u>
<u>1.4.3.</u>	<u>Características elétricas dos módulos fotovoltaicos</u>	<u>58</u>
2.	DINÂMICA VEICULAR.....	61
2.1.	Força de tração total.....	62
<u>2.1.1.</u>	<u>Força de resistência ao rolamento.....</u>	<u>62</u>
<u>2.1.2.</u>	<u>Força de resistência aerodinâmica</u>	<u>63</u>
<u>2.1.3.</u>	<u>Força de resistência ao plano inclinado</u>	<u>64</u>
<u>2.1.4.</u>	<u>Força de inércia</u>	<u>65</u>
2.2.	Torque.....	65
2.3.	Rotação.....	67
2.4.	Velocidade angular	68
2.5.	Potência no motor	68
3.	MODELAGEM DO SISTEMA DE TRAÇÃO	69
3.1.	Parâmetros de projeto	70
3.2.	Cálculos da potência do motor.....	71
3.3.	Deslocamento	74
3.4.	Banco de baterias	76
3.5.	Massa dos componentes	78
3.6.	Eficiência e emissões	80
4.	PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA PELO PAINEL FOTOVOLTAICO	81
5.	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	85
5.1.	Análise econômica do investimento e do aspecto da conversão para tração elétrica.....	85
5.2.	Estimativa dos custos	89
5.3.	Cálculo do faturamento	90
5.4.	Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	91
5.5.	Métodos de avaliação de projetos de investimento	93
<u>5.5.1.</u>	<u>Método do Valor Presente Líquido (VPL).....</u>	<u>93</u>
<u>5.5.2.</u>	<u>Método da Taxa Interna de Retorno (TIR).....</u>	<u>94</u>

5.6.	Comparação entre JAC iEV350T e veículo Diesel.....	95
6.	LEGALIZAÇÃO, NORMAS E POLÍTICAS PÚBLICAS.....	99
6.1.	Legalização.....	99
6.2.	Normas.....	100
6.3.	Políticas públicas.....	102
	CONCLUSÃO	104
	Trabalhos futuros.....	105
	REFERÊNCIAS.....	107
	APÊNDICE A – CÁLCULOS DA POTÊNCIA DO MOTOR	114
	APÊNDICE B – CÁLCULOS PARA PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA PELO PAINEL FOTOVOLTAICO	122

INTRODUÇÃO

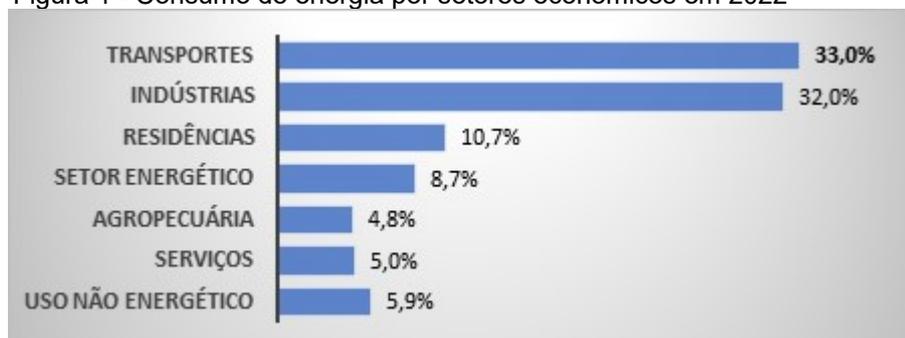
A procura de transporte urbano de mercadorias aumentou significativamente devido ao crescimento populacional das cidades, juntamente com a maior disseminação do comércio eletrônico e novos princípios de gestão, como o chamado "*just-in-time*", conhecido pelo acrônimo "JIT". Trata-se de um processo que exige uma previsão do momento certo, da quantidade suficiente e da localização correta, bem como a introdução de novas tecnologias generalizadas (Perboli; Rosano, 2019).

Volumes cada vez maiores de comércio eletrônico, registraram uma taxa de crescimento global de 23,3% em 2018. A pandemia de COVID-19 deu origem a enormes volumes de encomendas que exigem entregas diárias, especialmente nas grandes zonas urbanas. São necessários cada vez mais veículos de entrega para percorrer a "última milha" até aos clientes (Schwerdfeger; Boysen, 2020). Este cenário mantém-se atualmente.

Devido à crescente circulação de caminhões nas zonas urbanas, as cidades modernas enfrentam congestionamentos, falta de espaço público, poluição atmosférica e sonora, o que afeta a qualidade de vida. De acordo com Janjevic, Knoppen, Winkenbach (2019), as atividades de logística urbana de mercadorias têm um impacto considerável em três aspectos diferentes da sustentabilidade: o econômico, porque há prejuízo para a eficiência e os custos das operações, o ambiente devido às emissões de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$) e o social, devido ao congestionamento. O símbolo $\text{CO}_2\text{-eq}$ considera todos os gases com efeito de estufa, ou seja, os sete gases com efeito de estufa diretos previstos no Protocolo de Quioto: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs), hexafluoreto de enxofre (SF_6), trifluoreto de azoto (NF_3). Há também danos consideráveis à saúde humana dos habitantes dos centros urbanos e custos associados aos órgãos de saúde pública decorrentes das contaminações do ar e que afetam os seus habitantes, principalmente crianças e idosos. Isto ocorre, por exemplo, devido à grande incidência do monóxido de carbono (CO) e do material particulado (MP) oriundo dos veículos à combustão interna, que se aloja, no pulmão podendo causar câncer, como citado em "Poluição atmosférica e saúde humana" (Braga *et al.*, 2001).

De acordo com o último Balanço Energético Brasileiro, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), o Setor de Transportes consome a maior quantidade de energia no Brasil, 33% (Figura 1).

Figura 1 - Consumo de energia por setores econômicos em 2022

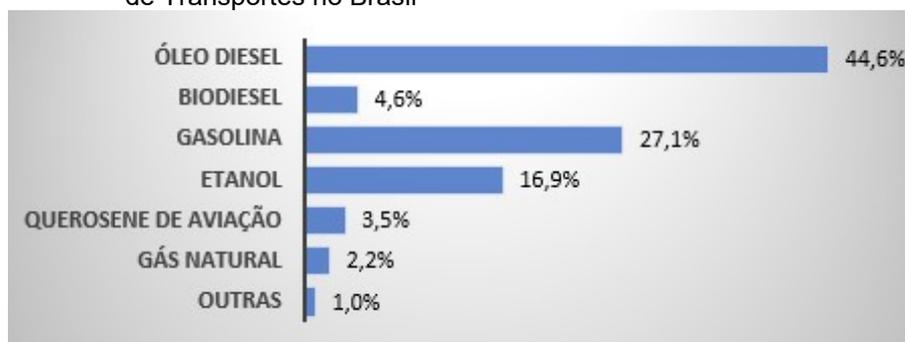


Fonte: EPE, 2023.

Na prática, quase 1/3 da energia brasileira é utilizada pelo setor de Transportes e aproximadamente a metade vem do óleo Diesel, com 44,6%. De fato, há uma alta dependência de combustíveis fósseis.

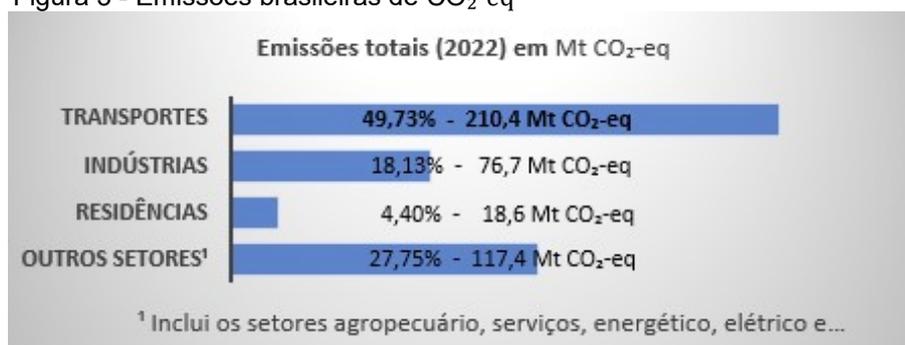
A Figura 2 mostra as participações percentuais dos combustíveis consumidos no setor de Transportes no Brasil em 2022 (EPE, 2023). O óleo diesel é o maior e é utilizado para abastecer caminhões e ônibus, seguido da gasolina com 27,1%, em geral, para abastecer automóveis.

Figura 2 - Participação percentual dos combustíveis consumidos pelo setor de Transportes no Brasil



Fonte: EPE, 2023.

Conseqüentemente, o setor de transportes também se destaca nas emissões de CO₂-eq, com 49,73% das emissões totais (Figura 3).

Figura 3 - Emissões brasileiras de CO₂-eq

Fonte: EPE, 2023.

Apesar do setor de transporte brasileiro estar concentrado em veículos rodoviários com motores a combustão e, portanto, apresentar baixa eficiência e altas emissões de CO₂-eq, é importante mencionar que o Brasil ocupa uma posição privilegiada mundialmente no setor de energia elétrica. As fontes renováveis representam 86,1% da oferta doméstica de eletricidade no país com destaque para as hidrelétricas, que respondem por 61,9% e o uso de energia eólica e solar é crescente conforme mostra a Figura 4 de acordo com (EPE, 2023).

Figura 4 - Fornecimento total de eletricidade por fonte



Fonte: EPE, 2023.

Com base nos dados atuais apresentados, o investimento e uso da tração elétrica no Brasil é adequado uma vez que a produção de energia elétrica no país é predominantemente renovável. Outro argumento favorável à eletrificação do transporte no Brasil se deve à extensa rede elétrica do país, totalmente interligada, entretanto, segundo Paixão, Sausen, Abaide (2024), estudos vêm sendo feitos para investigar os impactos no sistema de distribuição.

Nesse contexto, os veículos elétricos surgem como uma alternativa para o transporte urbano sustentável de cargas. Adicionalmente, os veículos elétricos podem

ser supridos de eletricidade durante a noite, com uso de carregadores inteligentes (função *Smart*), quando há uma grande capacidade ociosa, não havendo, em geral, necessidade de expansão imediata da capacidade nacional de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Segundo Guimarães (2022), em seu trabalho sobre análise do impacto dos veículos elétricos no sistema de energia elétrica, suas simulações mostram a possibilidade de utilizar baterias de veículos elétricos para armazenar energia excedente advindas de fontes renováveis, que pode então ser exportada para a rede elétrica, contribuindo com a necessidade do sistema.

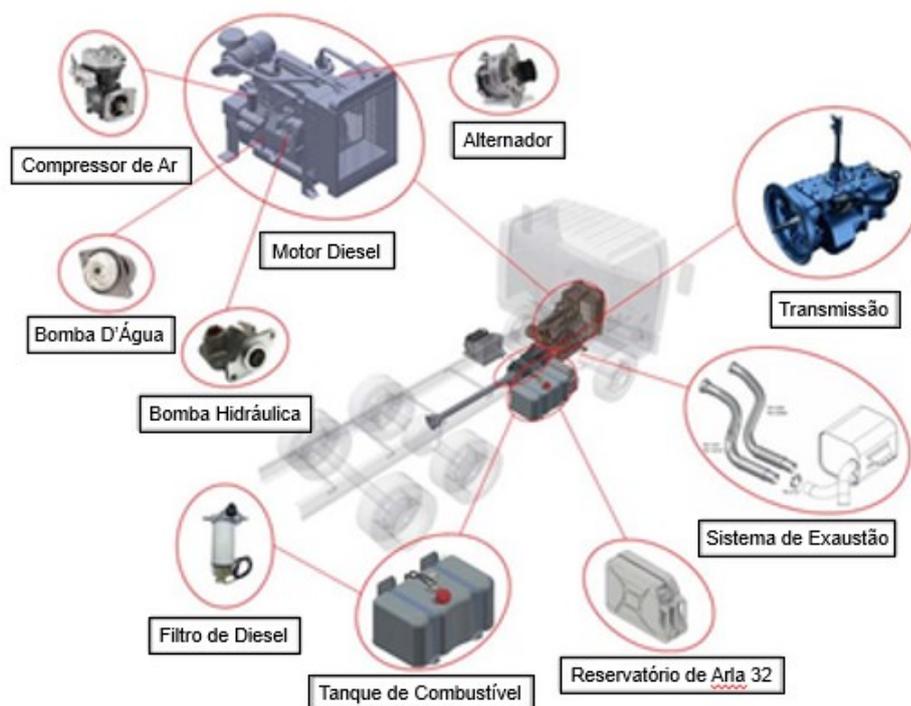
Objetivo

Este trabalho abordará o *retrofit*, que é uma técnica de transformação de veículos movidos a combustão interna em veículos elétricos, através da substituição do motor de combustão e demais componentes mecânicos por um motor elétrico, um conjunto de baterias de alta capacidade e outros periféricos complementares.

Apesar da forte tendência de eletrificação no segmento do transporte, os novos veículos ainda têm um custo elevado, por motivos diversos, que dependem, por exemplo, de uma política de incentivo a esse tipo de motorização para caminhões, da disponibilidade de pontos de recarga que tragam mais autonomia, entre outros. Assim, a conversão ou *retrofit* surge como uma opção para transformar as frotas existentes de caminhões a diesel em um veículo elétrico com investimento menor, se comparado ao valor de um modelo elétrico novo. Nesse processo, a partir de um veículo a diesel que está no final da vida útil, é possível retirar todos componentes atrelados ao sistema de tração a combustão interna e elaborar um novo projeto eletrificado, conforme ilustrado (Figuras 5 - 6).

Figura 5 - Itens retirados no *retrofit*

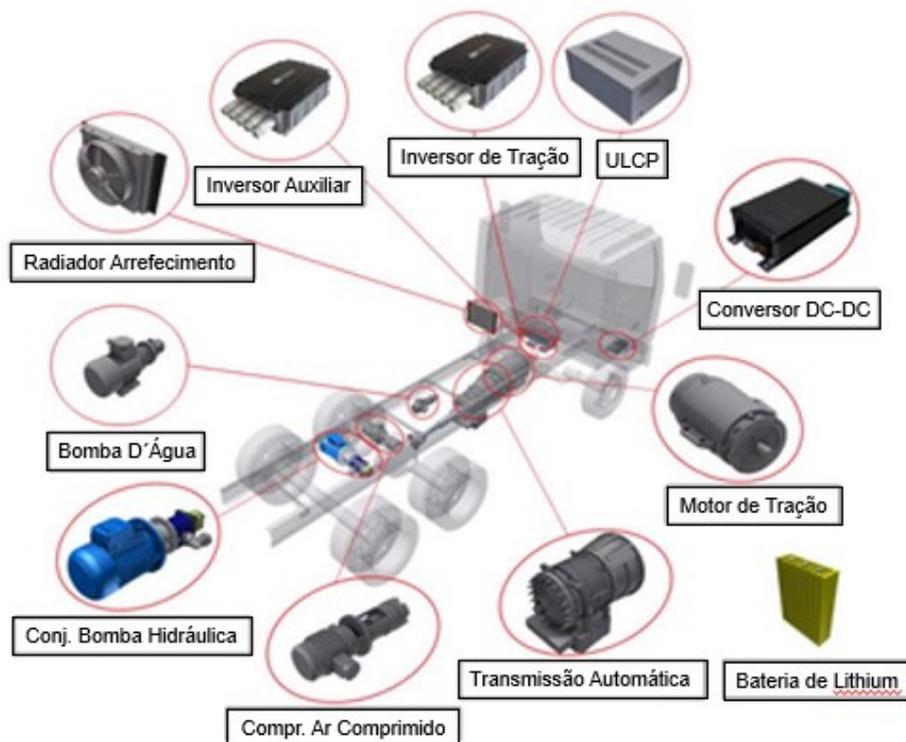
O QUE SAI DO SISTEMA DE TRAÇÃO DIESEL



Fonte: Bandeira, 2021.

Figura 6 - Itens instalados no *retrofit*

O QUE ENTRA NO SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA



Fonte: Bandeira, 2021.

Além da vantagem de eliminar a emissão de poluentes via o cano de descarga, o *retrofit* reaproveita as frotas existentes, deixando de vender caminhões antigos, interrompendo, assim, o ciclo de emissões. Também valoriza a marca das empresas que passam a utilizar frotas elétricas, além da economia na manutenção e combustível, reduzindo os custos do frete.

Metodologia

Foram pesquisados os tipos de veículos elétricos existentes, os componentes de um veículo elétrico a bateria, células fotovoltaicas e a modelagem de um veículo elétrico com painel fotovoltaico.

Como base para a modelagem, foi considerado o veículo comercial leve da Hyundai, modelo HR. De fato, ele é projetado principalmente para fins de transporte de cargas e também é amplamente utilizado em grandes centros urbanos para diversas aplicações, o que o torna uma ótima opção para o transporte urbano de mercadorias nas grandes cidades.

Com o objetivo de utilizar a frenagem regenerativa, método esse que recupera energia durante as frenagens, optou-se por utilizar o motor de corrente alternada.

Feitos os cálculos teóricos, um código em MATLAB foi criado, com interface gráfica, de modo a permitir a introdução dos dados originais do caminhão a combustão interna e obter os valores necessários para selecionar o motor elétrico mais adequado. Com isso, após uma pesquisa no mercado, foi selecionado um conjunto motor inversor para substituir o motor original.

Para determinação do banco de baterias, utilizou-se primeiramente o Ciclo de Condução Urbana (CCU) na NBR 6601:2021 baseado na recomendação da NBR 17142:2023 que trata do método de ensaio para consumo de energia e autonomia em veículos rodoviários elétricos leves. Com base nos dados obtidos e as informações de tensão e corrente necessários para o conjunto motor inversor selecionados, foi dimensionado o banco de baterias.

Na sequência, com base na dimensão disponível do teto do baú do caminhão, foram selecionados dois painéis fotovoltaicos de modo a ter o máximo aproveitamento de espaço e melhor produção de energia. Após calcular a produção média mensal de energia por hora prevista pelos painéis fotovoltaicos, foi constatado um possível

aumento 6,94% na autonomia ou a utilização dessa energia para alimentar dispositivos elétricos auxiliares instalados no veículo.

Após a parte técnica, uma análise de viabilidade econômica é apresentada, comparando o caminhão convertido com sua versão original a diesel. Utilizando a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e os métodos do Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), foi possível constatar a viabilidade da conversão.

Estrutura do trabalho

Após apresentação e contextualização do problema nesse capítulo de introdução, este trabalho foi organizado em seis capítulos, cuja estrutura está descrita a seguir:

O capítulo 1 apresenta uma revisão teórica sobre classificação dos veículos elétricos, componentes, dispositivos de abastecimento e painéis fotovoltaicos.

No capítulo 2 é feita a revisão da dinâmica veicular, onde são apresentados os componentes da força de tração, torque, rotação, velocidade angular e potência no motor.

O capítulo 3 apresenta a modelagem do sistema de tração, através do desenvolvimento da dinâmica veicular associada ao veículo selecionado para conversão e também por meio de um código desenvolvido em MATLAB para obter os dados necessários para escolher um motor elétrico equivalente adequado para substituir o motor de combustão interna original.

No capítulo 4 é calculada a produção média mensal de energia fotovoltaica por hora prevista para os painéis instalados no teto do baú do veículo selecionado.

O capítulo 5 aborda a análise de viabilidade econômica da eletrificação do veículo selecionado.

No Capítulo 6 são apresentados os procedimentos para legalização e apresentados alguns projetos de lei em tramitação, com destaque para o PL 2156/2021 que no artigo 3, item VI trata da adoção de medidas que facilitem a transformação de veículos elétricos e no item VIII trata do fomento a realização de estudos da viabilidade de conversão da frota de veículos à combustão para o sistema elétrico.

ESTADO DA ARTE

Um automóvel, referindo-se a um objeto responsável por sua própria locomoção, é um veículo motorizado de quatro rodas, geralmente destinado ao transporte de passageiros ou mercadorias, sendo um dos meios de transporte mais populares do mundo.

Consequentemente, a sociedade se beneficiou dessa invenção desde o final do século XIX, quando seu início é datado. Ao longo de mais de um século o automóvel evoluiu muito e foram introduzidas modificações da invenção, como caminhões, vans e outros veículos utilitários, que ampliaram as finalidades mantendo os mesmos princípios técnicos.

A crise preponderante dos combustíveis fósseis, aliada a razões ecológicas na procura de energia limpa e renovável, tornaram lógico investir no estudo e desenvolvimento de combustíveis e tecnologias alternativas, renováveis e limpas, para atender às crescentes necessidades da sociedade de transporte rodoviário da sociedade. Um breve resumo desta situação de acordo com o Centro Brasileiro de Infraestrutura (CBIE) vem explicada a seguir:

Na década de 1970, o setor de petróleo passou por duas crises de preços, que de tão surpreendentes e impactantes, alteraram o mercado para sempre. ... A formação da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) durante a década de 1960 para restringir a oferta no mercado internacional e sustentar os preços do petróleo foi uma das origens da primeira crise, em 1973. Historicamente, embora o Irã tenha sido o país no Oriente Médio pioneiro a ter sucesso na exploração e produção do petróleo já entre as décadas de 1920-30, a Arábia Saudita tomou o protagonismo na região após as descobertas de enormes campos após a segunda guerra mundial. De fato, a Arábia se tornou um dos maiores produtores não somente no Oriente Médio, mas também do mundo, já na década de 1960. A produção saudita passou de 1 milhão de barris por dia (MM b/d) em 1955, para 2 MM b/d em 1965 e alcançou 8 MM b/d antes de 1975. Nesse meio tempo, tanto a Arábia Saudita quanto o Irã e outros países do Oriente Médio, como o Kuwait e o Iraque, foram se tornando os maiores exportadores líquidos de petróleo no mundo. Enquanto isso, o maior produtor mundial à época, os Estados Unidos, também eram o maior consumidor. Para piorar, o país passou a enfrentar queda na produção a partir do início dos anos 1970 ao mesmo tempo que o consumo disparava. Isso significa que os EUA ficaram ainda mais dependentes da importação do Oriente Médio e outros países da OPEP. Para entender a crise de preços, é preciso considerar o contexto político da época. Durante a Guerra do Yom Kippur, os Estados Unidos e países europeus declararam apoio a Israel contra Egito e Síria. Os países árabes retaliaram embargando a exportação de petróleo para os EUA e Europa, o que causou o preço do barril a subir de US\$/b 2,90 no final de 1973 para US\$/b 11,65 no início do ano seguinte. Após o preço se estabilizar por alguns anos em um pouco acima de US\$ 10 por barril, em 1978-1979 um novo evento político abalou os mercados, a Revolução Iraniana. Apesar de afetar o suprimento de

apenas 9% da oferta global, um pânico generalizado resultou em elevação acentuada dos preços e novas recessões nos países importadores. Em 1980, a Guerra Irã-Iraque causou ainda mais preocupação nos mercados, levando o preço para uma média anual de US\$/b 38 (Centro Brasileiro de Infraestrutura, 2020).

Esta situação teve graves consequências para o Brasil que não dispendo de petróleo suficiente sofreu forte abalo no seu balanço de pagamentos internacionais obrigando a contrair empréstimos com o FMI. Merece comentar que o Brasil, um país de dimensões continentais é altamente dependente de combustíveis fósseis devido ao setor de Transportes ser majoritariamente concentrado até a presente data no Modal Rodoviário (EPE, 2023).

Na busca pela mobilidade sustentável, a sociedade e o meio acadêmico tiveram seus papéis significativos. No Brasil, Pecorelli Peres *et al.* (2007), Costa (2009), Santos (2012), Gurgel (2018), Silva (2021), Santos (2022) e Santos (2023) mostraram em seus trabalhos ser viável a conversão de veículos mais antigos, como sendo uma atividade econômica promissora.

O setor logístico foi contemplado pelos estudos de Dallepiane (2021), Barros (2021) e Lima (2021) com os estudos de impacto, oportunidades de implementação e benefícios da utilização da eletrificação no transporte de cargas. Já Figueiredo (2021) e Myers (2021) abordaram a viabilidade financeira e econômica do uso de veículos elétricos no transporte urbano de cargas. Já Silva, Pizzolato (2022) complementam com sua pesquisa sobre as principais políticas públicas internacionais voltadas para a expansão da frota de veículos elétricos para o transporte rodoviário de cargas.

Atualmente, os veículos elétricos estão em um estado avançado de desenvolvimento, com a tecnologia sendo aprimorada continuamente para melhorar a eficiência, a autonomia e a confiabilidade. Uma das principais áreas de foco é o desenvolvimento de baterias mais leves, potentes e duráveis, que possam permitir que os veículos percorram maiores distâncias sem a necessidade de recarga.

Outro aspecto importante é a infraestrutura de carregamento, que precisa ser expandida para tornar a adoção de veículos elétricos mais viável. Muitos países já estão investindo em redes de carregamento de alta potência, incluindo estações de recarga rápida em rodovias e em áreas urbanas.

Os veículos elétricos também estão se tornando mais acessíveis e variados em termos de modelos e tipos. Atualmente, há opções de veículos elétricos para diversos

usos, desde carros compactos para ambiente urbano até caminhões e ônibus para transportes de cargas e passageiros.

Além disso, muitos governos estão incentivando a adoção de veículos elétricos por meio de políticas e subsídios, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa e melhorar a qualidade do ar nas cidades. O Brasil é um candidato natural para a introdução de veículos elétricos rodoviários, pois possui uma matriz energética extremamente favorável, com abundantes fontes hídricas, eólicas e solares.

No entanto, ainda há desafios a serem superados, como a questão do preço das baterias e a dependência de matérias-primas escassas, como o lítio. Também é necessário avançar na reciclagem das baterias e na gestão adequada de seu descarte.

Assim, os veículos elétricos estão em um estado avançado de desenvolvimento e há um grande potencial para revolucionar o setor de transporte. Com o avanço contínuo da tecnologia e a expansão da infraestrutura de carregamento, considera-se a sua penetração no mercado irreversível face o crescimento mundial da frota.

Este trabalho, através de uma análise técnica e econômica, visa contribuir com uma opção viável para acelerar a eletrificação de frotas, que por sua vez incentiva o desenvolvimento da indústria nacional no segmento de componentes para veículos elétricos e abre novas oportunidades no mercado de trabalho.

No capítulo que se segue, será apresentada uma revisão de conceitos teóricos básicos de forma a proporcionar ao leitor um melhor entendimento do tema abordado nesse trabalho.

1. REVISÃO TEÓRICA

O primeiro veículo de transporte terrestre de mercadorias e pessoas foi criado na segunda metade do século XVI e tinha sistema de propulsão a vapor. Posteriormente, foram criados os carros com propulsão elétrica e posteriormente os com motores de combustão interna. Mais recentemente, é possível destacar uma série de iniciativas voltadas para o retorno aos veículos elétricos, como aconteceu na segunda metade da década de 1990, como o EV1 produzido pela General Motors e no início dos anos 2010, o veículo elétrico híbrido da Toyota, Prius, com ampla disponibilidade no mercado global e mais recentemente modelos elétricos da Tesla (Santos, 2020).

1.1. Classificação dos veículos elétricos rodoviários

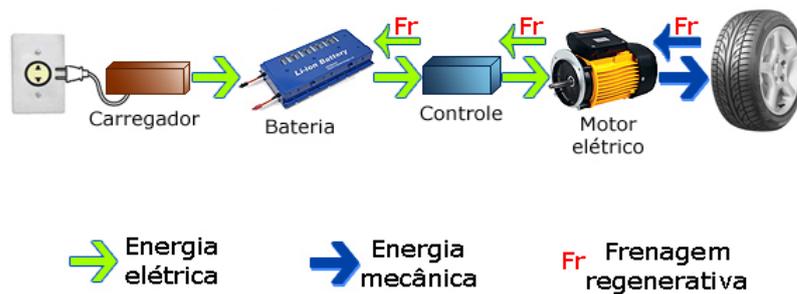
Veículo eletrificado diz respeito a uma gama de tecnologias que usa a eletricidade para impulsionar um veículo terrestre e que dispõe de um *powertrain* ou trem de força.

Os veículos elétricos terrestres que rodam com pneus são classificados quanto à sua “fonte” da energia elétrica que alimenta o motor, ou motores elétricos e pelo acomodamento dos componentes do sistema de tração elétrica. São eles:

1.1.1. Veículo Elétrico à Bateria (VEB)

É um veículo acionado por um ou mais motores elétricos cuja energia é provida por uma bateria ou um arranjo de baterias instaladas a bordo. As baterias são periodicamente recarregadas a partir de rede elétrica ou de outra fonte externa de energia elétrica. Utiliza a “frenagem regenerativa”, que ao acionar o freio para redução de velocidade, transforma a energia cinética do veículo em energia elétrica que é guardada nas baterias. Na Figura 7 é mostrado o esquema de transferência de energias.

Figura 7 - Veículo elétrico à bateria



Fonte: Santos, 2012.

O veículo elétrico à bateria é uma solução já disponível e permite grande economia de energia e emissões nulas no local onde trafegam. No caso brasileiro, cerca de 86,1% da geração de eletricidade é de origem renovável, o que permite reduções de emissões totais (desde a geração de energia elétrica até a rodagem do veículo) muito expressivas, quando se compara o veículo elétrico à bateria com um veículo convencional. A eficiência de veículos elétricos à bateria é de aproximadamente 70%, percentual igual a quase cinco vezes a eficiência de veículos convencionais (14 a 18%) (Santos, 2012). Isso se deve à necessidade de usar um ciclo termodinâmico para conversão de calor em trabalho nos veículos convencionais.

1.1.2. Veículo Elétrico Híbrido (VEH) e Híbrido *Plug-in* (VEHP)

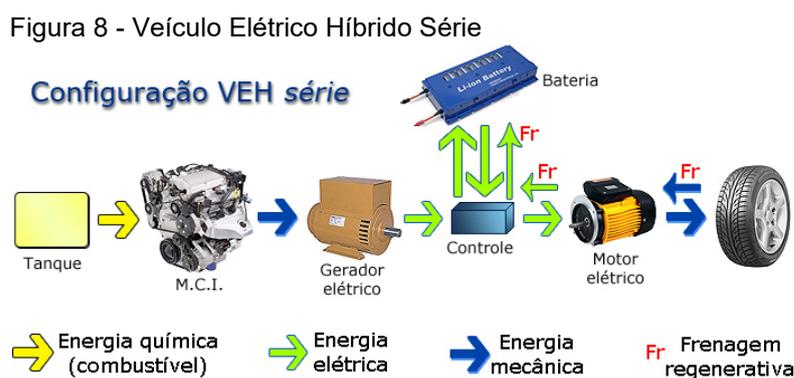
É um veículo acionado por um motor elétrico cuja energia é provida por um gerador e uma bateria ou arranjo de baterias instaladas a bordo. O termo "híbrido" se deve ao fato que no seu acionamento ele conta com um motor de combustão interna (MCI), usado nos veículos convencionais, alimentado por combustível líquido (gasolina, etanol, diesel, etc.) e/ou gasoso (gás natural veicular, etc.) e também um ou mais motores elétricos que acionam as rodas. O conjunto MCI e o gerador de eletricidade alimentam o motor elétrico e recarrega a bateria ou o arranjo de baterias. Utiliza a "frenagem regenerativa", que ao acionar o freio para redução de velocidade, transforma a energia cinética do veículo em energia elétrica que é guardada nas baterias. Entretanto, este arranjo que diminui o volume de baterias por dispor de um MCI é indispensável o cano de descarga e, portanto, há emissões gasosas prejudiciais ao meio ambiente.

Segundo Santos (2020), o veículo elétrico híbrido *plug-in* é um clássico VEH com a possibilidade de recarregar as baterias através da rede elétrica, proporcionando assim uma capacidade adicional de armazenamento de energia.

Os VEHs podem ser classificados com base em sua estrutura ou arranjo, sendo denominados como VEH Série ou VEH Paralelo.

1.1.2.1. VEH Série

No veículo elétrico híbrido série, o motor a combustão aciona o gerador para gerar energia elétrica, e o gerador pode tanto carregar as baterias ou alimentar um motor elétrico que aciona as rodas. Na Figura 8 é mostrado o esquema de transferência de energias.

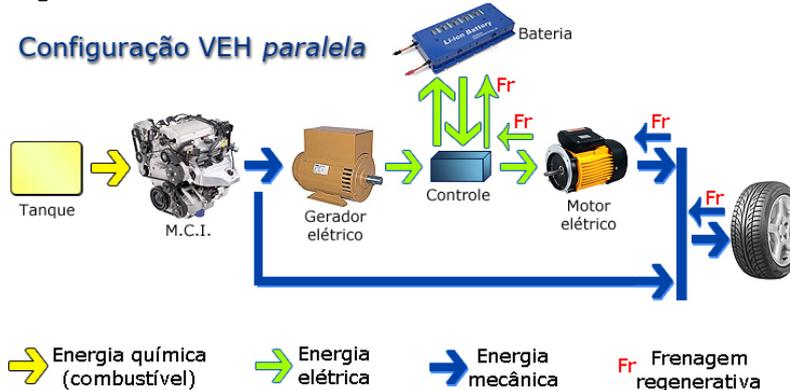


Fonte: Santos, 2012.

1.1.2.2. VEH Paralelo

Na configuração em paralelo, o motor a combustão ou o motor elétrico podem acionar as rodas. Ao sair do repouso e em baixas velocidades, o veículo funciona com o motor elétrico, onde tem maior eficiência. Em altas velocidades, é o motor a combustão que alimenta o carro. Na Figura 9 é mostrado o esquema de transferência de energias.

Figura 9 - Veículo Elétrico Híbrido Paralelo



Fonte: Santos, 2012.

O veículo elétrico híbrido é uma solução que se encontra comercialmente disponível e permite economia de combustível entre 10 e 50%, quando comparado com um modelo convencional equivalente de combustão interna. As emissões de dióxido de carbono (CO_2) são reduzidas em até 50% e as emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO) são reduzidas em até 50% (Andrade, 2018, p. 23).

Vantagens:

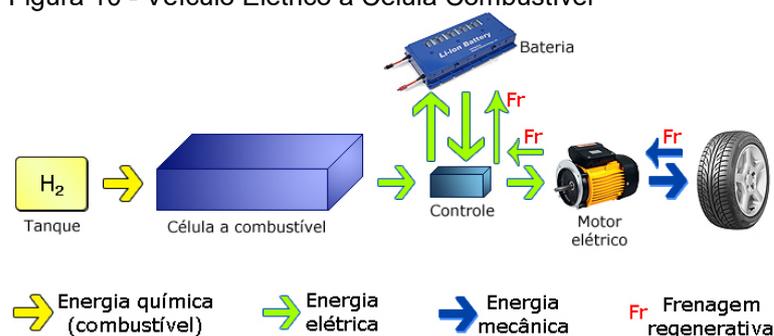
- Converte em força mecânica mais de 90% da energia elétrica, enquanto o motor de combustão interna (MCI) converte menos de 25% da energia do combustível líquido (gasolina, etanol, diesel e GNV).
- Com poucas partes móveis, é consideravelmente mais simples de construir e manter (maior durabilidade e menores custos de manutenção).
- Não consome energia quando fica parado no trânsito, diferente do carro convencional, que fica com o motor ligado.
- Tem elevado torque de partida. Já no carro convencional, que precisa de um sistema de embreagem e câmbio, esses sistemas dissipam até 20% da energia.

1.1.3. Veículo Elétrico de Célula Combustível

É um veículo em que a energia elétrica é gerada a bordo, através de processo eletroquímico em que a energia do hidrogênio (combustível) é transformada

diretamente em eletricidade. A energia elétrica produzida alimenta um ou mais motores elétricos e recarrega uma bateria ou um arranjo de baterias instaladas a bordo. Utiliza a “frenagem regenerativa”, que para a redução de velocidade, transforma a energia cinética do veículo em energia elétrica que é guardada nas baterias (Santos, 2012). Na Figura 10 é mostrado o esquema de transferência de energias.

Figura 10 - Veículo Elétrico à Célula Combustível

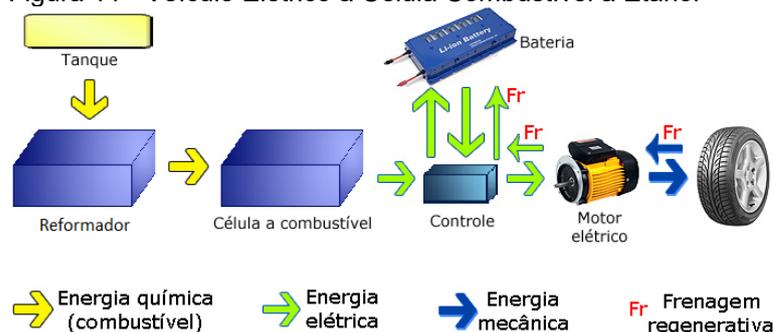


Fonte: Santos, 2012.

Cabe acrescentar que o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), em São Paulo, vem pesquisando a geração de eletricidade por meio de uma célula combustível através do uso do etanol que passa por um reformador, que separa as moléculas e as envia à célula combustível, onde reações eletroquímicas produzem a energia elétrica que pode acionar um veículo elétrico (Zaparolli, 2021).

Esta tecnologia evita a armazenagem do hidrogênio cujos custos são bem elevados. Este sistema com reformador que utiliza o etanol, emite vapor d'água, calor e dióxido de carbono CO_2 . Neste caso, o dióxido de carbono resulta da transformação do etanol em hidrogênio. O Etanol torna-se atrativo como combustível alternativo para um país como o Brasil, visto que já possui a tecnologia para sua produção e uma infraestrutura consolidada, direcionadas a indústria automobilística. É preciso considerar a natureza da fonte de energia renovável, quando o etanol é obtido em grandes quantidades pela fermentação da cana-de-açúcar, de fácil cultivo em nosso país (Wendt; Götz; Linardi, 2000).

Figura 11 - Veículo Elétrico à Célula Combustível à Etanol



Fonte: Adaptado de Santos, 2012.

1.1.4. Tróibus

Tróibus é um ônibus movido a eletricidade, similar aos ônibus comuns, que roda por meio de pneus de borracha ao invés de trilhos (Figura 12). A energia elétrica chega através de hastes que ficam sobre a carroceria e estão em permanente contato com a fiação específica (rede elétrica) que acompanha o percurso.

O Tróibus é uma solução que se encontra disponível e permite grande economia de energia e emissões nulas no local onde circulam. No caso brasileiro, cerca de 86,1% da geração de eletricidade é de origem renovável, o que permite reduções de emissões totais (desde a geração de energia elétrica até a rodagem do veículo) são muito expressivas, quando se compara o tróibus com seu equivalente convencional (Santos, 2012). Entretanto, há um custo expressivo da rede aérea necessária para suprir o motor elétrico.

Figura 12 - Tróibus



Fonte: Antunes, 2018.

1.1.5. Veículo Solar

É um veículo elétrico alimentado por energia solar captada em painéis localizados na sua superfície (geralmente no teto). Células fotovoltaicas convertem a energia do sol diretamente em energia elétrica.

Atualmente, veículos solares não são veículos de transporte práticos para o dia-a-dia, mas primariamente veículos de demonstração, competição e pesquisas de engenharia, frequentemente patrocinados por agências de governo e empresas (Figura 13). O projeto de um veículo solar é severamente limitado pela limitação de suprimento de energia elétrica no carro oriundas do Sol.

Figura 13 – Protótipo de carro solar da Honda



Fonte: Domingos, 2019.

1.2. Componentes de um veículo elétrico à bateria – VEB

Este trabalho está direcionado ao Veículo Elétrico a Bateria (VEB). É imprescindível esclarecer que os conceitos da disciplina de "Conversão Eletromecânica de Energia" são fundamentais para a questão da tração de veículos elétricos, assim sendo, o seu equipamento principal tem como denominação mais propícia "conversor eletromecânico de energia". Portanto, no texto inteiro onde estiver se referindo ao "motor elétrico" é preciso ficar claro que se trata de um "conversor eletromecânico de energia". Isto se verifica pelo fato das máquinas elétricas rotativas, em princípio, se é aplicado torque no eixo mecânico obtém-se tensão nos terminais. Ao contrário, em princípio, quando se aplica tensão nos terminais obtém-se torque no eixo da máquina. Este conceito é que permite a regeneração quando o veículo elétrico desce, por exemplo, uma ladeira e que torna possível a frenagem regenerativa.

Estão a seguir descritos os principais componentes que compõem um veículo elétrico à bateria, assim como suas características.

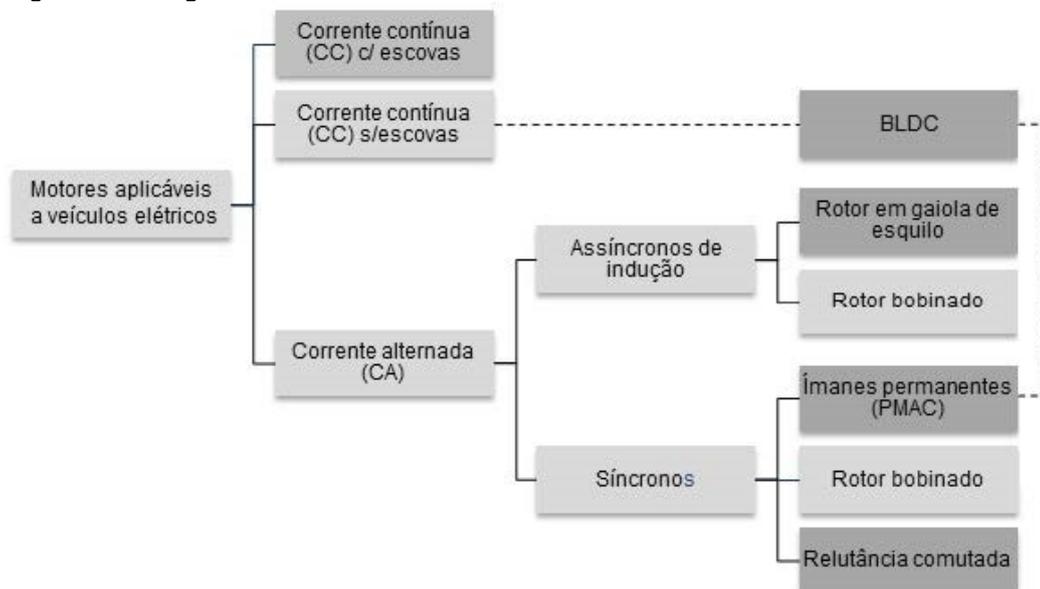
1.2.1. Motor Elétrico

O motor elétrico é um dispositivo capaz de transformar energia elétrica em mecânica como explicado. Possui ampla utilização em inúmeros setores, estando também, em um estágio de desenvolvimento tecnológico avançado. Atinge uma eficiência de 80%, podendo chegar a 95% nos motores de alto rendimento. Tanto os motores de corrente contínua como os de corrente alternada podem ser usados em veículos elétricos, sendo que cada topologia possui vantagens e desvantagens.

Apesar dos motores de veículos elétricos serem considerados similares ou parecidos com os motores elétricos industriais, eles requerem partidas e paradas frequentes, acelerações e desacelerações, altos torques em baixa velocidade e em acive, baixos torques em alta velocidade e de cruzeiro, ou seja, uma gama muito ampla de condições aleatórias de operação.

Segundo Azevedo (2018, p.18), os cinco tipos de motores mais usados em veículos elétricos são: motor de corrente contínua com escovas, motor assíncrono de indução, motor síncrono de ímãs permanentes, motor de relutância comutada e motor CC sem escovas BLDC, conforme Figura 14, em cor destacada.

Figura 14 - Diagrama dos motores utilizados em veículos elétricos

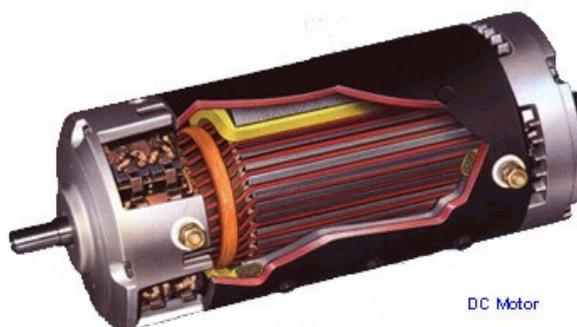


1.2.1.1. Motor de Corrente Contínua

Um motor de corrente contínua, apresentado na Figura 15, é um motor acionado por uma fonte de energia em corrente contínua, podendo ter os enrolamentos do indutor e do induzido ligados em série ou em paralelo. A sua comutação (troca de energia entre rotor e estator) pode ser através de escovas (escovado) ou sem escovas (*brushless*) e com relação a velocidade, pode ser controlado apenas com a variação de tensão (Azevedo, 2018). Os motores de corrente contínua em série podem ser considerados por operarem a “potência constante” e os motores de corrente contínua em paralelo (*shunt*) podem ser considerados por operarem a “velocidade constante”. O motor CC em série tem características de binário e velocidade ideais para tração e pode ser usado em veículos elétricos, entretanto esse tipo de motor tem limitações quanto a torque elevados, fazendo com que caísse em desuso (Freitas, 2012).

Em geral, motores de corrente contínua operam com dispositivos conhecidos como *escovas* cujo desgaste é intenso exigindo um esforço de manutenção e troca frequente que influencia no seu custo operacional.

Figura 15 - Motor CC



Fonte: Freitas, 2012.

1.2.1.2. Motor de Corrente Alternada

Inventado por Nicola Tesla em 1888, o motor de indução foi amplamente difundido devido a sua robustez e maior simplicidade de construção. Este motor possui alta eficiência e baixo custo de fabricação, no entanto para seu uso em veículos elétricos se faz necessário um controlador mais elaborado e caro. Na Figura 16 é

apresentado um motor de corrente alternada projetado para utilização em veículos elétricos.

Figura 16 - Motor AC modelo AC-51 para VE



Fonte: HPEVS, 2023.

Motores de corrente alternada, no geral, são os mais utilizados no mercado devido à distribuição de energia elétrica ser feita normalmente em corrente alternada. Seu princípio de funcionamento é baseado no campo girante, que surge quando um sistema de correntes alternadas trifásico é aplicado em polos defasados fisicamente de 120° . Dessa forma, como as correntes são defasadas 120° elétricos, em cada instante, um par de polos possui o campo de maior intensidade, cuja associação vetorial possui o mesmo efeito de um campo girante que se desloca ao longo do perímetro do estator e que também varia no tempo. Os principais tipos são:

Motor CA assíncrono de indução – De acordo com Freitas (2012, p. 10), o motor assíncrono de indução funciona com um campo magnético rotativo, criado através de uma tensão alternada (trifásica ou monofásica) aplicada nos enrolamentos do estator. O campo magnético do rotor tende a alinhar-se com o campo do estator sendo induzida uma força eletromotriz que produz o movimento de rotação do rotor. A velocidade de rotação do rotor, tem um ligeiro atraso em relação ao campo magnético girante, devido à carga aplicada ao motor, daí a designação de motor assíncrono. O rotor em gaiola de esquilo é o mais utilizado em automóveis por não conter escovas, sendo mais barato e exigindo menos manutenções, porém seu torque de arranque não é muito elevado.

Motor síncrono de ímã permanente – Conforme visto em Azevedo (2018, p.19), um motor síncrono de ímã permanente tem por princípio básico a produção de um campo magnético estacionário pela corrente de campo.

De forma semelhante, as correntes que circulam no estator do motor síncrono criam um campo magnético rotativo. Portanto, o motor possui dois campos em

operação e o campo do rotor tende a se alinhar com o campo do estator conforme ele gira. Esses motores possuem alta capacidade de torque e são mais compactos se comparados aos motores de indução com a mesma potência. Podem ser do tipo BLDC (*Brushless DC*) ou PMSM (Motor Síncrono de Ímãs Permanentes). Conforme citado por Larminie; Lowry (2012), o motor BLDC é, na verdade, um motor de corrente alternada, chamado de *Brushless DC* porque é uma evolução do motor de corrente contínua com escovas, e possui características de velocidade e torque muito similares aos motores de corrente contínua com escovas. O motor BLDC (*Brushless DC*) também é conhecido como ECM (Motor de Comutação Eletrônica), pois não possui escovas e a comutação é feita eletronicamente. Dessa forma, esse tipo de motor não enfrenta os problemas associados às escovas, porém o controle eletrônico agrega um custo considerável em sua aplicação.

Motor síncrono de relutância comutada – Segundo Andrade (2018, p.29), o motor de relutância comutada tem uma fabricação simples, robusta além de que possui baixo custo devido à ausência de enrolamentos no rotor e ímãs permanentes, podendo operar em velocidades elevadas, tem ótima controlabilidade, um bom rendimento, além de funcionarem com facilidade como geradores. Estes motores consistem tipicamente de um rotor composto de ferro e eletromagnetos, que ligam e desligam para estabelecer polos no rotor ferromagnético. Este tipo de rotor permite o funcionamento a temperaturas elevadas, que é uma vantagem em relação aos motores de ímãs permanentes, pois nesses, as altas temperaturas desmagnetizariam os ímãs.

Os motores e os controladores CA geralmente têm uma característica regenerativa que será vista no tópico seguinte. Durante a frenagem, o motor se transforma em um gerador e devolve energia para as baterias, conforme explicado a partir do conceito de conversor eletromecânico de energia apresentado anteriormente.

1.2.2. Frenagem Regenerativa

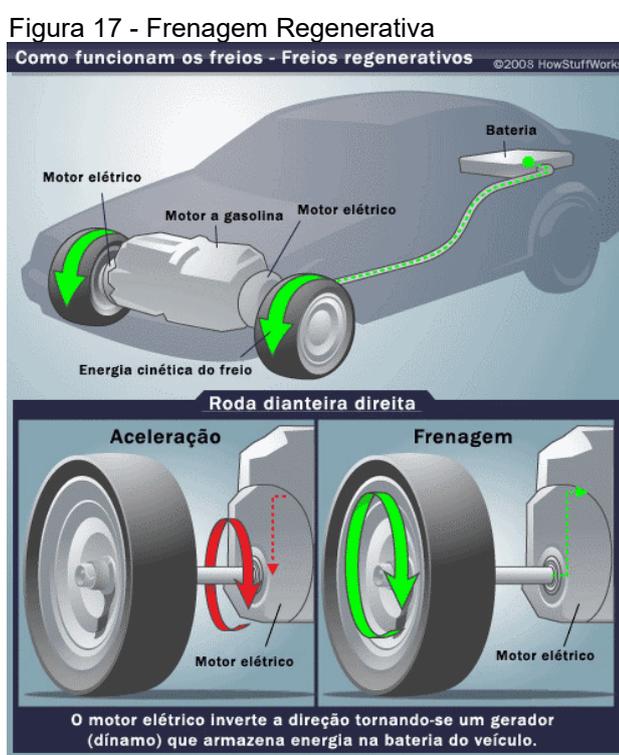
Baseando-se no conceito da conservação da energia, foi desenvolvido um sistema de freios para recuperar grande parte da energia cinética antes dissipada em forma de calor na desaceleração de um veículo. Esse sistema é chamado de frenagem regenerativa.

Atualmente, esses tipos de freios são encontrados nos veículos elétricos híbridos como o Toyota Prius e em veículos elétricos à bateria como o Tesla e o Nissan

Leaf. Nesses tipos de carros, manter a bateria carregada é algo de suma importância. Contudo, essa tecnologia foi primeiramente usada em bondes, passando a ser usada até mesmo em carros de Fórmula 1.

Em um sistema de freios tradicional, as pastilhas de freio produzem atrito com os discos dos freios para desacelerar ou parar o veículo. Atrito adicional é produzido entre as rodas e a superfície da rodovia, em emergências ou de mal funcionamento dos freios. Esse atrito é o que transforma a energia cinética do carro em calor. Com freios regenerativos, por outro lado, o sistema que conduz o veículo faz a maior parte da frenagem.

Conforme demonstrado na Figura 17, ao pressionar o pedal de freio para reduzir a velocidade, o motor elétrico do veículo é chaveado para atuar como gerador, desacelerando as rodas do veículo, produzindo força magnética contrária necessária para reduzir o movimento das rodas. Além disso, como gerador, alimenta as baterias do veículo e fornece tensão de alimentação para componentes do mesmo, como o ar-condicionado, sistema de som e etc.



Fonte: Lampton, 2021.

Porém, deve-se ressaltar que mesmo com o sistema regenerativo, o veículo ainda possui o sistema de freio convencional para condições em que há a necessidade

de frenagem rápida ou abrupta (situação em que o sistema regenerativo não oferece condição segura e ágil o suficiente). Isso também permite que a vida útil do sistema de freio convencional seja aumentada consideravelmente, já que este é utilizado em determinadas ocasiões.

Esse tipo de freio (regenerativo) é mais eficiente em determinadas condições, como no trânsito urbano caracterizado pelo anda e para, por exemplo. Alguns modelos híbridos ainda possuem capacitores para armazenar a energia gerada e utilizá-la posteriormente.

A função do sistema de controle eletrônico do veículo deve comandar essas condições de frenagem. Esse sistema detecta quando a frenagem inicia, quando termina e qual deve ser o tempo de reação para o seu acionamento.

Semelhante ao funcionamento dos sensores do ABS (*Anti-lock Braking System*): ou sistema de freio antitravamento. Essa tecnologia é capaz de mitigar o risco de o condutor frear com intensidade e derrapar. Neste caso, os sensores e controladores deste sistema analisam a rotação das rodas e ainda a quantidade de torque disponível para gerar a eletricidade de alimentação. Durante a frenagem, este dispositivo direciona, controla e modula a tensão produzida para as baterias e capacitores do veículo para não ultrapassar o respectivo valor nominal do sistema.

A frenagem regenerativa, como mencionado, é vantajosa em trajetos urbanos. Em percursos de velocidades praticamente constantes recuperam quantidades inexpressivas de energia. Cabe mencionar que as baterias não podem recuperar a carga na mesma velocidade que perdem sob risco de se danificarem. Assim, segundo Yang, et al.(2024), no tráfego urbano, durante a frenagem, aproximadamente 30% a 50% da energia total de um veículo elétrico é consumida por fricção, e 25% a 40% da energia da frenagem pode ser recuperada pela frenagem regenerativa, o que reverte em maior autonomia.

Essa energia proporcionada pela frenagem regenerativa também significa um custo menor no abastecimento do carro, já que os híbridos com motores elétricos e freios regenerativos podem percorrer uma distância muito maior com um único tanque de combustível.

1.2.3. Controlador

O controlador gerencia o fluxo de energia da bateria para o motor elétrico. Este dispositivo usa um sensor para identificar o quanto o acelerador está pressionado e fornece o nível adequado de energia ao motor elétrico para atender as exigências das demandas de condução do veículo, moderando a quantidade de energia instantânea que está sendo retirada das baterias, regendo o quanto está sendo fornecido para o motor elétrico. O controlador irá também acionar a frenagem regenerativa, invertendo a rotação do motor durante uma frenagem.

Os controladores são dotados de recursos que fornecem a proteção necessária para a maioria dos componentes do veículo elétrico. Cita-se, por exemplo, à exposição das baterias e o motor às sobretensões e ao intervalo de tempo correspondente e que deve ser restringido, geralmente a não mais do que 30 segundos (Santos, 2012).

Dependendo do modelo, um controlador também pode ter ligações de baixa tensão para o potenciômetro de acelerador, um sensor de nível de rotação e o contator principal.

Ao longo dos últimos anos, os fabricantes adotaram controladores programáveis que podem suportar uma ampla gama de tensões, possibilitando se adaptar às mudanças do sistema. Normalmente esses modelos podem fornecer estatísticas e muitas de suas configurações podem ser modificadas apenas conectando um computador portátil com aplicativos específicos.

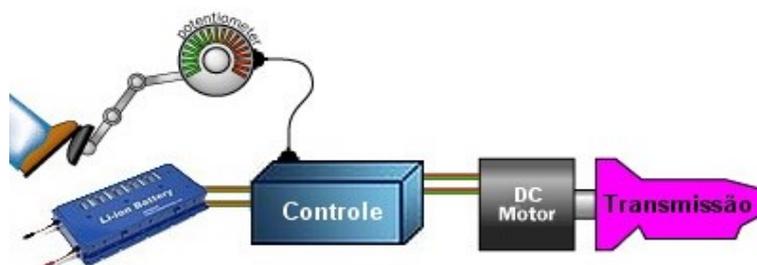
Outra característica importante de um controlador moderno é a capacidade de perceber quando as baterias estão se aproximando da carga nula e, portanto, necessita de limitação de corrente, permitindo que o veículo chegue devagar ao seu destino. Caso as baterias atinjam um nível crítico do sistema, o controlador irá desligar-se completamente para impedir o motorista de danificá-las.

Um controlador de tecnologia recente pode, por exemplo, converter 600 amperes das baterias para 1000 amperes para o motor, fornecendo um impulso adicional de aceleração, especialmente quando o veículo for se deslocar a partir do repouso. Outra característica a ser mencionada é que alguns destes controladores também oferecem uma rampa de aceleração, para realizar uma suave experiência de condução e proteger o motor de súbitos aumentos na corrente elétrica.

1.2.3.1. Funcionamento dos controladores

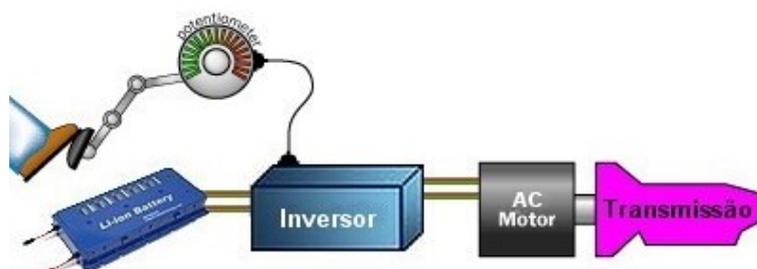
Os controladores se diferem pelo tipo de motor usado no veículo elétrico, motor CC ou motor CA. Nos motores CC usam-se conversores CC/CC, enquanto que em motores CA são usados conversores CC/CA (inversores), conforme esquemas (Figura 18-19).

Figura 18 - Motor CC com Controlador



Fonte: Santos, 2012.

Figura 19 - Motor CA com Inversor

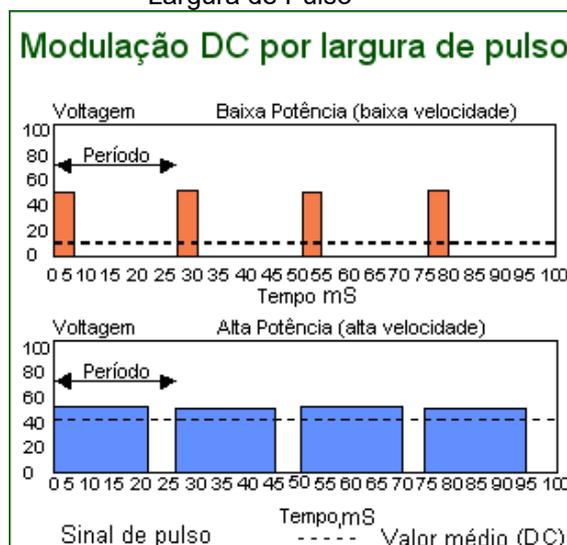


Fonte: Santos, 2012.

No controlador de potência, a velocidade e aceleração são obtidas através do processo eletrônico de modulação por largura de pulso (Figura 20).

Dispositivos de comutação interrompem o fluxo de eletricidade para o motor (liga e desliga). A alta potência (alta velocidade e /ou aceleração) é alcançada quando os intervalos são curtos. A baixa potência (baixa velocidade e /ou aceleração) ocorre quando os intervalos são longos. Na Figura 21, está apresentado um exemplo de um controlador de potência programável da empresa Evnetics.

Figura 20 - Demonstração Modulação DC por Largura de Pulso



Fonte: Santos, 2012.

Figura 21 - Controlador DC



Fonte: Santos, 2012.

No inversor de frequência, duas abordagens principais são comumente usadas para o controle do motor de indução: controle escalar e controle vetorial.

O controle escalar modula só a magnitude e a frequência da tensão aplicada ou corrente. Embora o controle escalar tenha vantagem de ser mais simples do que controle vetorial, tem resposta dinâmica pobre e baixa eficiência de operação. Os vários métodos utilizados para melhorar o desempenho exigem extensiva caracterização do motor e cargas mecânicas a serem movidas.

O controle vetorial manipula a magnitude, frequência e fase das variáveis de controle para proporcionar um melhor desempenho.

Na Figura 22, mostra um exemplo de um inversor de frequência da empresa Curtis.

Figura 22 - Controlador AC (Inversor de Frequência)



Fonte: Santos, 2012.

1.2.4. Bateria

Baterias são conhecidas por serem uma eficiente forma de armazenamento de energia elétrica. Quando uma bateria está conectada a um circuito elétrico, há fluxo de corrente devido a uma transformação eletroquímica no seu interior, ou seja, há produção de corrente contínua através da conversão de energia química em energia elétrica.

A mais simples unidade de operação de uma bateria é chamada de “célula eletroquímica” ou, puramente, “célula”. Uma bateria pode ser composta de apenas uma célula ou do arranjo elétrico de várias delas, por exemplo, em série e paralelo.

Baterias podem ser classificadas em recarregáveis e não-recarregáveis dependendo do tipo de célula de que são compostas. Existem dois tipos básicos de células: primárias (não recarregáveis) e secundárias (recarregáveis). Células secundárias são comumente chamadas de “acumuladores” ou “baterias de armazenamento” e são úteis na maioria das aplicações por longos períodos, como por exemplo, em sistemas fotovoltaicos e “nobreaks”.

1.2.4.1. Baterias recarregáveis

Baterias recarregáveis são aquelas que apresentam uma constituição química que permite reações reversíveis. Com o auxílio de uma fonte externa, pode-se recuperar a composição química inicial e deixá-la pronta para um novo ciclo de operação. De acordo com a aplicação, elas podem ser classificadas como:

- **Automotivas** - são baterias projetadas, basicamente, para descargas rápidas com elevadas taxas de corrente e com reduzidas profundidades de descarga. Esta condição é típica na partida de motores de automóveis.
- **Tracionárias** - indicadas para alimentar equipamentos elétricos móveis, como por exemplo, empilhadeiras, e são projetadas para operar em regime de ciclos diários profundos com taxa de descarga moderada.
- **Estacionárias** - são direcionadas tipicamente para aplicações em que as baterias permanecem em flutuação e são solicitadas ocasionalmente para ciclos de carga/descarga. Esta condição é típica de sistemas de back-up.
- **Fotovoltaicas** - são projetadas para ciclos diários rasos com taxas de descarga reduzidas e devem suportar descargas profundas esporádicas devido a possível ausência de geração solar (dias nublados).

As baterias recarregáveis também podem ser diferenciadas quanto à forma de confinamento do eletrólito em “abertas” ou “seladas”.

As baterias abertas são aquelas que necessitam de verificação periódica do nível do eletrólito. Seu eletrólito é líquido e “livre” (não é confinado no separador) e, por esta razão, devem trabalhar na posição vertical.

As baterias seladas possuem o eletrólito confinado no separador ou sob a forma de GEL. Elas também são conhecidas como “sem manutenção” porque não necessitam de adição de água. Os usuários ligados a aplicações em Telecomunicações costumam denominá-las de baterias “reguladas a válvula”.

As principais características de avaliação de baterias recarregáveis são: densidade de energia (volumétrica ou por peso), eficiência, capacidade, vida cíclica, taxa de auto descarga, reciclagem dos materiais e custo.

A eficiência das baterias recarregáveis depende de muitos fatores, entre os quais se destacam: estado de carga, temperatura de operação, taxa de carga e descarga bem como idade.

Os fatores mais importantes que afetam o desempenho, a capacidade e a vida útil de qualquer bateria recarregável são: profundidade de descarga (por ciclo), temperatura, vida cíclica, controle da carga/descarga e manutenção periódica (especialmente, recarregamento periódico no tipo chumbo-ácido). A seguir, são detalhados estes fatores (CEPEL - CRESESB, 2014).

A profundidade de descarga e temperatura são os parâmetros mais comumente usados pelos fabricantes de células para estimar a capacidade de vida cíclica da bateria.

A vida cíclica está inversamente relacionada com a profundidade de descarga e temperatura. A capacidade de qualquer bateria secundária degrada-se mais rapidamente quando a temperatura de operação da bateria e a profundidade de descarga aumentam.

Os fabricantes de baterias secundárias para veículos elétricos identificaram três tipos adequados para esta aplicação. Os tipos são: baterias de chumbo ácido, baterias de hidreto metálico de níquel (Ni-MH) e baterias de íon-lítio (Li-ion). As de íon-lítio são as utilizadas hoje em veículos como Nissan Leaf e Testa Roadster.

Devido ao seu custo mais acessível destes veículos, as baterias de chumbo ácido são comumente utilizadas em veículos elétricos de pequeno porte para funcionamento em ambientes não rodoviários, principalmente, em trajetos curtos como em fábricas, estacionamentos, aeroportos, jardins botânicos, campos de desportos como futebol, golfe, etc.

1.3. Dispositivos de abastecimento do veículo elétrico

Um carregador de veículo elétrico é um dispositivo usado para carregar a bateria do mesmo. Os veículos elétricos seguem a mesma lógica de qualquer outro dispositivo elétrico ou eletrônico, como um celular, que possui bateria e é carregado por meio de um carregador.

O carregador conecta o veículo à uma fonte de energia elétrica para recarregar a bateria. Também conhecido por outros nomes como estação de recarga, ponto de recarga, posto de abastecimento, estação de carregamento ou ponto de

carregamento, ele pode ser encontrado na versão residencial, comercial, ou de carga rápida DC (*Fast Charger*). Estes carregadores podem ser portáteis, instalados na parede, fixado em um suporte (totem de recarga) ou instalados diretamente no solo.

Alguns carregadores, como os carregadores de emergência que acompanham carros elétricos novos, podem ser usados conectando-os a uma tomada comum. Enquanto outros requerem uma instalação mais complexa com configurações elétricas e dispositivos de proteção, não só para permitir um carregamento mais rápido, mas também para garantir a segurança tanto do veículo como do utilizador. Existem também os chamados eletropostos, que são carregadores que suportam recarga rápida com tensão e corrente maiores que os carregadores residenciais e comerciais, geralmente encontrados em rodovias e têm como objetivo permitir viagens de longa distância sem a necessidade de recargas muito demoradas.

Para carregar a bateria de um veículo elétrico é importante entender que as baterias recebem energia em corrente contínua (CC), mas na maioria dos casos os veículos recebem energia em corrente alternada (CA). Portanto, é necessário um inversor para converter de forma confiável a corrente alternada da rede elétrica em corrente contínua, como a de uma bateria. Todos os carros elétricos possuem um inversor embutido que realiza essa conversão.

Por outro lado, os carregadores rápidos DC (*Fast Charger*), fornecem energia em corrente contínua e, portanto, utilizam seu próprio inversor interno e de maior porte, transformando a energia da rede em corrente contínua, permitindo dessa forma maiores potências e maior velocidade de recarga.

1.3.1. Conector de abastecimento do veículo elétrico

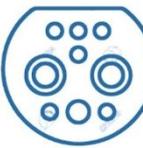
Independentemente do local onde será feita a recarga, a tomada de saída da estação de recarga deve ser compatível com a tomada de entrada do veículo.

Os veículos elétricos usam diferentes padrões de conectores elétricos, assim como os cabos de carregar eletrônicos, os cabos de carregadores tendem a ter dois conectores: um para conectar ao veículo e outro para conectar à estação de recarga. Eles podem variar dependendo do veículo e da velocidade de recarga.

A maioria dos veículos elétricos está equipada com entradas de carregamento em corrente alternada e corrente contínua, permitindo ambos os métodos de carregamento.

Na Figura 23 mostra os tipos de conectores mais usados no mundo, os quais estão detalhados nos tópicos seguintes.

Figura 23 - Tipos de conectores mais usados

<p>TIPO 1</p>  <p>Também chamado de SAE J1772, ele é mais usado nos EUA. No Brasil, veio na primeira geração do Chevrolet Bolt.</p>	<p>TIPO 2</p>  <p>Conector mais popular do mundo, ele é amplamente utilizado no Brasil para recargas públicas e domésticas.</p>	<p>GB/T AC</p>  <p>Usado para recargas em AC na China, tem bocal semelhante ao do tipo 2 e potência máxima ligeiramente maior.</p>	<p>CHAdemo</p>  <p>Padrão de corrente contínua japonês que vem sendo descontinuado até em montadoras daquele país.</p>
<p>CCS1</p>  <p>Igual ao tipo 1, mas com dois plugues extras, que operam em corrente contínua e ampliam a potência a até 350 kW.</p>	<p>CCS2</p>  <p>Equivalente ao tipo 2 do CCS1 e, portanto, bem comum no Brasil. É encontrado em posto de recarga rápida em DC.</p>	<p>GB/T DC</p>  <p>Utilizado em recargas rápidas na China, é um bocal completamente separado da conexão AC.</p>	<p>TESLA SUPERCHARGER</p>  <p>Padrão DC da Tesla que já foi abandonado pelos modelos de fabricação europeia da marca, por exemplo.</p>

Fonte: Passos, 2023.

- **TIPO 1 (SAE J1772)** - Conector para carregamento em rede monofásica com corrente alternada, com potência de até 7,4 kW (230V, 32 A. Usado na região asiática e América do Norte.
- **TIPO 2 (IEC 62196)** – Conector para carregamento em rede trifásica com corrente alternada, com potência de até 22 kW (400 V, 32 A). Usado na Europa e no Brasil.
- **GB/T 20234** – Semelhante ao Tipo 2, este conector foi projetado para atender as normas de carregamento em corrente alternada da China, com potência de até 22 kW (400 V, 32 A) a partir de uma rede trifásica. Possui a versão GB/T 20234 DC, sendo o padrão chinês de carga rápida em corrente contínua, que suporta a potência de até 250 kW.
- **CHAdemo** – É a abreviação de “CHArge deMOve” e é o padrão Japonês de carga rápida em corrente contínua, com potência de até 100 kW, porém especificações revisadas permitem até 400 kW (1000 V, 40 A).
- **Combo CCS** – Este padrão combinado (CCS - Combined Charging System) é uma tentativa dos fabricantes de unificar os padrões de carga

em corrente alternada e corrente contínua. Pode existir como Combo 1 (CCS1) e Combo 2 (CCS2) para atender os padrões T1 e T2 em corrente alternada, sendo o padrão de corrente contínua sempre igual. Pode carregar em potência de até 170 kW.

- **TESLA** – A Tesla desenvolveu seu próprio padrão de carregador rápido através de uma versão modificada do padrão Tipo 2. Permite carga rápida com potência de até 120 kW.

1.3.2. Potência do cabo

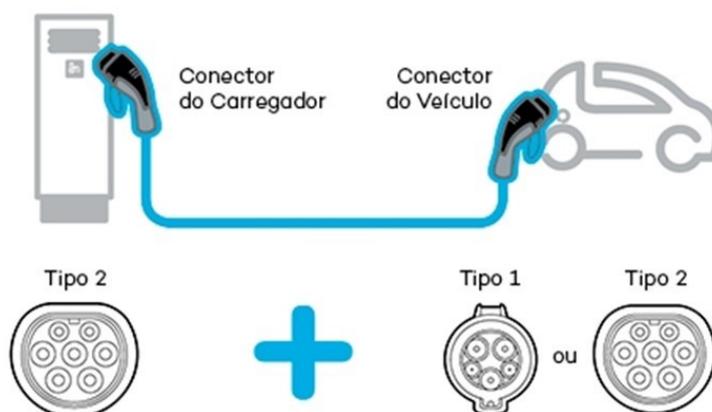
A capacidade de transferir energia no cabo nem sempre é levada em conta, mas também é um fator importante, principalmente para carregamento em corrente alternada, pois a alimentação da rede pode ser bifásica ou trifásica, os cabos seguem o mesmo padrão. Um mesmo tipo de cabo é encontrado em diferentes fases e potências, e isso afeta diretamente no tempo de carregamento.

Isto ocorre porque o carregamento em corrente alternada é sempre limitado pela potência mais baixa, seja a do carregador ou do inversor CA/CC integrado.

Por exemplo, cabos com plugue padrão Tipo 1 (SAE J1772) carregam com uma potência máxima de 7,4 kW, enquanto alguns cabos com plugue padrão Tipo 2 (IEC 62196) podem carregar com uma potência máxima de 22 kW. As Figuras 21 e 22 mostram a relação entre os cabos Tipo 1 e Tipo 2 na potência limite para carregamento de veículos elétricos.

Já estão disponíveis normas brasileiras a este respeito editadas e disponíveis pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que seguem bem de perto às normas da *International Electrotechnical Commission* (IEC) europeia.

Figura 24 – Cabo para carregar veículo elétrico



Fonte: NeoCharge.

Figura 25 – Relação conector e potência

	Número de Fases	Potência de Carga			
		3,7 kW	7,4 kW	11 kW	22 kW
 T2 + T1	1	✓	✓		
 T2 + T2	1	✓	✓		
	3	✓	✓	✓	✓

Fonte: NeoCharge.

1.3.3. Estações de recarga

Qualquer unidade de abastecimento que possibilite a recarga da bateria de um veículo elétrico é uma estação de recarga, incluindo os pontos de carga residenciais (onde os usuários podem carregar os seus veículos dentro de sua própria casa ou na garagem do condomínio), além de outros tipos de estações privadas (por exemplo, carregadores exclusivos para funcionários de uma determinada empresa) e diversas opções públicas de recarga (podendo ser cobrados ou não, seja eletropostos ou carregadores em estacionamentos de comércio, por exemplo).

Existe, ainda, a praticidade dos carregadores portáteis, que permitem abastecer o veículo elétrico em qualquer lugar quando houver necessidade. A seguir serão explicados os diversos tipos de estações de recarga.

1.3.3.1. Tipos de carregadores para veículos elétricos

Os carregadores de veículos elétricos podem ser classificados de várias maneiras com base na sua construção, potência e outras características. No entanto, a forma mais comum de classificar os carregadores é por uso: emergencial, portátil, residencial, comercial e carga rápida (Figura 26). O tipo de uso está geralmente relacionado também à potência, portanto ao tempo de recarga do veículo.

Figura 26 - Tipos de carregadores para veículos elétricos



Fonte: NeoCharge.

Há também normas e padrões em alguns países, que determinam o nível de proteção e velocidade de carga. Segundo os padrões europeus definidos na IEC 62196, há as seguintes classificações:

- Modo 1: Carregamento do veículo elétrico direto na tomada residencial;
- Modo 2: Carregamento direto na tomada através de dispositivo de carga. O dispositivo faz a comunicação e o monitoramento da carga.
- Modo 3: O carregamento é feito através de uma estação de recarga que incorpora a comunicação e o suprimento da carga. A estação é alimentada pelo quadro de energia e não por tomada;
- Modo 4: Carga rápida em corrente contínua. A estação de recarga faz a comunicação e o monitoramento da carga e possui um cabo dedicado com padrão específico de conexão de corrente contínua com o veículo.

1.3.3.1.1. Carregador de emergência

É o carregador que costuma acompanhar o próprio carro elétrico e pode ser conectado em tomadas comuns.

Neste caso, a corrente máxima disponível é de 8 ou 10 A. O carregador portátil fornece uma potência máxima de cerca de 2 kW em 220 V ou 1 kW em 110 V e este nem sempre se adapta ao padrão brasileiro de 127 V. Em um veículo com uma bateria de 40 kWh, por exemplo, uma carga completa levaria 20h ou 40h, sendo muito lenta se comparada com outros tipos de carregadores.

1.3.3.1.2. Carregador portátil

São muito parecidos com os carregadores de emergência, sendo a principal diferença a potência de carregamento e utiliza uma tomada industrial.

A potência máxima de carga é de 22 kW em 380 V (circuito trifásico), mas também existem modelos monofásicos de 7 kW (32 A em 220 V), ou ainda os modelos de 3,7 kW (16 A em 220 V). Com 22 kW é possível carregar uma bateria de 40 kWh em menos de 3h, enquanto com 7 kW, uma carga completa leva cerca de 6h. Há de se observar as tensões nominais residenciais e comerciais, por exemplo, na cidade do Rio de Janeiro a baixa tensão trifásica disponibiliza a tensão de 220 V fase-fase que corresponde a 127 V fase-neutro.

1.3.3.1.3. Carregador *Wallbox Standard* (sem função Smart)

Também chamados de carregadores domésticos, são mais rápidos que os carregadores de emergência. Em geral, são fixados e montados na parede e também são conhecidos como “*Wallbox*” (carregador de parede).

Semelhante aos carregadores portáteis, os carregadores tipo “*Wallbox*” também são mais rápidos que os carregadores de emergência, pois enquanto o carregador veicular de emergência disponibiliza uma corrente de 10 A, o carregador doméstico alcança 16 ou 32 A e pode ser instalado em tensões de 220 V ou 380 V, dependendo da disponibilidade da rede residencial. Também são muito seguros, porque possuem mais proteções específicas e utilizam uma instalação elétrica

dedicada, que garante maior segurança aos usuários, bem como ao equipamento e ao imóvel.

O wallbox pode ser montado em paredes ou em totens e está disponível nas potências de 3,7 kW até 22 kW para carregamento de veículos em corrente alternada (CA), levando aproximadamente 12 a 2 horas para carregar totalmente uma bateria de 40 kW. Embora não disponibilizem a função *Smart* (conexão do carregador com a internet, que permite controle e monitoramento) alguns modelos possuem funções como uma chave de segurança para evitar uso não autorizado.

1.3.3.1.4. Carregador *Wallbox/ Parking* (com função *Smart*)

Também conhecido como carregador comercial, são muito parecidos com os carregadores domésticos. A principal diferença entre eles é a quantidade de recursos disponíveis e a robustez.

Os carregadores comerciais geralmente dispõem de mais de uma tomada de carregamento, permitindo que mais de um veículo seja carregado ao mesmo tempo, portanto, ideal para estabelecimentos comerciais e condomínios. Neste caso, a função *Smart*, através de conexão com a internet, estes carregadores oferecem uma experiência de carregamento com vários recursos adicionais, como gerenciamento de usuários, gerenciamento de energia, reserva de carregador, status de disponibilidade, além de permitir a respectiva cobrança de utilização. Eles podem ser encontrados no mercado com o nome de estação de recarga ou carregador parking (estacionamento), sendo uma das suas aplicações mais comuns. A potência correspondente varia de 3,7 kW a 22 kW ou até 40 kW e realiza a recarga do veículo com correntes de 16 A ou 32 A, levando aproximadamente de 2 a 6 horas para carregar totalmente uma bateria de 40 kW.

1.3.3.1.5. Carregador de Carga Rápida CC/ Eletroposto

Carregadores de carga rápida também são conhecidos como eletropostos, *Fast Charge* CC ou carregadores ultrarrápidos. São os mais potentes existentes e conseguem realizar a recarga da bateria de um veículo elétrico em alguns minutos, o tornando-os ideais para postos de serviço e abastecimento, rodovias e frotistas.

Nem todos os veículos são capazes de carregar em corrente contínua, pois tal carregamento requer proteções adicionais e um controle mais preciso no fornecimento de energia para as baterias. O carregamento em corrente contínua geralmente usa conectores específicos CSS ou CHAdeMO.

Os carregadores ultrarrápidos carregam no modo de carga nível 3 e estão disponíveis para ambas as correntes. Em corrente alternada, a estação fornece energia a uma potência de 40 a 60 kW, enquanto em corrente contínua, a potência chega a 400 kW, ficando limitado à potência máxima de recarga do veículo.

1.4. Painéis fotovoltaicos

Painéis fotovoltaicos são dispositivos utilizados para converter a energia de uma fonte luminosa (em geral o sol) em energia elétrica. Em termos físicos, uma célula fotovoltaica se assemelha à uma junção p-n de um diodo.

Quando uma célula absorve luz, a energia proveniente dos fótons é transferida para os pares fóton-elétron, criando-se portadores de carga que serão separados ao nível da junção. Estes portadores podem ser pares íon-elétron, num eletrólito líquido, ou par elétron-lacuna, num material semiconductor sólido. Os portadores de carga atingindo a região da junção geram um gradiente de tensão e são acelerados pelo campo elétrico circulando como uma corrente por um circuito externo.

1.4.1. Células fotovoltaicas de silício

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si), material fartamente disponível na natureza, e podendo ser constituída de monocristais, materiais policristalinos ou de silício amorfo.

As células de silício monocristalino são historicamente as mais usadas e comercializadas, sendo que a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem conhecido. Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências.

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino pois exigem um processo de preparação das células menos rigoroso.

A eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação às células de silício monocristalino.

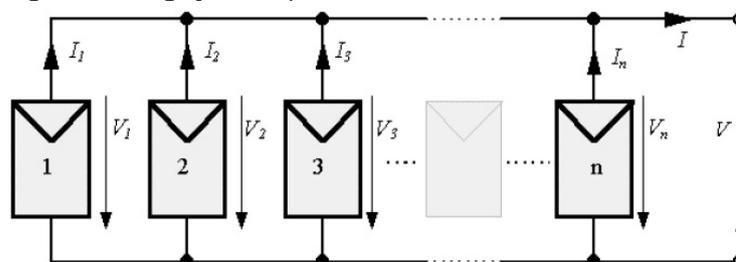
As células de silício amorfo apresentam vantagens no processo de fabricação, podendo ser fabricadas mediante deposição em diversos tipos de substratos, mesmo não planos ou flexíveis. Apesar de ter um custo reduzido de produção, apresentam duas desvantagens: a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil.

1.4.2. Módulos fotovoltaicos

Devido à baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, várias células são agrupadas formando um módulo. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série ou em paralelo.

Ao conectar as células em paralelo, somam-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula (Figura 27). A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua (CEPEL - CRESESB, 2014).

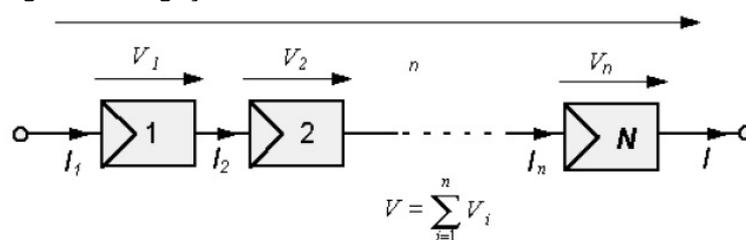
Figura 27 - Ligação em paralelo de células fotovoltaicas



Fonte: CEPEL - CRESESB, 2014.

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série (Figura 28). Neste caso, consiste em agrupar o maior número de células em série onde se soma a tensão de cada célula chegando a um valor final de 12 V o que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que também funcionem na faixa dos 12 V.

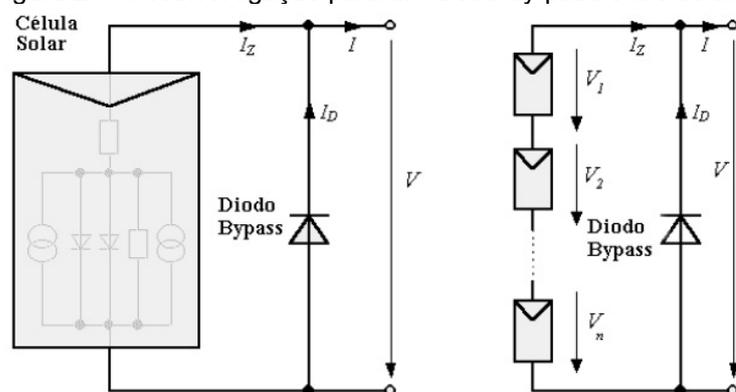
Figura 28 - Ligação em série de células fotovoltaicas



Fonte: CEPEL - CRESESB, 2014.

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo estiver encoberta, a potência de saída do módulo cairá drasticamente pelo fato de estar ligado em série e comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo ou de “*by-pass*” (Figura 29). Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo *by-pass* é feito em grupamentos de células o que, torna muito mais econômico comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula.

Figura 29 - Possível ligação para um diodo by-pass entre células

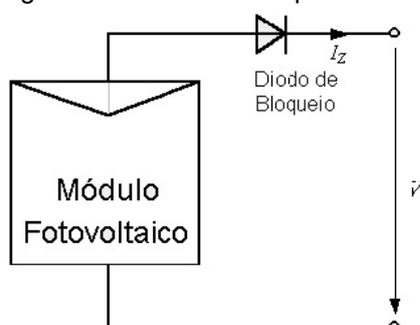


Fonte: CEPEL - CRESESB, 2014.

Outro problema que pode acontecer é quando surge uma corrente negativa fluindo pelas células, ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, usa-se um diodo de bloqueio, conforme Figura 30, impedindo assim correntes reversas que

podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria (CEPEL - CRESESB, 2014).

Figura 30 - Diodo de bloqueio



Fonte: CEPEL - CRESESB, 2014.

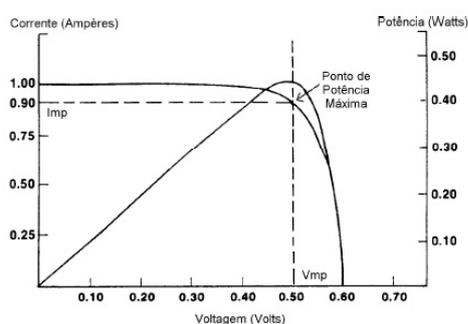
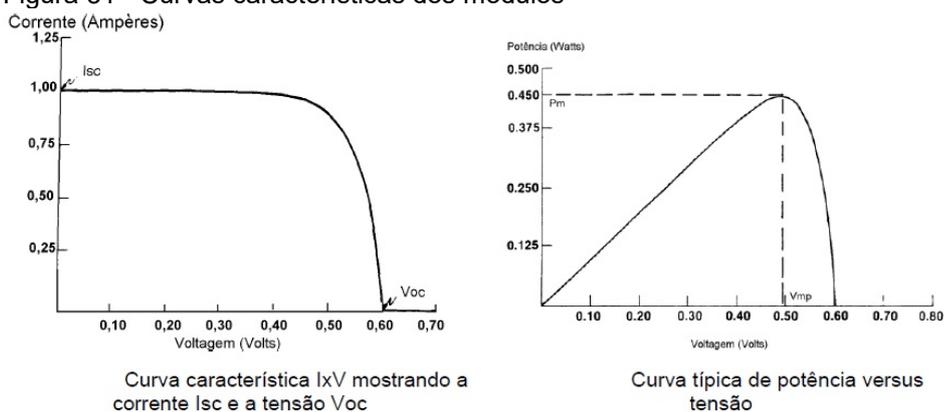
1.4.3. Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

A potência dos módulos é dada pela potência elétrica de pico (W_p). As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são:

- Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})
- Corrente de Curto Circuito (I_{sc})
- Potência Máxima (P_m)
- Tensão de Potência Máxima (V_{mp})
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp})

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos, vide Figura 31, é definida para radiação de 1000 W/m^2 , massa de ar igual a 1,5 e temperatura de 25°C na célula (CEPEL - CRESESB, 2014).

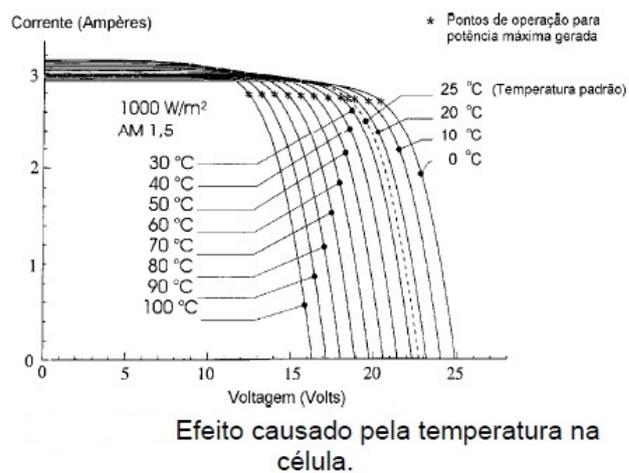
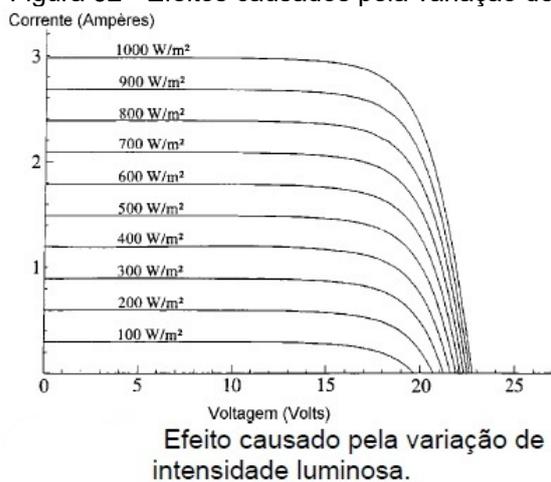
Figura 31 - Curvas características dos módulos



Fonte: CEPEL - CRESESB, 2014.

As características elétricas de um painel são influenciadas por fatores como a intensidade luminosa e a temperatura das células. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia diminuindo assim os pontos de operação para potência máxima gerada (Figura 32) (CEPEL - CRESESB, 2014).

Figura 32 - Efeitos causados pela variação de intensidade luminosa e pela temperatura



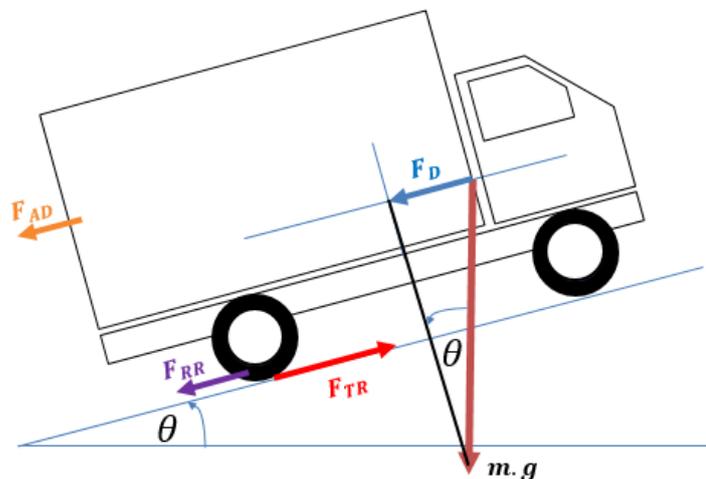
Fonte: CEPEL - CRESESB, 2014.

2. DINÂMICA VEICULAR

A dinâmica veicular é o estudo mecânico das forças que se opõem ao movimento de um veículo. As principais forças de oposição são: forças de inércia, gravitacionais, aerodinâmicas, fricção interna e força de resistência ao rolamento (Rodrigues, 2017).

A cinemática de um veículo numa determinada direção pode ser completamente determinada pelas forças que atuam no veículo naquela direção. A Figura 33 mostra as forças que atuam sobre um veículo subindo uma rampa.

Figura 33 - As forças que atuam sobre um veículo em rampa



$$F_{TR} = F_{RR} + F_{AD} + F_D + F_I$$

Fonte: Adaptação de Larminie; Lowry, 2012.

O primeiro passo será determinar uma equação para a força de tração que é a força que propulsiona o veículo, transmitida ao solo através das rodas motrizes.

Considerando um veículo de massa m , avançando a uma velocidade v , subindo uma inclinação de ângulo θ (Figura 33). A força propulsora, que traciona o veículo, precisa superar a resistência ao rolamento, superar o arrasto aerodinâmico e fornecer a força necessária para superar a componente do peso do veículo que atua para baixo, por exemplo, em um declive e ainda acelerar o veículo com uma velocidade não constante (Larminie; Lowry, 2012).

2.1. Força de tração total

Segundo Costa (2009) e com base em Larminie, Lowry (2012) e Gurgel (2018), a força de tração total (F_{TR}), vista na Equação (1), é a soma das forças para vencer a resistência ao rolamento (F_{RR}), a resistência aerodinâmica (F_{AD}), a resistência de inclinação (F_D) do percurso e a resistência para vencer a inércia (F_I).

$$F_{TR} = F_{RR} + F_{AD} + F_D + F_I \quad (1)$$

Onde se pode desmembrar através das equações que seguem:

2.1.1. Força de resistência ao rolamento

Força de resistência ao rolamento (F_{RR}) pode ser escrita de maneira simplificada através da Equação (2):

$$F_{RR} = K \cdot M_e \cdot g \quad (2)$$

Onde:

K - Coeficiente de resistência ao rolamento;

M_e - Massa equivalente do veículo em kg incluindo a inércia rotacional que é aproximadamente igual a $1,03 \times M_V$, sendo M_V a massa do veículo em kg;

g - Aceleração da gravidade em m/s^2 .

A resistência ao rolamento é principalmente devido ao atrito do pneu do veículo com o pavimento da via. É proporcional ao peso, aproximadamente constante e quase não depende da velocidade do veículo (Larminie; Lowry, 2012).

A Tabela 1, apresenta o coeficiente de atrito do rolamento dependente das características de diferentes pavimentos.

Tabela 1 - Valores típicos para o coeficiente de resistência ao rolamento

Condições	Coeficiente de resistência ao rolamento
Pneus de carro numa via de asfalto ou concreto	0,013
Pneus de carro numa via de cascalhos	0,020
Via de macadame	0,025
Via sem pavimento	0,050
Campo	0,10 – 0,35
Pneus de caminhão numa via de asfalto ou concreto	0,006 – 0,010
Roda sobre trilho	0,001 – 0,002

Fonte: Ehsani *et al.*, 2018.

2.1.2. Força de resistência aerodinâmica

A força de resistência aerodinâmica, exemplificada na Figura 34, é a resistência a passagem do ar no sentido contrário ao movimento do veículo. É dependente da velocidade do veículo, da velocidade do vento, e da área frontal (Gillespie, 2021). A força de resistência aerodinâmica (F_{AD}) é fornecida pela Equação (3):

$$F_{AD} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_F \cdot C_D \cdot v(t)^2 \quad (3)$$

Onde:

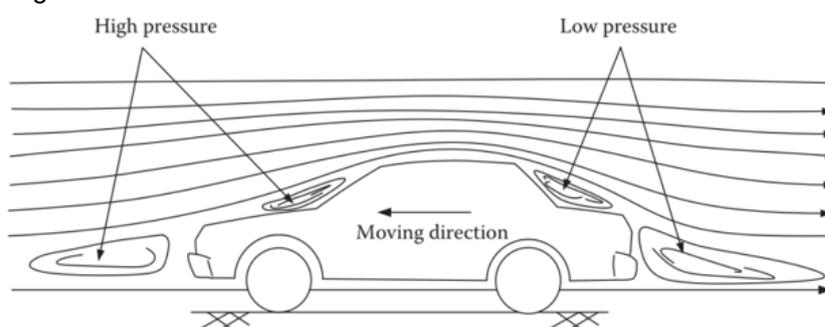
ρ - Massa específica do ar ($\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$);

A_F - Área frontal do veículo em m^2 , ($\cong 0,9 \times \text{bitola} \times \text{altura do veículo}$), sendo a bitola a distância entre o centro dos pneus dianteiros;

C_D - Coeficiente de arrasto;

$v(t)$ - Velocidade de deslocamento do veículo em m/s.

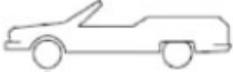
Figura 34 - Arrasto de forma na resistência aerodinâmica



Fonte: Ehsani *et al.*, 2018.

A densidade do ar é influenciada diretamente pela temperatura, altitude e umidade. Já os valores para coeficiente de arrasto variam com o formato do veículo (Figura 35) (Lopes, 2021).

Figura 35 - Coeficientes de arrasto em função da forma do veículo

Tipo de Veículo		Coeficiente de Resistência Aerodinâmica
	Conversível aberto	0,5...0,7
	Van	0,5...0,7
	Sedan	0,4...0,55
	Formato de cunha	0,3...0,4
	Formato de cunha com carenagem envolvente	0,2...0,25
	Hatchback	0,23
	Design simplificado otimizado	0,15...0,20
Caminhões		0,8...1,5
Ônibus		0,6...0,7
Ônibus simplificado		0,3...0,4
Motocicletas		0,6...0,7

Fonte: Ehsani *et al.*, 2018.

2.1.3. Força de resistência ao plano inclinado

A resistência devido ao plano inclinado é a resistência imposta ao veículo por causa da inclinação do terreno. Quando o veículo se movimentar no sentido de subir o aclive, essa força se opõe ao seu movimento. Quando o veículo desce o aclive, a força ajuda o movimento (Rodrigues, 2017). Contudo, para análise de tração ou potência necessária ao veículo para subir o plano inclinado, basta estudar o movimento de subida.

Assim, a força para vencer a resistência da inclinação (F_D) do percurso, é dada pela Equação (4):

$$F_D = M_V \cdot g \cdot \sin \theta(t) \quad (4)$$

Onde:

θ - Ângulo de inclinação do percurso em graus.

2.1.4. Força de inércia

A resistência inercial é a resistência imposta pela aceleração ou desaceleração do veículo, sendo positivo na aceleração e nos estudos de frenagem regenerativa, são usados valores negativos para essa resistência (Rodrigues, 2017).

A força para vencer a inércia (F_I) é indicada na Equação (5):

$$F_I = M_e \cdot a(t) \quad (5)$$

Onde:

$a(t)$ - Aceleração do veículo em m/s^2 , que é dado pela velocidade em m/s dividido pelo tempo que leva para se deslocar de zero à velocidade escolhida.

2.2. Torque

Observando a força de tração (F_{TR}) determina-se o torque necessário nas rodas para movimentação do veículo utilizando a Equação (6) que se segue:

$$T_R = F_{TR} \cdot r \quad (6)$$

Onde:

T_R - Torque nas rodas do veículo em N/m;

r - Raio do pneu em m, dado por $\left[\left(\frac{1}{2} \times \text{diâmetro do pneu em polegada} \times 0.0254 \right) + \left(\frac{\text{altura do pneu}}{100} \times \frac{\text{largura do pneu}}{1000} \right) \right]$.

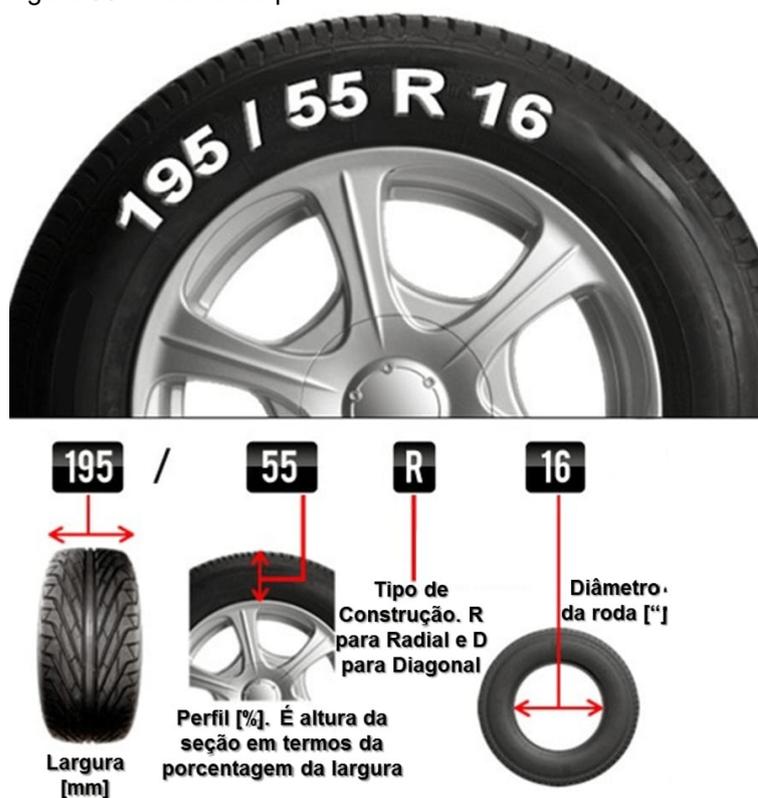
Para o cálculo do raio, será somado o raio do aro em metros à altura do pneu em metros. Para isso, é necessário entender as medidas do pneu com o exemplo da (Figura 36).

Primeiramente deve-se converter o diâmetro da roda que está em polegadas para metros, multiplicando por 0,0254 (16 x 0,0254) que resultaria no valor 0,4064 de diâmetro do aro, logo a metade representa o raio do aro, que é igual a 0,2032 metros.

Na segunda etapa, é preciso converter os valores de largura de milímetros para metros (195 mm / 1000) resultando em 0,195 m, e o valor do perfil para decimal (55 / 100) resultando em 0,55. A altura do pneu é a porcentagem do perfil em relação à largura do pneu, (0,55 x 0,195 m), retornando o valor de 0,10725 metros.

Por fim, soma-se o raio do aro interno ao valor da altura do pneu (0,2032 + 0,10725) resultando o valor do raio da roda de 0,31045 metros.

Figura 36 - Medida de pneu



Fonte: Yoshida, 2021.

Definindo o torque nas rodas é possível determinar o torque do motor elétrico (T_m), que depende da relação de transmissão do sistema, conforme indicado pela Equação (7).

$$T_m = \frac{T_R}{n_T \cdot R_T} \quad (7)$$

Onde:

n_T - Rendimento da transmissão;

R_T - Relação de transmissão, dada pelo produto da relação de transmissão no diferencial pelo valor dessa relação em cada marcha.

Tendo em vista que este trabalho tem como foco uma conversão, busca-se o aproveitamento dos componentes de transmissão existentes originalmente no veículo. Deve-se observar a relação de transmissão entre a entrada do diferencial e as rodas, e posteriormente à realização dos cálculos para determinação do torque e potência do motor, avalia-se a possibilidade de utilização da caixa de marchas. Considerando o valor definido para o torque do motor pode-se calcular a potência que será desenvolvida.

2.3. Rotação

A rotação nas rodas (R_R), dada em RPM e expressa pela Equação (8).

$$R_R = \frac{\left(\frac{v}{60}\right) \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (8)$$

Onde:

v - Velocidade do veículo em km/h;

r - Raio do pneu em m.

A rotação no motor (R_m), dada em RPM e expressa pela equação (9).

$$R_m = R_R \cdot R_T \quad (9)$$

2.4. Velocidade angular

A velocidade angular na roda (ω_R), dada em rad/s e expressa pela Equação (10).

$$\omega_R = 2 \cdot \pi \cdot \frac{R_R}{60} \quad (10)$$

A velocidade angular no motor (ω_m), dada em rad/s e expressa pela Equação (11).

$$\omega_m = \omega_R \cdot R_T \quad (11)$$

2.5. Potência no motor

A potência no motor (P_m), dada em W e expressa pela Equação (12).

$$P_m = T_m \cdot \omega_m \quad (12)$$

3. MODELAGEM DO SISTEMA DE TRAÇÃO

Esse capítulo aborda a definição do sistema de tração elétrica, composto por motor elétrico, inversor de frequência e armazenamento de energia.

O desenvolvimento e análise da dinâmica veicular associada ao veículo selecionado para a conversão pretendida nesse trabalho, através da definição das forças que se opõem a movimentação do veículo, torque necessário para o veículo superar o maior ângulo do percurso a ser realizado, rotação no eixo e potência do motor. A partir dos resultados obtidos é então selecionado o conjunto motor e inversor mais adequado disponível no mercado e, em sequência, determinado o banco de baterias de armazenamento.

Como citado na Introdução, o veículo selecionado para modelagem é o Hyundai HR com baú (Figura 37).

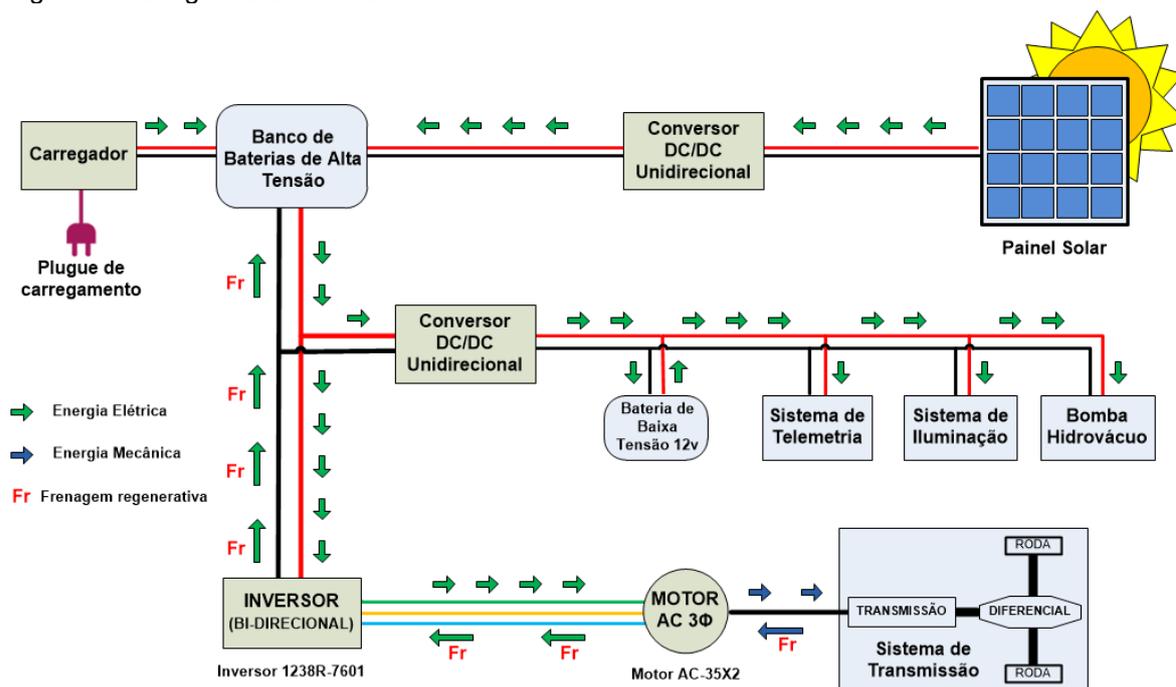
Figura 37 – Hyundai HR



Fonte: XPROM, 2022.

A Figura 38 apresenta um diagrama em blocos didático simplificado do veículo rodoviário proposto para melhor entendimento do trabalho.

Figura 38 - Diagrama de um veículo elétrico fotovoltaico



Fonte: O autor, 2023.

3.1. Parâmetros de projeto

Na Tabela 2, são apresentados os parâmetros necessários a serem utilizados nas equações, assim como os principais dados de catálogo do Hyundai HR estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 2 - Parâmetros para o veículo elétrico

Parâmetro	Símbolo	Valor	[Unid.]
Coeficiente de resistência ao rolamento no asfalto	K	0,015	Adimens.
Massa do veículo	M_V	3480	kg
Massa equivalente do veículo	M_e	3584,4	kg
Aceleração da gravidade em m/s^2	g	9,8	m/s^2
Densidade volumétrica do ar	ρ	1,23	kg/m^3
Área frontal do veículo	A_F	2,626	m^2
Coeficiente de arrasto	C_D	0,8	Adimens.
Velocidade máxima do veículo elétrico	V_m	80	Km/h
Velocidade máxima do veículo elétrico em inclinação	V_i	20	Km/h
Ângulo mínimo de inclinação	θ	0	graus
Ângulo máximo de inclinação	θ	15	graus
Tempo para o veículo elétrico ir de 0 a 100 km/h	-	40	s
Aceleração do veículo elétrico	$a(t)$	1,388	m/s^2
Raio do pneu	r	0,327	m
Rendimento da transmissão	n_T	0,9	Adimens.

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 3 - Dados de catálogo do Hyundai HR

Sistema de transmissão	
Relações de transmissão	1ª - 4,271 2ª - 2,248 3ª - 1,364 4ª - 1,000 5ª - 0,823 6ª - 0,676
Relação final	4,272
Tração	4x2 - traseira
Pesos e capacidades	
Combustível	Diesel
Tanque de combustível	65 litros
Consumo urbano	8 km/l
Capacidade útil de carga + carroceria	2004 kg
Peso bruto total	3480 kg
Dimensões	
Altura do veículo (vazio)	1,965 m
Bitola dianteira	1,485 m
Medidas do baú – largura / comprimento / altura	1,8 m / 3 m / 2 m
Outros	
Pneus	195 / 70 R15
Tempo de 0 a 100 km/h	20 s
Velocidade máxima	140 km/h
Número de ocupantes	2 (motorista + passageiro)

Fonte: Hyundai.

3.2. Cálculos da potência do motor

Visto as equações do capítulo 2, serão utilizados os valores apresentados nas Tabelas 2 e 3 para obter os parâmetros teóricos para a escolha do motor adequado.

O primeiro passo na modelagem do desempenho do veículo é considerar a equação do esforço de tração. A força de tração impulsiona o veículo para frente e é transmitida ao solo através das rodas motrizes (Larminie; Lowry, 2012).

Após os cálculos desenvolvidos no APÊNDICE A, observa-se a diferença entre o veículo partir do repouso ou já estar em movimento. Saindo do repouso, precisa vencer a inércia, exigindo por alguns instantes uma potência maior do motor denominada de valor de pico. Estando o veículo já em movimento, a potência exigida do motor é menor, denominada valor nominal. Outro ponto importante que se pode observar após todos os cálculos é a possibilidade de operação da transmissão com engrenagem única, onde a quarta marcha seria a melhor opção, abrindo possibilidade de redução de componentes da caixa de marchas, reduzindo a massa da mesma.

Para a escolha do motor, são necessárias três informações: o torque máximo do motor, a rotação máxima e a potência máxima do motor. O torque máximo é o $T_{m_0} = 310,785082$ N/m, rotação máxima do motor $R_{m_{max_0}} = 2772,314203$ RPM e potência máxima $P_{m_0} = 90225,88312$ W.

Uma outra filosofia de projeto de sistemas de propulsão para veículos elétricos é abordada por Ehsani, Rahman, Toliyat (1997), que faz um estudo na tentativa de encontrar um perfil ótimo de torque-velocidade, a fim de atender as restrições operacionais dos veículos, como aceleração inicial e inclinação, com potência mínima se o trem de força puder ser operado preferencialmente na região de potência constante.

Todos os cálculos também podem ser feitos num software. Para tanto, um código computacional foi desenvolvido utilizando o software matemático Matlab (Figura 39). A partir das entradas de parâmetros relevantes do veículo original com motor de combustão interna e alguns parâmetros do veículo elétrico, o programa retorna, em campos amarelos, os dados necessários para escolher um motor elétrico equivalente adequado para substituir o motor de combustão interna original.

Figura 39 – Interface de usuário

The screenshot shows the 'MotorVE' software interface. At the top, it features the logo for 'PPG-EM' (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica) and the title 'CÁLCULO PARA CONVERSÃO DE MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA PARA TRACÇÃO ELÉTRICA' by 'Autor: Juan Carlos - 2023'. The interface is divided into several sections:

- Parâmetros do Veículo:** Includes fields for total mass (3480 kg), wheelbase (1.485 m), height (1.965 m), drag coefficient (0.8), and tire size (195 / 70 R 15).
- Transmissão:** Lists gear ratios for differential (4.272), first through sixth gears (4.271, 2.248, 1.364, 1, 0.823, 0.676), and transmission efficiency (0.9).
- Parâmetros do veículo elétrico:** Includes maximum velocity (80 km/h), velocity on incline (20 km/h), 0-100 time (40 s), and minimum/maximum incline angles (0 and 15 degrees).
- Valores para seleção do motor:** Displays calculated results in yellow boxes: Torque (310.7 N/m), RPM (2772.31), Minimum Power (28.76 kW), Maximum Power (90.22 kW), Minimum Power (38.57 hp), and Maximum Power (120.9 hp).

A 'CALCULAR' button is present, and the text 'ELECTRICAL RETROFIT' is displayed in the bottom right corner.

Fonte: O autor, 2023.

Quanto ao torque, foi considerado o cálculo para subida de rampa em primeira marcha. Também foi considerada a rotação que o veículo atingirá a velocidade

máxima em um plano horizontal. Quanto à potência máxima, baseou-se no veículo com carga, partindo do repouso, onde necessita vencer a inércia, necessitando de uma potência maior do motor por alguns momentos, denominado valor de pico.

Com base nos valores obtidos nos campos amarelos, conforme Figura 39, após uma pesquisa no mercado, foi selecionado o motor de indução Modelo AC-35x2, produzido pela *Hi Performance Electric Vehicle Systems*, com as seguintes especificações: de 96 V, 650 A, 94,55 kW e torque máximo de 349,6 N/m, em conjunto com um controlador Modelo 1238SE-7971, da marca Curtis, com 96 V e 900 A (Figura 40) (HPEVS, 2022).

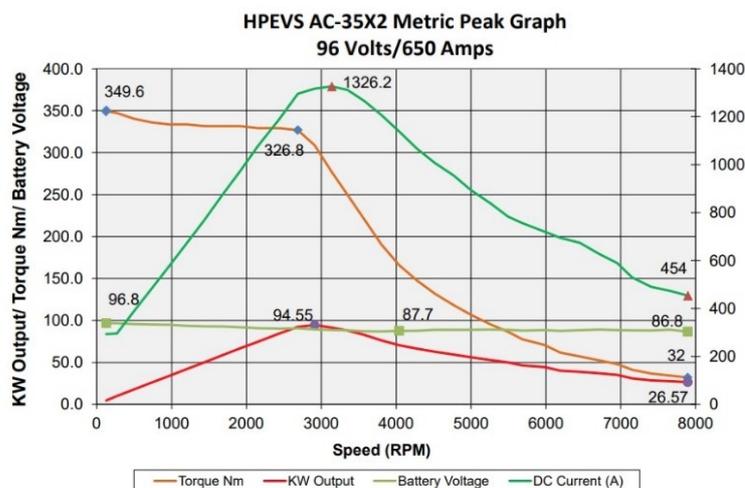
Figura 40 - Motor AC-35X2 e inversor 1238SE-7971



Fonte: HPEVS, 2022.

Na Figura 41 é mostrado o gráfico do motor AC-35X2 com suas curvas características.

Figura 41 - Gráfico do motor AC-35X2



Fonte: HPEVS, 2022.

Na Figura 42 é apresentado um exemplo de uma conversão realizada com motor e inversor similares aos que foram selecionados nesse trabalho.

Figura 42 - Exemplo de uma conversão



Fonte: Saldo, 2019.

3.3. Deslocamento

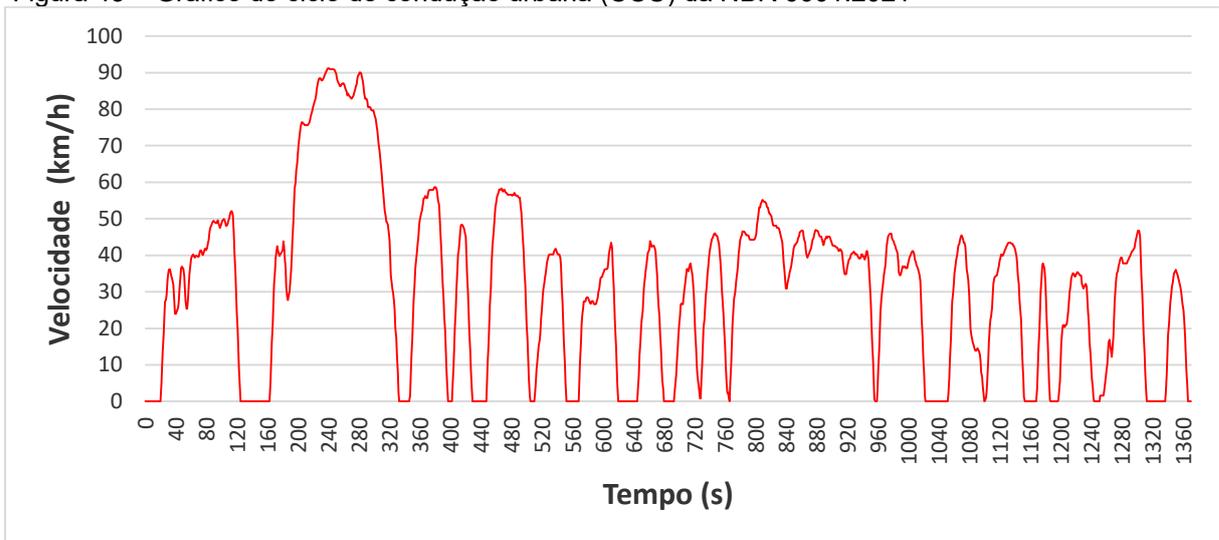
Nessa seção, foram consideradas as seguintes normas:

- ABNT NBR 17142:2023 – Veículos rodoviários elétricos leves – Consumo de energia e autonomia – Método de ensaio;
- ABNT NBR 16567:2016 – Veículos rodoviários híbridos elétricos leves – Medição de emissão de escapamento e consumo de combustível e energia – Métodos de ensaio;
- ABNT NBR 6601:2021 – Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento.

Segundo Pinto (2021), para que um veículo trafegue em vias públicas é necessário homologá-lo para circuitos padrões de teste.

Para realizar a simulação foi utilizado o Ciclo de Condução Urbana (CCU), de 1372 s (22,85 min), velocidade máxima de 91,2 km/h e distância total percorrida de 12,1 km, conforme o Anexo B da ABNT NBR 6601:2021.

Figura 43 – Gráfico do ciclo de condução urbana (CCU) da NBR 6601:2021



Fonte: O autor, 2023.

A partir da Figura 43, é possível observar que os veículos nesse CCU não atingem velocidades superiores a 90 km/h em perímetros urbanos e que a velocidade média desenvolvida não ultrapassa 32 km/h devido a fatores relativos ao trânsito e congestionamentos em regiões urbanas.

O cálculo do consumo é adquirido através da energia necessária ao deslocamento do veículo subtraindo a energia da regeneração.

A curva de potência durante o ciclo de condução é determinada pelo produto da força de tração e da velocidade instantânea e, através da integração do tempo, obtêm-se a energia consumida no percurso.

Conforme Pecorelli Peres, Lambert-Torres, Horta Nogueira (2002), foram utilizadas as seguintes equações:

$$P_T(t) = P_{RR} + P_{AD} + P_D + P_I \quad (13)$$

$$P_{RR} = K \cdot M_v \cdot g \cdot v(t) \cdot \cos(\theta(t)) \quad (13.1)$$

$$K = (0,015) \cdot (1 + v(t)^2 / 1500) \quad (13.1.1)$$

$$P_{AD} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_F \cdot C_D \cdot (v(t))^3 \quad (13.2)$$

$$P_D = M_v \cdot g \cdot v(t) \cdot \sin(\theta(t)) \quad (13.3)$$

$$P_I = M_e \cdot a(t) \cdot v(t) \quad (13.4)$$

Onde, P_T , P_{RR} , P_{AD} , P_D e P_I são, respectivamente, a potência total desenvolvida pelo veículo, as potências para vencer a resistência ao rolamento, a resistência aerodinâmica, a resistência para vencer a inclinação e para vencer a inércia. Por simplicidade, não foram considerados os efeitos do vento.

Para K , é possível utilizar uma relação empírica em função da velocidade do veículo.

$$E = \frac{1}{36 \cdot 10^5 \cdot n_A} \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (14)$$

Onde n_A é o rendimento total do sistema, ou seja, o produto dos rendimentos de cada componente (bateria, inversor, motor e transmissão).

Para estimar o consumo de energia para cada quilômetro percorrido, foi utilizada a Equação (14), considerada a massa do veículo carregado, vazio e a utilização da frenagem regenerativa com uma economia de cerca de 15%, o que gerou os resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Consumo de energia por km

Condição	Sem frenagem regenerativa	Com frenagem regenerativa
Veículo carregado	0,273103 kWh	0,2380143 kWh
Veículo vazio	0,1611585 kWh	0,1401153 kWh

Fonte: O autor, 2023.

3.4. Banco de baterias

O dimensionamento do banco de baterias e a autonomia do veículo foram propostos com base nos resultados da seção anterior.

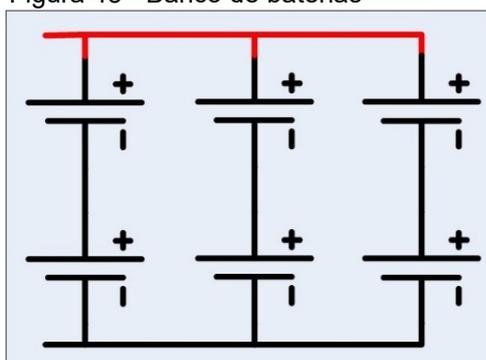
Foi selecionada a bateria de Lítio Ferro Fosfato – LiFePo₄, 48 V 200 Ah, com energia nominal de 10,24 kWh (Figura 44) (REDWAY, 2023). Para atender a alimentação do inversor, que trabalha com 96 V, foi considerada uma associação mista de baterias, resultando em um banco de baterias com 61,44 kWh (Figura 45).

Figura 44 - Bateria LiFePO4 48 V 200 Ah



Fonte: REDWAY, 2023

Figura 45 - Banco de baterias



Fonte: O autor, 2023.

Devido ao consumo de todos os dispositivos elétricos instalados, bem como dos diversos sistemas auxiliares como: iluminação, sinalização, bomba de vácuo para travagem, etc, que são alimentados por uma bateria de baixa tensão, que por sua vez é alimentada pelo banco de baterias (Figura 38), é necessário aplicar uma margem de segurança de 90% no valor energético do banco de baterias. Portanto, o novo valor será de 55,3 kWh. A partir dos dados obtidos com o ciclo de condução urbana, pode-se estimar os valores de autonomia na Tabela 5.

Tabela 5 – Autonomia

Condição	Autonomia com margem de segurança
Veículo carregado	232 km
Veículo vazio	394 km

Fonte: O autor, 2023.

Para maior precisão, seria necessário calcular um ciclo de teste com uma variedade maior de rotas para estabelecer o desempenho.

Utilizando um carregador de 7 kW com 220 V e 32 A, para obter uma recarga completa, são necessárias aproximadamente oito horas.

Como o veículo convertido necessita de vários sistemas auxiliares que operam com 12 V, é necessário um conversor CC/CC com 96 V para conectar ao banco de baterias para obter a tensão de alimentação mencionada.

O funcionamento do sistema de freio original é garantido pelo motor de combustão interna com vácuo adequado para que o dispositivo de hidro vácuo acione o cilindro mestre, empurrando o óleo de freio para as pinças, que por sua vez realizam a frenagem através da pastilha de fricção do freio com o freio disco. Para substituir o motor de combustão interna por tração elétrica, basta instalar uma bomba de vácuo de 12 V e um interruptor de vácuo.

3.5. Massa dos componentes

Com a mudança do sistema de combustão interna para tração elétrica, alguns componentes são substituídos, Tabela 6, e outros são instalados, conforme Tabela 7.

Tabela 6 – Componentes a serem substituídos

Componentes	Massa (kg)
Motor 2.5 A2 Diesel (D4CB) completo	263,00
Radiador de arrefecimento	5,00
Escapamento	30,00
Tanque de combustível de 65 litros cheio de diesel S10	61,25
Total	359,25

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 7 – Componentes a serem instalados

Componentes	Quantidade	Massa (kg)
Motor AC-35X2	1	68,00
Inversor Curtis 1238SE-7971	2	13,64
Baterias LiFePo4 48 V 200 A	6	390,00
Painel fotovoltaico 445 W	2	46,00
Total		517,64

Fonte: O autor, 2023.

A Tabela 8 apresenta uma comparação da massa do veículo após a troca dos componentes selecionados, onde mostra que não há aumento significativo na massa bruta total do veículo.

Tabela 8 – Comparação de pesos e capacidade

Componentes	Massa original (kg)	Massa com retrofit (kg)
Massa do veículo	1476	1634,39
Capacidade útil de carga	2004	2004,00
Peso bruto total (kg)	3480	3638,39

Fonte: O autor, 2023.

Observa-se que houve um aumento de 158,39 kg na massa total do veículo com os novos componentes, conforme Tabela 8. Com isso, foram refeitos os cálculos no software confeccionado no Matlab com a nova massa de 3638,39 kg, conforme Figura 46. Ao comparar os novos valores com os dados da Figura 39, conclui-se que o motor atende os novos resultados.

Figura 46 – Cálculo no Matlab com nova massa

The screenshot displays the MotorVE software interface. At the top, it features the logo for PPG-EM (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica) and the title 'CÁLCULO PARA CONVERSÃO DE MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA PARA TRACÇÃO ELÉTRICA' by Juan Carlos - 2023. The interface is divided into several sections:

- Parâmetros do Veículo:** Includes fields for 'Massa total do veículo (Mv): 3638,39 kg', 'Distância entre o centro dos pneus (bitola): 1.485 m', 'Altura do veículo: 1.965 m', 'Coeficiente de arrasto (Cd): 0.8', and 'Medida do pneu: 195 / 70 / R 15'.
- Transmissão:** Lists gear ratios: Diferencial (4.272), Primeira marcha (4.271), Segunda marcha (2.248), Terceira marcha (1.364), Quarta marcha (1), Quinta marcha (0.823), Sexta marcha (0.676), and Rendimento da transmissão (0.9).
- Parâmetros do veículo elétrico:** Includes 'Velocidade máxima (Vm): 80 (km/h)', 'Velocidade em inclinação (Vi): 20 (km/h)', 'Tempo para ir de 0 a 100: 40 (s)', 'Ângulo mínimo de inclinação: 0 (graus)', and 'Ângulo máximo de inclinação: 15 (graus)'. A 'CALCULAR' button is present.
- Valores para seleção do motor:** Shows 'Torque no motor: 322.4 N/m' and 'Rotação no motor: 2772.31 RPM'. It also displays power requirements: 'Potência em Watts' (mínima: 29.35 kW, máxima: 93.60 kW) and 'Potência em HP' (mínima: 39.36 hp, máxima: 125.5 hp).

The 'ELECTRICAL RETROFIT' logo is visible in the bottom right corner of the software window.

Fonte: O autor, 2023.

Com base no Decreto Rio n° 45433 de 7 de dezembro de 2018, Artigo 1°, inciso VI, mesmo com o aumento de massa total, o veículo ainda atende os requisitos de dimensões e capacidade de carga de 3 toneladas, se enquadrando na categoria de Veículo Urbano de Carga (VUC). Também, de acordo com a Portaria n°16 de 7 de

outubro de 2020 do INMETRO, Anexo D, item D.14, o veículo está dentro da categoria de veículo comercial leve, atendendo o limite de massa total de até 3856 kg.

3.6. Eficiência e emissões

O caminhão elétrico proposto apresenta desempenho operacional igual a 0,2380143 kWh/km equivalente a 0,856851 MJ/km, sem qualquer emissão de escapamento. Enquanto que o caminhão com motor a combustão interna apresenta consumo de 0,1111 litros/km. Considerando o óleo diesel S10 adotado no Brasil com 36 MJ/litro, resulta em 4 MJ/km. Esta notável diferença se justifica devido a necessidade de se utilizar um ciclo termodinâmico de conversão de calor em trabalho no caso do veículo movido a óleo diesel.

Com base nos dados de emissões de carbono na geração elétrica brasileira (EPE, 2023) e no fator de emissão médio do óleo Diesel, composto pelo valor médio do CO₂ emitido na produção e distribuição do Diesel (Carvalho, 2011) mais a emissão resultante da queima do Diesel S10 (Lima, 2021), foi possível montar a Tabela 9 que demonstra uma comparação da eficiência e das emissões do caminhão convertido em relação à sua versão original com motor Diesel.

Tabela 9 – Comparação de eficiência e emissões

Parâmetro	Hyundai HR com retrofit elétrico	Hyundai HR à Diesel
Consumo por km	0,856851 MJ	4 MJ
Emissão de CO ₂ por km	41,7092 g	315,524 g

Fonte: O autor, 2023.

4. PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA PELO PAINEL FOTOVOLTAICO

A dimensão disponível do teto do caminhão é de 1,8 metros de largura por 3 metros de comprimento, conforme Tabela 3. O módulo solar de heterojunção de alta eficiência (HJT), composto por uma combinação de silício cristalino e silício amorfo, foi selecionado para ser instalado no teto do caminhão devido à sua alta eficiência na conversão de energia, permitindo sua adesão à superfície de instalação. A Tabela 10 apresenta suas características elétricas e dimensionais, reproduzidas da ficha técnica do fabricante (CSI SOLAR, 2023).

Tabela 10 - Características do painel CS6R-445H-AG 445W, conforme ficha técnica do fabricante

Parâmetro	Valor
Potência máxima (Pmax)	445 W
Tensão em Pmax (Vmp)	33.9 V
Corrente em Pmax (Imp)	13.15 A
Corrente de curto-circuito (Isc)	13.53 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	40.3 V
Coeficiente térmico de Pmax	-0.26%/°C
Coeficiente térmico de Isc	0.04%/°C
Coeficiente térmico de Voc	-0.24%/°C
Eficiência	22.8%
Temperatura normal da célula de operação	41°C
Dimensões	(1722x1134x30) mm
Peso	23 kg

Fonte: CSI SOLAR, 2023.

A produção média mensal de energia por hora prevista foi calculada como segue. Os dados médios mensais de irradiação solar diária obtidos do programa SunData v.3.0, vide CRESESB (2018), no plano horizontal e azimute 0° N para a cidade do Rio de Janeiro, na coordenada geográfica de latitude 22,901 S e longitude 43,249 O, foram transformados em dados horários médios mensais usando a Equação (15) conforme descrito em (Duffie; Beckman, 2013).

$$rt = \left[\left(\frac{\pi}{24} \right) \cdot (a + b \cdot \cos\omega) \right] \cdot \left\{ \frac{(\cos\omega - \cos\omega_s)}{\left\{ \sin\omega_s - \left[\frac{(\pi \cdot \omega_s)}{180} \right] \cdot \cos\omega_s \right\}} \right\} \quad (15)$$

Os coeficientes a e b são dados por

$$a = 0.409 + 0.5016 \cdot \sin(\omega_s - 60) \quad (15.1)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \cdot \sin(\omega_s - 60) \quad (15.2)$$

Onde ω é o ângulo horário em graus para o horário em questão (ou seja, o ponto médio da hora para o qual o cálculo é feito), ω_s é o ângulo horário do pôr do sol e a razão rt total horário para a radiação solar total diária. O ângulo horário do pôr do sol ω_s é dado por:

$$\omega_s = -(\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (16)$$

Onde ϕ é a latitude e δ é a declinação solar.

A declinação (δ) pode ser encontrada aproximadamente pela Equação (17).

$$\delta = 23,45 \times \sin\{360 \times [(284 + n) \div 365]\} \quad (17)$$

Onde n corresponde ao dia do ano. Existe um dia em cada mês em que a radiação solar extraterrestre está muito próxima da sua média mensal, permitindo a obtenção direta das médias com a Equação (17).

Tabela 11 - Valores de n

Datas	Valor de n
17 de janeiro	17
16 de fevereiro	47
16 de março	75
15 de abril	105
15 de maio	135
11 de junho	162
17 de julho	198
16 de agosto	228
15 de setembro	258
15 de outubro	288
14 de novembro	318
10 de dezembro	344

Fonte: Duffie; Beckman, 2013

A temperatura ambiente média horária mensal foi calculada utilizando os dados horários da estação meteorológica São Cristóvão do Sistema de Monitoramento de

Precipitação da Prefeitura do Rio de Janeiro (ALERTA RIO), considerando os anos de 2010 a 2020. A temperatura horária média mensal da energia fotovoltaica na célula foi calculada usando a Equação (18), reproduzido de (Kamuyu *et al.*, 2018).

$$T_{cell} = T_{NOCT} + (T_{amb} - T_{amb\ NOCT}) \times (G \div G_{NOCT}) \quad (18)$$

Onde T_{cell} é a temperatura da célula, T_{NOCT} é definido como a temperatura da célula ou módulo que é atingida quando as células são montadas de maneira normal a um nível de radiação solar de 800 W/m², uma velocidade do vento de 1 m/s, uma temperatura ambiente de 20°C, e operação sem carga (com $\eta_c = 0$), $T_{amb\ NOCT}$ é a temperatura ambiente, G é a radiação solar incidente em W/m² e G_{NOCT} é a irradiação solar do ensaio para determinação de T_{NOCT} , seu valor é 800 W/m².

A eficiência horária média mensal do painel fotovoltaico foi calculada através da Equação (19).

$$E_{\eta} = E_{\eta\ STC} + (T_{célula} - T_{STC}) \times K_{MP} \times E_{\eta\ STC} \quad (19)$$

Onde E_{η} é a eficiência do painel fotovoltaico, $E_{\eta\ STC}$ é a eficiência nas Condições de Teste Padrão (STC), T_{STC} é a temperatura nas Condições de Teste Padrão (STC) e K_{MP} é o coeficiente de temperatura máxima de potência.

A produção média mensal de eletricidade horária foi determinada multiplicando os valores horários de radiação solar incidente pelos valores correspondentes de eficiência do painel fotovoltaico. A produção mensal de eletricidade foi determinada pela soma dos valores horários de um determinado mês. A produção anual foi determinada de forma semelhante. A Tabela 12 apresenta a previsão média mensal da produção horária de energia disponível para recarregar as baterias do veículo.

Tabela 12 - Produção média mensal de energia por hora prevista (Wh) pelo painel fotovoltaico

Horários	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
07-08	124	121	90	68	48	41	42	62	75	97	104	120
08-09	191	195	157	132	105	97	97	126	137	161	163	188
09-10	253	263	219	193	162	152	151	188	195	220	217	250
10-11	299	314	267	241	206	195	194	236	240	266	259	297
11-12	323	341	293	267	230	220	217	263	264	290	281	322
12-13	322	341	294	266	231	220	218	262	264	290	281	321
13-14	297	312	267	240	206	195	194	235	239	265	258	295
14-15	251	261	219	193	162	152	151	187	194	219	217	248
15-16	190	194	157	132	105	97	97	126	136	160	163	187
16-17	123	121	91	68	48	41	42	62	75	97	104	120
Produção diária	2373	2464	2054	1800	1504	1409	1404	1746	1818	2065	2047	2347
Produção de 2 painéis	4747	4929	4107	3601	3007	2817	2807	3492	3635	4130	4094	4695

Fonte: O autor, 2023.

O cálculo final foi a produção de energia fotovoltaica. Dois painéis, cada um com 445 W, foram especificados e considerados uma exposição solar com o veículo em movimento e estacionado durante todo o dia. A produção diária média total é de 3.838 Wh e é suficiente para aumentar a autonomia em 6,94 %, equivalente a 16 km. Essa energia também pode ser utilizada para alimentar os dispositivos elétricos instalados, bem como dos diversos sistemas auxiliares como: iluminação, sinalização, bomba de vácuo para frenagem, etc. Todos os cálculos feitos no software de planilhas eletrônicas estão no APÊNDICE B.

5. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Nesse capítulo é apresentada uma avaliação da viabilidade econômica do empreendimento proposto que consiste da eletrificação do veículo Hyundai HR 2013.

São consideradas duas alternativas:

Alternativa A – conversão para tração elétrica do veículo comercial leve da Hyundai, modelo HR 2.5 2013, a diesel, portanto, com dez anos de uso. Para estar em condições similares a alternativa B, parte-se da premissa que o veículo está com suas manutenções em dia, levando a perfeitas condições do seu sistema mecânico e estrutural.

Alternativa B – aquisição do veículo comercial leve da Hyundai, zero km, modelo HR 2.5 2023 a diesel.

5.1. Análise econômica do investimento e do aspecto da conversão para tração elétrica

Inicialmente são apresentados na Tabela 13, os valores de mercado no mês de dezembro de 2023, dos veículos de ambas as alternativas, utilizando a tabela da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE), que realiza uma pesquisa dos preços médios dos veículos anunciados no Brasil e estabelece um indicador do valor de cada veículo de acordo com ano e modelo. Esta tabela é atualizada mensalmente e serve como referência do valor de mercado do veículo.

Tabela 13 – Preço médio Hyundai HR 2.5 a Diesel

Ano	Preço Médio (R\$)
2013	78.523,00
2023	182.241,00

Fonte: FIPE

Tendo em vista que esta avaliação é elaborada de forma simplificada, não foram abordados os demais itens necessários para uma conversão real, tais como carregador, conversor CC/CC, flange, suporte, instrumentos, sistemas de proteção, cabos, etc.

Sendo assim, estão listados na Tabela 14 os valores aproximados dos componentes que foram selecionados nesse trabalho. São apresentados os valores em Dólar americano e em Real, considerando o valor do Dólar a R\$ 4,92, na data de

13 de novembro de 2023. Não estão inclusos os custos de importação e impostos em ambos os casos examinados.

Tabela 14 – Valores de componentes

Componentes	Quantidade	Fornecedor	Preço*
Motor AC-35X2	1	ELECTRIC MOTOR SPORT, 2016	3.985,00
Inversor Curtis 1238SE-7971	2	CLOUD ELECTRIC, 2023	4.610,00
Vacuum pump CVR VP555	1	ELECTRIC MOTOR SPORT, 2016	355,00
Baterias LiFePo4 48 V 200 A	6	REDWAY, 2023	7.470,00
Painel fotovoltaico 445 W	2	ENF, 2023	249,20
Total em US\$			16.669,20
Total em R\$			82.009,13

*Valores sem impostos e custos de frete.

Fonte: O autor, 2023.

Com o objetivo de diminuir os custos para efetuar o *retrofit* pretendido, são apresentados na Tabela 15 os valores dos componentes a serem retirados durante o processo de eletrificação do veículo, conforme consulta ao site de compras on-line OLX. Portanto, caso se efetue a venda destas peças resulta um abatimento de R\$ 28.949,00 dos custos totais de conversão.

Tabela 15 – Valores de venda dos componentes usados

Componentes	Preço (R\$)
Motor 2.5 A2 Diesel (D4CB) completo	27.000,00
Radiador de arrefecimento	769,00
Escapamento	380,00
Tanque de combustível de 65 litros cheio de diesel S10	800,00
Total	28.949,00

Fonte: O autor, 2023.

É evidente que o investimento destinado à conversão do veículo, conforme descrito, exige uma estimativa do preço da mão de obra para efetuar este serviço. Para isto, neste trabalho, este custo foi estimado em 15% do valor dos componentes indicados para conversão conforme Tabela 14 (R\$ 82.009,13) e igual a R\$ 12.301,37.

Para efetuar a conversão, além do custo de aquisição do modelo HR 2.5 2013 é preciso considerar os seguintes custos adicionais, nomeados em seguida:

- Aquisição de Componentes para a conversão: R\$ 82.009,13 (Tabela 14);
- Mão de Obra do Serviço de Conversão, estimado em 15% do valor de aquisição do HR 2.5 2013: R\$ 12.301,38.

Há, portanto, levando em consideração o valor recuperado com a venda dos componentes retirados (Tabela 15), atratividade no investimento para a conversão tendo em vista o saldo positivo entre a alternativa A de conversão do modelo HR 2.5 2013 igual a R\$ 143.884,51 em relação a alternativa B referente à aquisição do veículo HR 2.5 2023 a Diesel, novo, igual a R\$ 182.241,00. De fato, o veículo convertido a partir do modelo HR 2.5 2013 da alternativa A, comparado ao custo do investimento na conversão resulta em um saldo positivo igual a R\$ 38.356,49.

Em seguida será analisada a comparação econômica sob o ponto de vista operacional entre as alternativas A e B, e que aponta uma vantagem econômica significativa da alternativa A de conversão para tração elétrica em relação à alternativa B. Esta análise se refere ao custo por quilometro rodado. A Tabela 16 mostra o rendimento do veículo convertido para tração elétrica e do veículo diesel, considerando para ambos, uma quilometragem percorrida por dia de 150 km, durante 5 dias por semana. Foi utilizado o preço da energia elétrica/kWh adotado no estado do Rio de Janeiro utilizando a tarifa branca no horário fora de ponta. O preço do óleo diesel S10 Grid foi obtido consultando um posto de combustível da Petrobrás, também no Rio de Janeiro.

Tabela 16 – Comparativo de rendimento

VEÍCULO ELÉTRICO CONVERTIDO		VEÍCULO DIESEL	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Consumo (kWh/km)	0,2380143	Consumo (l/Km)	0,125
Custo do kWh no RJ	R\$ 0,73695	Custo do Diesel S10 GRID no RJ	R\$ 6,19
Custo por km rodado	R\$ 0,175	Custo por km rodado	R\$ 0,77
Km rodados por dia	150	Km rodados por dia	150
Dias por semana	5	Dias por semana	5
Km rodados por mês	3000	Km rodados por mês	3000
Custo mensal	R\$ 525,00	Custo mensal	R\$ 2.310,00

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 17 – Tabela de custos de investimento

Itens	Valor (R\$)
Hyundai HR a Diesel com 10 anos de uso	(+) 78.523,00
Principais componentes a serem instalados	(+) 82.009,13*
Mão de obra do serviço de conversão	(+) 12.301,38
Valor recuperado com a venda dos componentes retirados	(-) 28.949,00
Total	143.884,51

*Valores sem impostos e custos de frete.

Fonte: O autor, 2023.

Portanto, no tocante à análise operacional com base na Tabela 16, o custo por km rodado do veículo convertido é 77% menor em relação ao mesmo veículo movido a diesel.

Na Tabela 17, foram considerados apenas o valor de mercado do veículo com 10 anos de uso e o valor dos principais componentes para conversão, sendo que esse último, por falta de informações sobre custos de importação, foi considerado apenas o valor em dólar (US\$) convertido para real (R\$).

Na Tabela 18 é apresentada a comparação detalhada entre o Hyundai HR convertido, o Hyundai HR a diesel novo e um veículo elétrico novo de mesma categoria com a qual foram baseados os argumentos iniciais referentes a análise comparativa de investimentos.

Tabela 18 – Comparação VUC elétrico convertido x VUC diesel x VUC elétrico

	Hyundai HR 2013 convertido	Hyundai HR 2023 diesel	JAC iEV350T 2023
Dimensões			
Largura	1740 mm	1740 mm	1622 mm
Altura	1965 mm	1965 mm	2000 mm
Comprimento	4850 mm	4850 mm	5600 mm
Massa em ordem de marcha	1634,39 kg	1476 kg	1790 kg
Capacidade útil de carga	2004 kg	2004 kg	1960 kg
Performance			
Velocidade máxima	80 km/h	140 km/h	100 km/h
Potência máxima (cv)	128,55 cv	130 cv	150 cv
Torque máximo (Nm)	349,6 Nm	254,97 Nm	350 Nm
Autonomia urbana	232 km (31 km/h)	520 km	265 km (40 km/h)
Consumo energético	0,856851 MJ/km	4 MJ/km	0,751244 MJ/km
Tração	Traseira	Traseira	Traseira
Tipo de combustível	Elétrico	Diesel	Elétrico
Banco de Baterias (para os VEs)			
Tipo de bateria	LiFePO4	N/A	LiFePO4
Capacidade total de energia da bateria	55,3 kWh	N/A	55,3 kWh
Massa da bateria	390 kg	N/A	420 kg
Tensão nominal da bateria	96 V	N/A	307 V
Capacidade de corrente da bateria	600 Ah	N/A	180 Ah
Tempo de carregamento em estação de recarga WallBox (CA 220V 32A)	8h (carregador 7kW)	N/A	10h (carregador 7kW)
Outros			
Pneus	195/70R15	195/70R15	185/75R15
Valor	R\$ 143.884,51*	R\$ 182.241,00	R\$ 289.164,00

*Os valores das peças serem inseridas foram adotados sem impostos e custos de frete.

Fonte: O autor, 2023.

5.2. Estimativa dos custos

Como ponto de partida, foi definido o período de 10 anos como tempo de análise para ambos os veículos Hyundai HR.

Com base em Figueiredo (2021), são apresentadas estimativas de perda percentual de valor para o Hyundai HR 2013 convertido e o Hyundai 2023 HR novo, assim como os valores de seguro e custo de manutenção. Por falta de informação do valor de mercado do veículo após conversão, será utilizado para os cálculos o preço médio de mercado do Hyundai HR 2013 a Diesel.

As Tabela 19 e 20 mostram cada percentual e as Tabelas 21 e 22 mostram os valores de desvalorização e custos.

Tabela 19 - Percentuais para o Hyundai HR 2013 convertido

Ano	Desvalorização	Seguro	IPVA	Manutenção
1	29,11%	6,22%	0,5%	3,36%
2	6,90%	6,22%	0,5%	3,69%
3	4,74%	6,22%	0,5%	4,05%
4	4,74%	6,22%	0,5%	4,71%
5	4,74%	6,22%	0,5%	5,34%
6	4,74%	6,22%	0,5%	6,03%
7	4,74%	6,22%	0,5%	6,69%
8	4,74%	6,22%	0,5%	7,65%
9	4,74%	6,22%	0,5%	8,64%
10	4,74%	6,22%	0,5%	9,72%

Fonte: Figueiredo, 2021.

Tabela 20 - Percentuais para o Hyundai HR 2023 diesel

Ano	Desvalorização	Seguro	IPVA	Manutenção
1	20,97%	4,96%	2%	11,20%
2	4,71%	4,96%	2%	12,30%
3	3,24%	4,96%	2%	13,50%
4	3,24%	4,96%	2%	15,70%
5	3,24%	4,96%	2%	17,80%
6	3,24%	4,96%	2%	20,10%
7	3,24%	4,96%	2%	22,30%
8	3,24%	4,96%	2%	25,50%
9	3,24%	4,96%	2%	28,80%
10	3,24%	4,96%	2%	32,40%

Fonte: Figueiredo, 2021.

Tabela 21 – Desvalorização anual e custos do Hyundai HR 2013 convertido

Ano	Desvalorização	Seguro	IPVA	Manutenção
1	R\$ 143.884,51	R\$ 8.949,62	R\$ 719,42	R\$ 4.834,52
2	R\$ 101.999,73	R\$ 6.344,38	R\$ 510,00	R\$ 3.763,79
3	R\$ 94.961,75	R\$ 5.906,62	R\$ 474,81	R\$ 3.845,95
4	R\$ 90.460,56	R\$ 5.626,65	R\$ 452,30	R\$ 4.260,69
5	R\$ 86.172,73	R\$ 5.359,94	R\$ 430,86	R\$ 4.601,62
6	R\$ 82.088,14	R\$ 5.105,88	R\$ 410,44	R\$ 4.949,92
7	R\$ 78.197,16	R\$ 4.863,86	R\$ 390,99	R\$ 5.231,39
8	R\$ 74.490,62	R\$ 4.633,32	R\$ 372,45	R\$ 5.698,53
9	R\$ 70.959,76	R\$ 4.413,70	R\$ 354,80	R\$ 6.130,92
10	R\$ 67.596,27	R\$ 4.204,49	R\$ 337,98	R\$ 6.570,36

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 22 – Desvalorização anual e custos do Hyundai HR 2023 diesel

Ano	Desvalorização	Seguro	IPVA	Manutenção
1	R\$ 182.241,00	R\$ 9.039,15	R\$ 3.644,82	R\$ 20.410,99
2	R\$ 144.025,06	R\$ 7.143,64	R\$ 2.880,50	R\$ 17.715,08
3	R\$ 137.241,48	R\$ 6.807,18	R\$ 2.744,83	R\$ 18.527,60
4	R\$ 132.794,86	R\$ 6.586,62	R\$ 2.665,90	R\$ 20.848,79
5	R\$ 128.492,30	R\$ 6.373,22	R\$ 2.569,85	R\$ 22.871,63
6	R\$ 124.329,15	R\$ 6.166,73	R\$ 2.486,58	R\$ 24.990,16
7	R\$ 120.300,89	R\$ 5.966,92	R\$ 2.406,02	R\$ 26.827,10
8	R\$ 116.403,14	R\$ 5.773,60	R\$ 2.328,06	R\$ 29.682,80
9	R\$ 112.631,68	R\$ 5.586,53	R\$ 2.252,63	R\$ 32.437,92
10	R\$ 108.982,41	R\$ 5.405,53	R\$ 2.179,65	R\$ 35.310,30

Fonte: O autor, 2024.

5.3. Cálculo do faturamento

Para estimativa do faturamento, primeiramente é necessário conhecer o valor cobrado por cada quilometro rodado.

Com base no Anexo II da Resolução 6.034/2024, que altera a Resolução N° 5.867/2020, instituída pela Política Nacional de Pisos Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas – PNPM-TRC, temos os seguintes dados:

- **Operação de Transporte:** Tabela B – Operações em que haja a contratação apenas do veículo automotor de cargas
- **Distância:** 150 km (75 km ida + 75 km retorno)
- **Coefficiente de custo de deslocamento (CCD):** 4,4705 R\$/km
- **Coefficiente de custo de carga e descarga (CC):** R\$ 448,18

- **Valor de ida = (Distância x CCD) + CC: 783,4675**
- **Total do frete: R\$ 783,4675**

Com o valor obtido acima, que representa o custo diário do frete percorrendo 150 km diários, são apresentados na Tabela 23 os valores do faturamento mensal.

O valor de diferença de faturamento leva em consideração apenas a economia de combustível. Os custos de manutenção necessários foram tratados na seção 5.2 e serão utilizados mais à frente.

Tabela 23 – Faturamento mensal com veículo convertido e a diesel

VEÍCULO ELÉTRICO CONVERTIDO		VEÍCULO DIESEL	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Valor diário do frete	R\$ 783,4675	Valor diário do frete	R\$ 783,4675
Dias por semana	5	Dias por semana	5
Faturamento por mês	R\$ 15.669,35	Faturamento por mês	R\$ 15.669,35
Custo por km rodado	R\$ 0,175	Custo por km rodado	R\$ 0,77
Custo com a energia	R\$ 525,00	Custo com o Diesel	R\$ 2.310,00
Custo motorista	R\$ 1.900,00	Custo motorista	R\$ 1.900,00
Custo ajudante	R\$ 1.300,00	Custo ajudante	R\$ 1.300,00
Faturamento líquido mensal	R\$ 11.944,35	Faturamento líquido mensal	R\$ 10.159,35
Faturamento líquido anual	R\$ 143.332,2	Faturamento líquido anual	R\$ 121.912,2
Diferença de faturamento mensal entre veículo elétrico e Diesel = R\$ 1.785,00			

Fonte: O autor, 2024.

5.4. Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

Segundo Puccini (2011, p.284), é indispensável a disponibilidade de um elemento de comparação para a tomada de decisão, por parte de um investidor, aceitar ou não o investimento em um projeto.

A Taxa Mínima de Atratividade é a taxa de juros que corresponde ao mínimo que o investidor se dispõe a ganhar quando aplica seus recursos.

A fim de avaliar a taxa mínima de atratividade, que representa o custo de oportunidade, optou-se por considerar o pior cenário de investimento, sendo escolhida a taxa da aplicação em caderneta de poupança, supondo a aplicação do ganho mensal R\$ 1.785,00 visando suprir a manutenção do veículo convertido, por exemplo troca de baterias cujo preço é R\$ 36.752,40.

Foi considerada como taxa mínima de atratividade o ganho da Caderneta Poupança Mensal no ano de 2023.

Em dezembro de 2023, a taxa Selic está em 11,75% ao ano. Assim, o rendimento da poupança é de 0,5% ao mês + Taxa Referencial. Ou seja, o rendimento anual é de **7,18% ao ano** ou cerca de **0,5779% ao mês** (Galhardo, 2023).

Portanto, foi estimado o saldo da caderneta de poupança num período de 1 a 10 anos para estimar a disponibilidade de recursos. Para este cálculo considerou-se a Equação (20) do valor futuro obtido conforme segue:

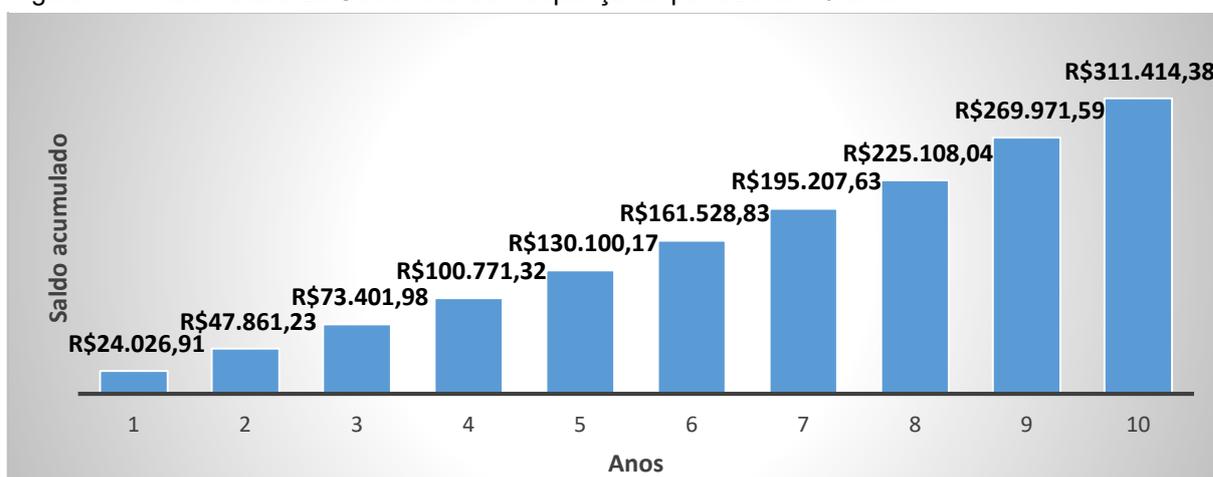
$$FV = \frac{PMT \times [(1 + i)^n - 1]}{i} \quad (20)$$

Onde *FV* é o valor futuro, *PMT* é o valor dos aportes mensais, *n* é o número de meses da aplicação e *i* é a taxa fixa.

Nos resultados obtidos na Figura 45, o período de recuperação de investimento no retrofit se dá em 5 anos e 6 meses com o saldo acumulado de R\$ 145.542,87 onde já está incluso o valor do veículo com 10 anos de uso. Num cenário em que já exista na frota o veículo para conversão e seu valor não seja inserido nos cálculos, o custo da conversão cai para R\$ 65.361,51, onde o período de recuperação do investimento muda para 2 anos e 9 meses com o saldo acumulado de R\$ 66.850,28.

Conclui-se, portanto, que a eletrificação proposta do ponto de vista operacional é atrativa, pois a diferença de custos mensais é capaz de financiar com facilidade a manutenção do veículo eletrificado conforme os cálculos apresentados.

Figura 47 – Valor futuro da Caderneta de Poupança do período de 10 anos



Fonte: O autor, 2024.

5.5. Métodos de avaliação de projetos de investimento

Com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão, foram desenvolvidos métodos de comparação entre alternativas envolvendo desembolsos financeiros.

Existem métodos designados determinísticos e probabilísticos. Nesse trabalho serão abordados os dois principais métodos determinísticos tradicionais de avaliação de projetos de investimento: o Método do Valor Presente Líquido (VPL) e o Método da Taxa Interna de Retorno (TIR) (Guerra; Taneja, 2014).

5.5.1. Método do Valor Presente Líquido (VPL)

Segundo Guerra, Taneja (2014), o método do VPL consiste em determinar o valor presente de todas as alternativas disponíveis e, a partir destes valores, utilizando uma taxa de oportunidade, selecionar a mais favorável. Ou seja, consiste na comparação de todas as entradas e saídas de dinheiro de um fluxo de caixa na data zero.

Critério de decisão do VPL:

Se $VPL > 0$, então haverá um ganho adicional ou lucro extra gerado pelo projeto (expresso em valores de hoje) em relação ao mesmo investimento aplicado à taxa de desconto, isto é, o investimento será atrativo.

Se $VPL < 0$, então terá uma perda (expressa em valores de hoje), e o investimento não será atrativo.

Para o cálculo do VPL, foi utilizado o software de planilha eletrônica Excel que já possui a função VPL, o que gerou a Tabela 25. O período foi de 10 anos de fluxo de caixa, conforme mostrado na Tabela 24, e a taxa de oportunidade utilizada foi a taxa Selic de 11,75 ao ano, mencionada no item 5.3 desse trabalho.

Tabela 24 – Fluxo de caixa

Ano	VEÍCULO ELÉTRICO CONVERTIDO			VEÍCULO DIESEL		
	Faturamento	Custos	Fluxo de caixa	Faturamento	Custos	Fluxo de caixa
1	R\$ 143.332,2	R\$ 14.503,56	R\$ 128.828,64	R\$ 121.912,2	R\$ 33.094,97	R\$ 88.817,23
2	R\$ 143.332,2	R\$ 10.618,17	R\$ 132.714,03	R\$ 121.912,2	R\$ 27.739,23	R\$ 94.172,97
3	R\$ 143.332,2	R\$ 10.227,38	R\$ 133.104,82	R\$ 121.912,2	R\$ 28.079,61	R\$93.832,59
4	R\$ 143.332,2	R\$ 10.339,64	R\$ 132.992,56	R\$ 121.912,2	R\$ 30.091,31	R\$ 91.820,89
5	R\$ 143.332,2	R\$ 10.392,43	R\$ 132.939,77	R\$ 121.912,2	R\$ 31.814,69	R\$ 90.097,51
6	R\$ 143.332,2	R\$ 10.466,24	R\$ 132.865,96	R\$ 121.912,2	R\$ 33.643,47	R\$ 88.268,73
7	R\$ 143.332,2	R\$ 10.486,24	R\$ 132.845,96	R\$ 121.912,2	R\$ 35.200,04	R\$ 86.712,16
8	R\$ 143.332,2	R\$ 10.704,30	R\$ 132.627,90	R\$ 121.912,2	R\$ 37.784,46	R\$ 84.127,74
9	R\$ 143.332,2	R\$ 10.899,42	R\$ 132.432,78	R\$ 121.912,2	R\$ 40.277,09	R\$ 81.635,11
10	R\$ 143.332,2	R\$ 11.112,83	R\$ 163.043,56	R\$ 121.912,2	R\$ 42.895,48	R\$ 187.999,13
Valor do fluxo de caixa normal no 10º ano			R\$ 132.219,37	R\$ 79.016,72		
Valor de revenda do veículo no 10º ano			R\$ 67.596,27	R\$ 108.982,41		
Valor do banco de bateria novo			(-) R\$ 36.772,08			
Valor total do fluxo de caixa do 10º ano			R\$ 163.043,56	R\$ 187.999,13		

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 25 - Comparação do VPL do veículo elétrico convertido e do veículo a diesel

	VEÍCULO ELÉTRICO CONVERTIDO	VEÍCULO DIESEL
Investimento inicial	(-) R\$ 143.884,51	(-) R\$ 182.241,00
Fluxo de caixa	R\$ 128.828,64	R\$ 88.817,23
	R\$ 132.714,03	R\$ 94.172,97
	R\$ 133.104,82	R\$ 93.832,59
	R\$ 132.992,56	R\$ 91.820,89
	R\$ 132.939,77	R\$ 90.097,51
	R\$ 132.865,96	R\$ 88.268,73
	R\$ 132.845,96	R\$ 86.712,16
	R\$ 132.627,90	R\$ 84.127,74
	R\$ 132.432,78	R\$ 81.635,11
	R\$ 163.043,56	R\$ 187.999,13
VPL	R\$ 555.537,26	R\$ 324.074,16

Fonte: O autor, 2024.

O VPL para os dois veículos apresentam valores maiores que zero, mostrando que ambos são viáveis economicamente. Contudo, o VPL do veículo elétrico convertido já se destaca com valor acima de zero no segundo ano, diferente do veículo a diesel que obteve valor acima de zero no terceiro ano.

5.5.2. Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)

De acordo com Guerra, Taneja (2014), o método consiste em determinar para o investimento a ser realizado, a taxa de juros que proporciona um fluxo de caixa equivalente ao que se espera obter com o projeto. Definindo, é a taxa que anula o valor presente líquido (VPL) do projeto.

Para o cálculo da TIR, foi utilizado o software de planilha eletrônica Excel que já possui a função TIR, o que gerou a Tabela 26. Os dados são os mesmos utilizados no cálculo do VPL.

Tabela 26 - Comparação do TIR do veículo elétrico convertido e do veículo a diesel

	VEÍCULO ELÉTRICO CONVERTIDO	VEÍCULO DIESEL
Investimento inicial	(-) R\$ 143.884,51	(-) R\$ 182.241,00
Fluxo de caixa	R\$ 128.828,64	R\$ 88.817,23
	R\$ 132.714,03	R\$ 94.172,97
	R\$ 133.104,82	R\$ 93.832,59
	R\$ 132.992,56	R\$ 91.820,89
	R\$ 132.939,77	R\$ 90.097,51
	R\$ 132.865,96	R\$ 88.268,73
	R\$ 132.845,96	R\$ 86.712,16
	R\$ 132.627,90	R\$ 84.127,74
	R\$ 132.432,78	R\$ 81.635,11
	R\$ 163.043,56	R\$ 187.999,13
TIR	91%	49%

Fonte: O autor, 2024

O valor da TIR encontrado em ambos os casos foi superior a taxa de oportunidade utilizada (taxa Selic de 11,75 ao ano), porém a opção do retrofit se destaca largamente.

De fato, os resultados dos ganhos econômicos favoráveis da conversão apontam uma diferença significativa na qual a conversão para tração elétrica se mostra capaz de ultrapassar os custos dos componentes mostrados na Tabela 13.

5.6. Comparação entre JAC iEV350T e veículo Diesel

De forma complementar, é apresentada uma avaliação da viabilidade econômica entre o veículo elétrico JAC iEV350T, cujos dados técnicos foram apresentados na Tabela 18, e o veículo Hyundai HR diesel.

Primeiramente, será feito o comparativo de rendimento entre ambos os veículos para obter o custo por km rodado e o custo mensal.

Tabela 27 – Comparativo de rendimento JAC iEV350T x veículo diesel

VEÍCULO ELÉTRICO JAC iEV350T		VEÍCULO DIESEL	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Consumo (kWh/km)	0,2086792	Consumo (l/Km)	0,125
Custo do kWh no RJ	R\$ 0,73695	Custo do Diesel S10 GRID no RJ	R\$ 6,19
Custo por km rodado	R\$ 0,154	Custo por km rodado	R\$ 0,77
Km rodados por dia	150	Km rodados por dia	150
Dias por semana	5	Dias por semana	5
Km rodados por mês	3000	Km rodados por mês	3000
Custo mensal	R\$ 461,36	Custo mensal	R\$ 2.310,00

Fonte: O autor, 2024

Para a estimativa dos custos, serão utilizados os dados da Tabela 19, o que resultou na Tabela 28.

Tabela 28 - Desvalorização anual e custos do JAC iEV350T

Ano	Desvalorização	Seguro	IPVA	Manutenção
1	R\$ 289.164,00	R\$ 17.986,00	R\$ 1.445,82	R\$ 9.715,91
2	R\$ 204.988,36	R\$ 12.750,28	R\$ 1.024,94	R\$ 7.564,07
3	R\$ 190.844,16	R\$ 11.870,51	R\$ 954,22	R\$ 7.729,19
4	R\$ 181.798,15	R\$ 11.307,84	R\$ 908,99	R\$ 8.562,69
5	R\$ 173.180,92	R\$ 10.771,85	R\$ 865,90	R\$ 9.247,86
6	R\$ 164.972,14	R\$ 10.261,27	R\$ 824,86	R\$ 9.947,82
7	R\$ 157.152,46	R\$ 9.774,88	R\$ 785,76	R\$ 10.513,50
8	R\$ 149.703,44	R\$ 9.311,55	R\$ 748,52	R\$ 11.452,31
9	R\$ 142.607,49	R\$ 8.870,19	R\$ 713,04	R\$ 12.321,29
10	R\$ 135.847,90	R\$ 8.449,74	R\$ 679,24	R\$ 13.204,42

Fonte: O autor, 2024

Com os dados obtidos na Tabela 27, será calculado o faturamento mensal e anual para ambos os veículos, conforme mostrado na Tabela 29.

Tabela 29 - Faturamento mensal com JAC iEV350T x veículo diesel

VEÍCULO ELÉTRICO JAC iEV350T		VEÍCULO DIESEL	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Valor diário do frete	R\$ 783,4675	Valor diário do frete	R\$ 783,4675
Dias por semana	5	Dias por semana	5
Faturamento por mês	R\$ 15.669,35	Faturamento por mês	R\$ 15.669,35
Custo por km rodado	R\$ 0,154	Custo por km rodado	R\$ 0,77
Custo com a energia	R\$ 461,36	Custo com o Diesel	R\$ 2.310,00
Custo motorista	R\$ 1.900,00	Custo motorista	R\$ 1.900,00
Custo ajudante	R\$ 1.300,00	Custo ajudante	R\$ 1.300,00
Faturamento líquido mensal	R\$ 12.007,99	Faturamento líquido mensal	R\$ 10.159,35
Faturamento líquido anual	R\$ 144.095,9	Faturamento líquido anual	R\$ 121.912,2
Diferença de faturamento entre veículo elétrico e Diesel = R\$ 1.848,64			

Fonte: O autor, 2024

Utilizando todos os dados obtidos, será montada a Tabela 30 com o fluxo de caixa de ambos os veículos, já contando com a revenda dos veículos no décimo ano, como feito na Tabela 24.

Tabela 30 - Fluxo de caixa JAC iEV350T x veículo diesel

Ano	VEÍCULO ELÉTRICO JAC iEV350T			VEÍCULO DIESEL		
	Faturamento	Custos	Fluxo de caixa	Faturamento	Custos	Fluxo de caixa
1	R\$ 144.095,9	R\$ 29.147,73	R\$ 114.948,17	R\$ 121.912,2	R\$ 33.094,97	R\$ 88.817,23
2	R\$ 144.095,9	R\$ 21.339,29	R\$ 122.756,61	R\$ 121.912,2	R\$ 27.739,23	R\$ 94.172,97
3	R\$ 144.095,9	R\$ 20.553,92	R\$ 123.541,98	R\$ 121.912,2	R\$ 28.079,61	R\$93.832,59
4	R\$ 144.095,9	R\$ 20.779,53	R\$ 123.316,37	R\$ 121.912,2	R\$ 30.091,31	R\$ 91.820,89
5	R\$ 144.095,9	R\$ 20.885,62	R\$ 123.210,28	R\$ 121.912,2	R\$ 31.814,69	R\$ 90.097,51
6	R\$ 144.095,9	R\$ 21.033,95	R\$ 123.061,95	R\$ 121.912,2	R\$ 33.643,47	R\$ 88.268,73
7	R\$ 144.095,9	R\$ 21.074,15	R\$ 123.021,75	R\$ 121.912,2	R\$ 35.200,04	R\$ 86.712,16
8	R\$ 144.095,9	R\$ 21.512,38	R\$ 122.583,51	R\$ 121.912,2	R\$ 37.784,46	R\$ 84.127,74
9	R\$ 144.095,9	R\$ 21.904,51	R\$ 122.191,39	R\$ 121.912,2	R\$ 40.277,09	R\$ 81.635,11
10	R\$ 144.095,9	R\$ 22.333,39	R\$ 220.838,32	R\$ 121.912,2	R\$ 42.895,48	R\$ 187.999,13
Valor do fluxo de caixa normal no 10º ano			R\$ 121.762,50	R\$ 79.016,72		
Valor de revenda do veículo no 10º ano			R\$ 135.847,90	R\$ 108.982,41		
Valor do banco de bateria novo			(-) R\$ 36.772,08			
Valor total do fluxo de caixa do 10º ano			R\$ 220.838,32	R\$ 187.999,13		

Fonte: O autor, 2024

Por fim, na Tabela 31, será feita a comparação do VPL e TIR para os dois veículos.

Tabela 31 – Comparação do VPL e TIR do JAC iEV350T x veículo diesel

	VEÍCULO ELÉTRICO JAC iEV350T	VEÍCULO DIESEL
Investimento inicial	(-) R\$ 289.164,00	(-) R\$ 182.241,00
Fluxo de caixa	R\$ 114.948,17	R\$ 88.817,23
	R\$ 122.756,61	R\$ 94.172,97
	R\$ 123.541,98	R\$ 93.832,59
	R\$ 123.316,37	R\$ 91.820,89
	R\$ 123.210,28	R\$ 90.097,51
	R\$ 123.061,95	R\$ 88.268,73
	R\$ 123.021,75	R\$ 86.712,16
	R\$ 122.583,51	R\$ 84.127,74
	R\$ 122.191,39	R\$ 81.635,11
	R\$ 220.838,32	R\$ 187.999,13
VPL	R\$ 392.019,40	R\$ 324.074,16
TIR	41%	49%

Fonte: O autor, 2024

Nessa comparação, o veículo a diesel teve uma leve vantagem devido a diferença no valor de compra dos mesmos. Supondo que o veículo JAC iEV350T tenha uma redução no seu valor, se tornará mais vantajoso em relação ao veículo a diesel.

6. LEGALIZAÇÃO, NORMAS E POLÍTICAS PÚBLICAS

Para esse capítulo, foi realizado uma pesquisa bibliográfica e seleção de referências dos últimos três anos, a fim de obter informações mais atualizadas.

6.1. Legalização

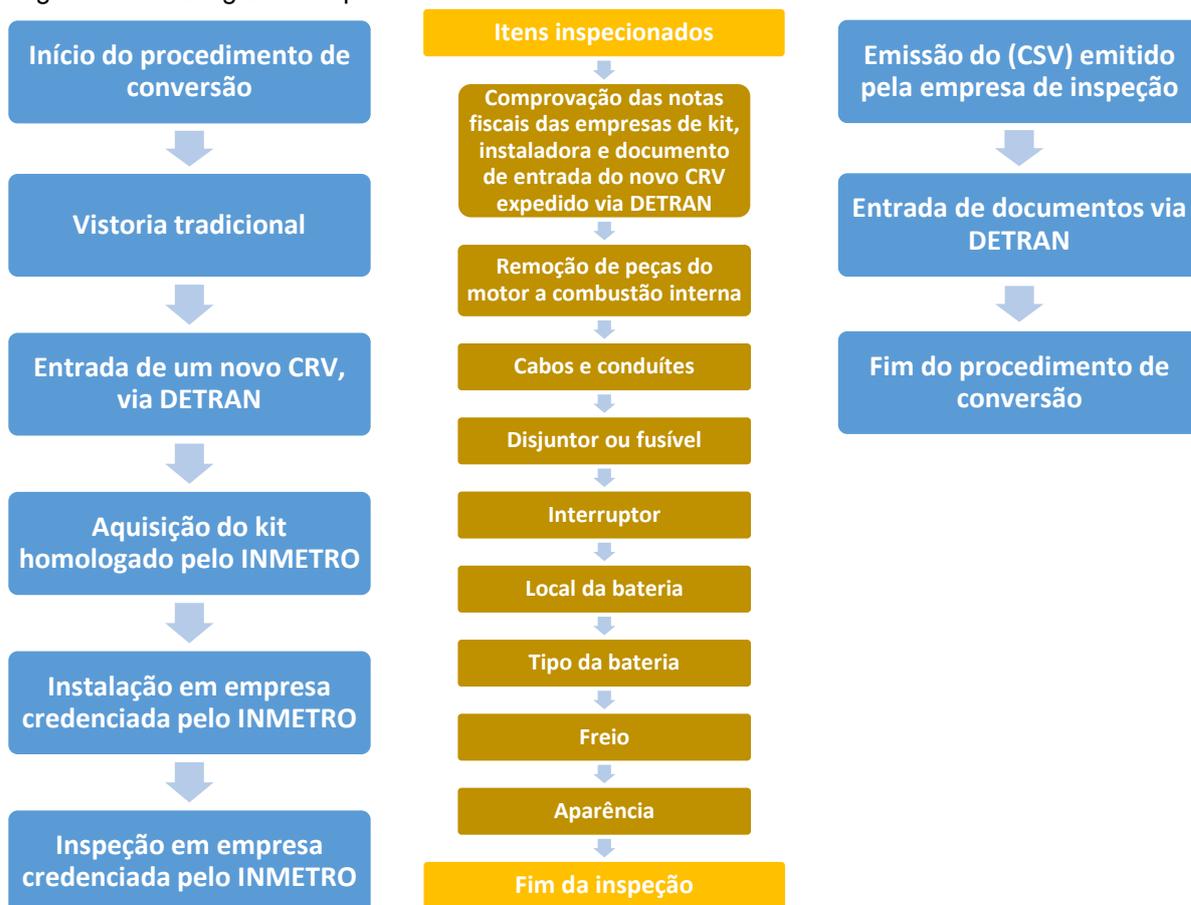
As normas para conversão de veículos elétricos variam de país para país. No entanto, no Brasil as normas para conversão de veículos elétricos estão regulamentadas pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) (Santos, 2022).

É importante ressaltar que as leis e regulamentos referentes à conversão de veículos elétricos no Brasil podem sofrer alterações ao longo do tempo, por isso é recomendável verificar regularmente a legislação vigente. Para isso existe a Portaria nº 30 de 22 de janeiro de 2004 do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade industrial – INMETRO, que visa estabelecer os critérios a serem seguidos por Organismos de Inspeção Credenciados pelo mesmo para inspeção de veículos rodoviários automotores modificados ou fabricados artesanalmente.

Não é permitido, sem prévia autorização da autoridade competente, fazer ou ordenar que sejam feitas modificações das características de fábrica de um veículo, logo, segundo o artigo 98 do Código de Trânsito Brasileiro (CTB), para conversão de um veículo com motor de combustão interna para tração elétrica, é necessária a prévia autorização da autoridade competente para efetuar alterações nas características de fábrica do veículo.

Com base em Silva *et al.* (2021), é mostrado na Figura 48 um fluxograma do processo de conversão desde o início da documentação até o documento pronto emitido pelo DETRAN.

Figura 48 – Fluxograma do processo de conversão



Fonte: Adaptado de Silva *et al.*, 2021

6.2. Normas

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), são relacionadas abaixo algumas normas referentes à mobilidade elétrica no Brasil.

- **ABNT ISO/TR 8713:2015** – Veículos propelidos a eletricidade – Vocabulário;
- **ABNT NBR 16567:2020** – Veículos rodoviários híbridos elétricos leves – Medição de emissão de escapamento e consumo de combustível e energia – Métodos de ensaio;
- **ABNT NBR 17019:2022** – Instalações elétricas de baixa tensão – Requisitos para instalações em locais especiais – Alimentação de veículos elétricos;

- **ABNT NBR 17142:2023** – Veículos rodoviários elétricos leves – Consumo de energia e autonomia – Método de ensaio;
- **ABNT NBR IEC 61851-1:2021** – Sistemas de recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 1: Requisitos gerais;
- **ABNT NBR IEC 61851-21-1:2021** – Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 21-1: Requisitos EMC para os carregadores embarcados no veículo elétrico para serem conectados à alimentação CA/CC;
- **ABNT NBR IEC 61851-21-2:2021** - Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 21-2: Requisitos aplicáveis aos veículos elétricos para conexão por condução a uma alimentação em corrente alternada ou em corrente contínua – Requisitos de compatibilidade eletromagnética (EMC) para sistemas de recarga não embarcados para veículos elétricos;
- **ABNT NBR IEC 61851-23:2020** – Sistemas de recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 23: Estação de recarga em corrente contínua para veículos elétricos;
- **ABNT NBR IEC 61851-24:2021** – Sistemas de recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 24: Comunicação digital entre a estação de recarga em corrente contínua, para veículos elétricos e o veículo elétrico para o controle da recarga em corrente contínua;
- **ABNT NBR IEC 61980-1:2022** – Sistemas de transferência de potência sem fio (wpt) para veículos elétricos – Parte 1: Requisitos gerais;
- **ABNT NBR IEC 62196-1:2021** - Plugues, tomadas, tomadas móveis para veículo elétrico e plugues fixos para veículos elétricos – Recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 1: Requisitos gerais;
- **ABNT NBR IEC 62196-2:2021** – Plugues, tomadas, tomados móveis para veículo elétrico e plugues fixos para veículos elétricos – Recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 2: Requisitos dimensionais de compatibilidade e de intercambiabilidade para os acessórios com pinos e contatos tubulares em corrente alternada;

- **ABNT NBR IEC 62660-1:2022** – Células de lítio-íon secundárias para propulsão de veículos elétricos rodoviários – Parte 1: Ensaios de desempenho;
- **ABNT NBR IEC 62660-2:2022** – Células de lítio-íon secundárias para propulsão de veículos elétricos rodoviários – Parte 2: Ensaios de confiabilidade e abuso.

6.3. Políticas públicas

Em termos de projetos de lei federal, alguns projetos tramitam nas duas casas do Congresso Nacional, na Câmara dos Deputados e no Senado, com foco voltado para produzir um ambiente favorável à adoção de veículos híbridos e elétricos por parte dos consumidores (Silva, 2021).

Abaixo são listados alguns projetos em tramitação nas duas casas legislativas.

- 1981/2023 – Altera a Lei nº 10.233, de 2001, para dispor sobre a instalação de recarga de veículos elétricos em praças de pedágio de rodovias federais e dá outras providências;
- 710/2023 – Estabelece a obrigatoriedade de pontos de recarga para veículos elétricos e híbridos, em estacionamentos privados de uso coletivo, e em estacionamentos e vias públicas;
- 2156/2021 – Incentivo à aquisição de veículos elétricos, viabilização de uma rede de pontos de carregamento de baterias para veículos elétricos e a adoção de medidas que facilitem a conversão de veículos para elétricos;
- 3174/2020 – Trata de substituição de parte da frota de veículos das polícias federais por elétricos;
- 874/2019 – Dispõe sobre medidas para promover o aumento do número de pontos públicos de carregamento de veículos elétricos.

Nas esferas estaduais e municipais, alguns projetos de lei para apoio ao uso veículos elétricos vêm sendo debatidos (Silva, 2021).

Na cidade de São Paulo duas leis foram aprovadas, a lei municipal 15.997/2014 que isenta veículos elétricos e híbridos do rodízio municipal e a lei municipal

17.336/2021 que determina a instalação de estações de recarga de veículos elétricos em construções prediais com projetos feitos após a publicação da lei (Silva, 2021).

Abaixo, segundo Silva (2021), são listados alguns projetos de lei em tramitação por estado.

- Bahia – 24126/2021- Isenção de 50% de IPVA para veículos elétricos;
- Distrito Federal – 454/2019 – Incentivos fiscais para aquisição de veículos elétricos e instalação de infraestruturas;
- Espírito Santo – 150/2021 – Isenção total de IPVA e ICMS para veículos elétricos. Isenção de 50% de IPVA para veículos híbridos.
- Goiás – 1523/2019 – Isenção total de IPVA para veículos elétricos;
- Mato Grosso – 832/2020 – Isenção total de IPVA para veículos híbridos.
- Minas Gerais – 2605/2021 – Isenção total de IPVA e ICMS para veículos elétricos. Financiamento de pesquisas para desenvolvimento de veículos elétricos e seus Componentes;
- Pernambuco – 306/2019 – Proíbe entrada e circulação de veículos a combustão em Fernando de Noronha;
- Rio de Janeiro – 304/2019 – Isenção de ICMS para veículos elétricos;
- Rio de Janeiro – 9870/2022 – Dispõe sobre o fomento à utilização de veículos movidos à propulsão elétrica e híbridos segundo as diretrizes setoriais de transportes da lei estadual nº 5.690, de 14 de abril de 2010, política estadual sobre mudança global do clima e desenvolvimento sustentável, e dá outras providências.

Art. 3 - O Estado poderá mudar gradualmente sua frota de veículos próprios e locados para aqueles equipados com motor elétrico para propulsão, segundo vier a dispor em regulamento:

I - 10% da frota de veículos estaduais a partir de 2025;

II - 50% da frota dos veículos estaduais a partir de 2030;

III - 100% da frota dos veículos estaduais até 2035.

Art. 12 - O Estado poderá se creditar nos recursos previstos no art. 5º, da Lei Federal nº 12.114, de 09 de dezembro de 2009, Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (FNMC), para obter financiamento em prol do fomento da transição dos veículos movidos à propulsão elétrica e híbridos a que se refere esta Lei.

CONCLUSÃO

Os veículos elétricos estão se mostrando uma grande mudança na questão da eficiência energética, muito investimento tem sido feito, e constituem uma opção promissora, embora o seu preço seja mais elevado do que o dos veículos com motor de combustão interna, o que se deve principalmente ao elevado custo das baterias de tração.

Este trabalho apresentou uma modelagem para conversão do veículo comercial leve Hyundai HR com sistema de combustão interna para tração elétrica. Além disso, foi considerada a instalação de um módulo fotovoltaico no teto do seu baú, podendo contribuir para a sua autonomia ou ser utilizada para alimentar os dispositivos elétricos auxiliares. Após os cálculos, foi constatada a necessidade de manter a caixa de mudanças de marcha original do veículo a combustão interna.

O estudo desenvolvido demonstra a viabilidade técnica e econômica da eletrificação do transporte urbano de carga e sua conversão. De fato, há uma evolução no amadurecimento do mercado internacional para fornecimento de peças e equipamentos como motores de diversos tamanhos específicos para tração elétrica, inversores, caixas automáticas, baterias, sistema de gerenciamento de baterias e periféricos, entretanto o mercado nacional ainda não acompanhou esse amadurecimento. Em um cenário de busca de novas alternativas para minimizar os impactos ao meio ambiente, devido à emissão de gases de efeito estufa e a diminuição da poluição atmosférica em centros urbanos com graves consequências para saúde humana e custos sociais decorrentes, pode-se recomendar veículos elétricos para o chamado transporte de última milha, ou seja, o trecho final que as mercadorias percorrem antes de chegarem ao seu destino. De fato, proporcionam uma nova alternativa de mobilidade, pelas vantagens relacionadas à eficiência energética do veículo elétrico, redução das emissões atmosféricas, baixa poluição sonora, portanto, com a possibilidade de trabalho noturno e menores custos de manutenção. Além disso, a matriz energética brasileira é predominantemente composta por fontes renováveis, reduzindo os impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida dos veículos elétricos. Desta forma, o *retrofit* permite eletrificar as frotas existentes, gerando um novo mercado e tornando-se uma opção atrativa para acelerar a transição dos veículos movidos a combustíveis fósseis para a mobilidade sustentável em caminhões de carga.

No desenvolvimento deste trabalho foi observada uma contribuição de 15% da frenagem regenerativa, que reaproveita a energia que seria perdida na forma de calor durante a frenagem de um caminhão com motor de combustão tradicional, bem como da energia solar gerada no teto do veículo.

Por fim, é desejável destacar que o veículo elétrico convertido e considerado neste trabalho é voltado para um ambiente urbano que não exige uma alta autonomia. Apesar da falta de estações de carregamento de alta potência para veículos elétricos, o que representa um estrangulamento significativo na infraestrutura para a sua adoção generalizada, a "recarga de oportunidade" pode ser usado como uma solução alternativa, onde, durante as paradas para carregamento ou descarregamento, possa ser parcialmente carregado usando tomadas de 7 kW.

Trabalhos futuros

Apesar da consistência observada nos resultados obtidos e do potencial verificado para o procedimento de retrofit, estudos ainda podem ser realizados para enriquecer o tema. Sendo assim, para trabalhos futuros propõe-se:

- Em parceria com uma empresa de transporte que possua um veículo da categoria VUC, fazer um estudo de caso através da coleta de dados de um trajeto de entrega fixo diário a fim de montar um ciclo de condução urbano (CCU) personalizado, para trazer mais realidade no cálculo do consumo;
- Avaliar a aplicabilidade do conceito de um retrofit para híbrido a etanol;
- Avaliar a possibilidade de redução de componentes desnecessários da caixa de marcha original e da substituição por uma caixa automática para melhorar a eficiência;
- Estudar a viabilidade de implementação de um banco de ultracapacitores para que trabalhem em paralelo com o sistema de armazenamento de energia especificado neste trabalho.
- Face aos resultados encontrados que apontam a viabilidade técnica e econômica do retrofit de veículos de carga de dois eixos para uso urbano, propõe-se o desenvolvimento e comercialização de motores elétricos de tração específicos com este fim e com torques suficientes que dispensem a caixa de mudança.

- Desenvolvimento de estudos técnicos e econômicos à respeito dos empreendimentos empresariais voltados para a atratividade do retrofit, inclusive, do ponto de vista social, uma vez que este tipo de empreendimento depende do uso de mão de obra bem mais intenso do que os veículos convencionais, sejam elétricos, ou não e cujas respectivas linhas de montagem são robotizadas.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Daniel Beazi de. **O destaque dos carros elétricos e seu funcionamento**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário Facvest - UNIFACVEST. Lages. 2018.
- ANTUNES, Paulo Donizete Ribeiro. **Veículos elétricos, funcionamento e seus benefícios**. 2018. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário UNIFACVEST. Lages. 2018.
- AZEVEDO, Marcelo Henrique de. **Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro**. 2018. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2018.
- BANDEIRA, R. Empresa recicla caminhões velhos a diesel e os converte em elétricos. **MobiAuto**, 05 out. 2021. Disponível em: <https://www.mobiauto.com.br/revista/empresa-recicla-caminhoes-velhos-a-diesel-e-os-converte-em-eletricos/1277>.
- BARROS, Leandro Rocha. **Oportunidades de implementação de veículos elétricos por tipo de serviço logístico**. 2021. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2021.
- BRAGA, A. *et al.* Poluição atmosférica e saúde humana. **Revista USP**, São Paulo, n.51, setembro/ novembro 2001., p. 58-71 Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/download/35099/37838>. Acesso em: 18 set. 2023.
- CARVALHO, C. H. R. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. **Texto para Discussão**, Brasília, n. 1606, abr. 2011. ISSN 1415-4765. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10419/91332>.
- CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA. Como foram as Crises do Petróleo? **CBIE**, 13 mar. 2020. Disponível em: <https://cbie.com.br/como-foram-as-criises-do-petroleo/>.
- CEPEL - CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. p. 530. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.
- CLOUD ELECTRIC. Curtis 1238SE-7971 Motor Controller 72-96V 900A, 2023. Disponível em: <https://www.cloudelectric.com/product-p/1238se-7971.htm>. Acesso em: 20 set. 2023.

COSTA, Washington da. **Metodologia para conversão de veículos equipados com motores a combustão interna para tração elétrica**: aplicação de motor síncrono de ímã permanente com fluxo magnético radial a um furgão. 2009. 135 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito - CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Potencial Solar - SunData v 3.0**, Rio de Janeiro, 25 Janeiro 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>.

CSI SOLAR. PV Module Product Datasheet, 2023. Disponível em: https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2021/07/24141749/CS-Datasheet-HiHero_CS6R-H-AG_v2.5_EN-15y-product-warranty.pdf. Acesso em: 10 jul. 2023.

DALLEPIANE, Patrícia Gomes. **Análise do impacto logístico no setor de transporte de cargas**: estudo de caso com a introdução de caminhões elétricos. 2021. 147 f. Dissertação (Mestrado em Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2021.

DOMINGOS, Ricardo Manuel Rosa. **Veículo elétrico-solar urbano com grande autonomia**. 2019. 134 f. Dissertação (Mestrado em Elétrica e Eletrônica) - Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve. Faro. 2019.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar engineering of thermal processes**. Fourth. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 9780470873663.

EHSANI, Mehrdad *et al.* **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. 3rd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-4987-6177-2.

EHSANI, Mehrdad; RAHMAN, Khwaja M.; TOLIYAT, Hamid A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 44, n. 1, p. 19-27, 1997.

ELECTRIC MOTOR SPORT. AC-34x2 / AC-35x2 Dual Stator AC Induction Motor Drive Kit, 2016. Disponível em: <https://www.electricmotorsport.com/ac-35x2-165-hp-pk-dual-stator-72-144v-ac-induction-motor-drive-kit.html>. Acesso em: 20 set. 2023.

ENF. HiHero CS6R-420-445H-AG, 2023. Disponível em: https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/56252?gclid=CjwKCAjwsKqoBhBPEiwALrrqiPIULllsbhFC6DhK5Xse4viK15P6LzKm2fJu8KHV3wXMVDYcnd9NDRoCgDUQAvD_BwE. Acesso em: 20 set. 2023.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2023**, Relatório Síntese, Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 02 mai. 2023.

FERREIRA, Ricardo Jorge de Araújo. **Carro a energia solar**. 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado em Eletrotécnica) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto. Porto. 2008.

FIGUEIREDO, Matheus de Araújo. **Análise da viabilidade econômica e financeira do uso de veículos elétricos na frota de uma empresa de transporte urbano de cargas**. 2021. 156 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2021.

FREITAS, Joaquim Carlos Novais de. **Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos**. 2012. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Minho. Guimarães, Portugal. 2012.

GALHARDO, A. Rendimento da poupança hoje e acumulado em 2023. **Remessa Online**, 13 dez. 2023. Disponível em: <https://www.remessaonline.com.br/blog/rendimento-da-poupanca-saiba-quanto-rende-de-juros-hoje/>.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Revised. ed. [S.l.]: SAE International, 2021. p. 400. ISBN 9781468601770.

GONÇALVES, Filipe Ernesto Siegrist. **Análise das relações entre componentes de powertrain e parâmetros de performance dos principais carros elétricos do mercado**. 2023. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville. 2023.

GUERRA, F.; TANEJA, I. J. **Matemática Financeira**. 3. ed. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/ UFSC, 2014. p. 190. ISBN 978-85-7988-150-3. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/59442434/Mat_Financeira_Final-3ed20190529-63343-asll1y-libre.pdf?1559152904=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMatematica_Financeira.pdf&Expires=1708470726&Signature=acAweh7zzxcSSibGBVXbjEB19Jn~tGE73XI.

GUIMARÃES, Gabriel. **Análise do impacto dos veículos elétricos no sistema de energia elétrica, considerando um modelo de injeção de potência ativa**. 2022. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá. 2022.

GURGEL, Elifas. **Como converter o seu carro para elétrico: Um caso de sucesso!** 1. ed. Brasília: Independente, 2018.

HYUNDAI. Ficha Técnica HR Euro V. Disponível em: <https://hyundai-motor.com.br/storage/image/41GUjllBNFXipEV04oBOOnCG2shXCwukt6thKJA1.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2023.

JANJEVIC, M.; KNOPPEN, D.; WINKENBACH, M. Integrated decision-making framework for urban freight logistics policy-making. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 72, jul. 2019., p. 333-357

KAMUYU, W. C. L. *et al.* Prediction model of photovoltaic module temperature for power performance of floating PVs. **MDPI Journal, Energies**, v. 11, n. 2, 2018., p. 477

LAMPTON, C. How Regenerative Braking Works. **HowStuffWorks.com**, 13 April. 2021. Disponível em: <https://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/regenerative-braking.htm>. Acesso em: 9 ago. 2023.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric vehicle technology explained**. Second. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2012. ISBN 978-1-119-94273-3. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=FwXcCmT1OQUC&oi=fnd&pg=PR13&dq=Electric+Vehicle+Technology+Explained&ots=q2TlhXo7ID&sig=EYoDfgb8mwb5halafLw9dcyB1EA&redir_esc=y#v=onepage&q=Electric%20Vehicle%20Technology%20Explained&f=false.

LIMA, Douglas Leonardo. **Uso de veículos elétricos em sistemas de transporte de cargas: avaliação dos benefícios em relação aos veículos movidos a óleo diesel**. 2021. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Nove de Julho. São Paulo. 2021.

LOPES, Luyza Lorena Lacerda. **Estudo da conversão do trem de potência a combustão para elétrico de uma van**. 2021. 116 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Brasília. Brasília. 2021.

MYERS, Michel William Carvalho. **Análise de viabilidade econômica e financeira entre um caminhão da categoria VUC com motor diesel e um caminhão com motor elétrico**. 2021. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2021.

NEOCHARGE. Carro elétrico, São Paulo. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico>. Acesso em: 9 set. 2023.

OLIVEIRA, R. O mundo já tem mais de 1,44 bilhão de veículos. **Notícias Automotivas**, 2022. Disponível em: https://www.noticiasautomotivas.com.br/o-mundo-ja-tem-mais-de-1-bilhao-de-veiculos/?expand_article=1. Acesso em: 21 jul. 2023.

OLIVEIRA, Yasmin Emily de Souza. **Desafios para a disseminação da mobilidade elétrica no cenário brasileiro: uma abordagem regulatória e econômica**. 2023. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade/CCET, Universidade Federal do Maranhão. São Luís. 2023.

PAIXÃO, J. L.; SAUSEN, J. P.; ABAIDE, A. R. Tendências e desafios da integração dos veículos elétricos na rede elétrica: Gestão de recargas e sustentabilidade energética. In: **Engenharia: O pilar do desenvolvimento energético-Volume 1**. Guarujá-SP: Editora Científica Digital, 2024., p. 103-117. ISBN 978-65-5360-592-3.

PASSOS, E. Falta de padrão para recarga de carros elétricos ainda é entrave no Brasil. **Quatro Rodas**, 1 fev. 2023. Disponível em: <https://quatrorodas.abril.com.br/carros-eletricos/falta-de-padrao-para-recarga-de-carros-eletricos-ainda-e-entrave-no-brasil>. Acesso em: 11 set. 2023.

PECORELLI PERES, L. A. *et al.* Análise e estudos da conversão de uma kombi para tração elétrica. Projeto conjunto da UERJ e CEFET - RJ. **5º Seminário e exposição de veículos elétricos à bateria, híbridos e de célula combustível**, Rio de Janeiro, 25 e 26 out. 2007. Disponível em: <http://www.gruve.eng.uerj.br/download/AnaliseEstudoConversaoKombi.pdf>.

PECORELLI PERES, L. A.; LAMBERT-TORRES, G.; HORTA NOGUEIRA, L. A. Analysis and discussion on energy supply to non-road electric vehicles in Brasil. **IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY - T&D**, São Paulo, n. LATIN AMERICA CONFERENCE, p. 18-22, March. 2002. Disponível em: <http://www.gruve.eng.uerj.br/download/ieeet-d2pes.pdf>.

PERBOLI, G.; ROSANO, M. Parcel delivery in urban areas: Opportunities and threats for the mix of traditional and green business models. **Transportation Reserarch Part C: Emerging Technologies**, 99, February 2019., p. 19-36

PINTO, Pedro Almodovar. **Análise e simulação do powertrain de um veículo elétrico**. 2021. 96 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Automotiva) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, p. 96. 2021.

PUCCINI, A. L. **Matemática financeira: objetiva e aplicada**. 9ª. ed. São Paulo: Elsevier, 2011. ISBN 978-85-352-4672-8.

REDAÇÃO. Como transformar taxa de juros anual em mensal? **A matemática do dinheiro - Educação financeira e investimentos**, 20 mar. 2023. Disponível em: <https://amatematicadodinheiro.com.br/como-transformar-taxa-de-juros-anual-em-mensal/>.

REDWAY. Lithium-ion Battery Pack Series Catalogue, 2023. Disponível em: <https://www.redway-tech.com/product/48v200ah/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

RODRIGUES, Julio Cesar Bortolini. **Dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos** - tração dianteira in-wheel. 2017. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2017.

SALDO, R. **Curso de conversão de carros elétricos**. [S.l.]: [s.n.], 2019. p. 51. Disponível em: https://teslabrasil.com/wp-content/uploads/2019/08/Apostila_Revisada.pdf. Acesso em: 14 set. 2023.

SANTOS, Juan Carlos Azeredo Coutinhos dos. **Veículo elétrico fotovoltaico**. 2012. 134 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Gama Filho. Rio de Janeiro. 2012.

SANTOS, J. C. A. C. PERES, L. A. P.; FILHO, M. A. F. C. COB-2023-1171 Mathematical model to convert small combustion engine trucks for electric traction with photovoltaic panel on the vehicle roof. In: COBEM – INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 27., 2023, Florianópolis.

SANTOS, Jackson da Silva dos. **Análise técnica e econômica da conversão de um veículo de combustão interna para um veículo elétrico**. 2022. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia e geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2022.

SANTOS, Lucas Regis da Mota. **Análise dos requisitos para legalização de veículo convertido em elétrico**. 2022. 170 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Automotiva) - Universidade de Brasília. Brasília. 2022.

SANTOS, M. M. D. **Veículos elétricos e híbridos: Fundamentos, características e aplicações**. São Paulo: Érica, 2020. p. 288. ISBN 978-85-365-3281-3.

SCHWERDFEGER, S.; BOYSEN, N. Optimizing the changing locations of mobile parcel lockers in last-mile distribution. **European Journal of Operational Research**, v. 285, n. 3, 16 September 2020., p. 1077-1094

SILVA, A. C. A. C. D.; PIZZOLATO, N. D. Utilização de veículos elétricos no transporte de carga e os desafios para implementação no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, nov. 2022.

SILVA, Paulo Cezar da. **Análise de viabilidade técnica e econômica da conversão de Van Peugeot a combustão para elétrica**. 2021. 216 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Automotiva) — Universidade de Brasília. Brasília. 2021.

SILVA, T. N. *et al.* Estudo de normas para a conversão de veículos com motores a combustão interna para elétricos. **Revista Vincci - Periódico Científico do UniSATC**, n. especial Engenharia Mecânica, p. 105-128, 2021. Disponível em: <https://revistavincci.satc.edu.br/index.php/Revista-Vincci/article/view/207>. Acesso em: 6 jan. 2024.

WENDT, H.; GÖTZ, M.; LINARDI, M. Tecnologia de células a combustível. **Química Nova**, v. 23, n. 4, Agosto 2000., p. 538-546 Acesso em: 18 set. 2023.

XPROM. **Transportes Expressos**, 2022. Disponível em: <https://xprom.com.br/wp-content/uploads/2022/11/HR.jpg>. Acesso em: 01 set. 2023.

YANG, C. *et al.* Regenerative braking system development and perspectives for electric vehicles: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 198, July 2024., p. 114389

YOSHIDA, D. O. Tudo o que você deve saber sobre pneus. **Carro Guru**, 10 Janeiro. 2021. Disponível em: <https://carroguru.wordpress.com/2021/01/10/tudo-o-que-voce-deve-saber-sobre-pneus/>. Acesso em: 14 set. 2023.

ZAPAROLLI, D. Engenharia Automotiva - Elétricos movidos a etanol. **Pesquisa FAPESP**, n. 308, p. 66-69, out. 2021. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/eletricos-movidos-a-etanol/>.

APÊNDICE A – Cálculos da potência do motor

Calculando a força de resistência ao rolamento (F_{RR}), usando a Equação (2):

$$F_{RR} = 0,015 \times 3584,4 \times 9,8$$

$$F_{RR} = 526,9068 \text{ N}$$

Calculando a força de resistência aerodinâmica (F_{AD}) para o ângulo mínimo e o máximo, usando a Equação (3):

$$F_{AD_{0^\circ}} = \frac{1}{2} \times 1,23 \times 2,626 \times 0,8 \times (80/3,6)^2$$

$$F_{AD_{0^\circ}} = 638,0748 \text{ N}$$

$$F_{AD_{15^\circ}} = \frac{1}{2} \times 1,23 \times 2,626 \times 0,8 \times (20/3,6)^2$$

$$F_{AD_{15^\circ}} = 39,879675 \text{ N}$$

Calculando a força para vencer a resistência da inclinação (F_D) do percurso, para o ângulo mínimo e o máximo, usando a Equação (4):

$$F_{D_{0^\circ}} = 3480 \times 9,8 \times \sin 0^\circ$$

$$F_{D_{0^\circ}} = 0 \text{ N}$$

$$F_{D_{15^\circ}} = 3480 \times 9,8 \times \sin 15^\circ$$

$$F_{D_{15^\circ}} = 8826,764714 \text{ N}$$

Calculando a força para vencer a inércia (F_I), força essa que só será válida para quando o veículo iniciar seu movimento a partir do repouso, usando a Equação (5):

$$F_I = 3584,4 \times 0,6944444444$$

$$F_I = 2489,166667 \text{ N}$$

No cálculo anterior foi considerado o tempo de 0 a 80 km/h a partir de uma relação com o tempo de 0 a 100 km/h, desempenho alcançado pelo veículo original.

Na força de tração, dada pela Equação (1), tem se duas situações, a primeira onde o veículo está parado num plano horizontal ou num plano inclinado e começa a se movimentar, nesse caso será usada a componente F_I . O segundo caso é quando

o veículo já está em movimento, com velocidade constante, não necessitando da componente F_I .

Calculando a força de tração (F_{TR}), no caso do veículo saindo do repouso.

$$F_{TR_{0^\circ}} = 526,9068 + 638,0748 + 0 + 2489,166667$$

$$F_{TR_{0^\circ}} = 3654,148267 \text{ N}$$

$$F_{TR_{15^\circ}} = 526,9068 + 39,879675 + 8826,764714 + 2489,166667$$

$$F_{TR_{15^\circ}} = 11882,71786 \text{ N}$$

Calculando a força de tração (F_{TR}), no caso do veículo já em movimento.

$$F_{TR_{0^\circ}} = 526,9068 + 638,0748 + 0 + 0$$

$$F_{TR_{0^\circ}} = 1164,9816 \text{ N}$$

$$F_{TR_{15^\circ}} = 526,9068 + 39,879675 + 8826,764714 + 0$$

$$F_{TR_{15^\circ}} = 9393,551189 \text{ N}$$

Calculando o torque nas rodas (T_R), no caso do veículo saindo do repouso, usando a Equação (6).

$$T_{R_{0^\circ}} = 3654,148267 \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 15'' \times 0.0254 \right) + 0.70 \times 0.195 \right]$$

$$T_{R_{0^\circ}} = 1194,906483 \text{ N/m}$$

$$T_{R_{15^\circ}} = 11882,71786 \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 15'' \times 0.0254 \right) + 0.70 \times 0.195 \right]$$

$$T_{R_{15^\circ}} = 3885,648739 \text{ N/m}$$

Calculando a força de tração (T_R), no caso do veículo já em movimento.

$$T_{R_{0^\circ}} = 1164,9816 \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 15'' \times 0.0254 \right) + 0.70 \times 0.195 \right]$$

$$T_{R_{0^\circ}} = 380,9489832 \text{ N/m}$$

$$T_{R_{15^\circ}} = 9393,551189 \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 15'' \times 0.0254 \right) + 0.70 \times 0.195 \right]$$

$$T_{R_{15^\circ}} = 3071,691239 \text{ N/m}$$

Calculando a relação de transmissão (R_T) para cada marcha.

$$R_{T_1} = 4,272 \times 4,271 \rightarrow R_{T_1} = 18,245712$$

$$R_{T_2} = 4,272 \times 2,248 \rightarrow R_{T_2} = 9,603456$$

$$R_{T_3} = 4,272 \times 1,364 \rightarrow R_{T_3} = 5,827008$$

$$R_{T_4} = 4,272 \times 1,000 \rightarrow R_{T_4} = 4,272$$

$$R_{T_5} = 4,272 \times 0,823 \rightarrow R_{T_5} = 3,515856$$

$$R_{T_6} = 4,272 \times 0,676 \rightarrow R_{T_5} = 2,887872$$

Calculando o torque no motor (T_m) em cada marcha, no caso do veículo saindo do repouso, usando a Equação (7).

No plano horizontal:

$$T_{m_0^\circ} = \frac{1194,906483}{0,9 \times 18,245712} \rightarrow 72,76635026 \text{ N/m} \quad (\text{primeira marcha})$$

$$T_{m_0^\circ} = \frac{1194,906483}{0,9 \times 9,603456} \rightarrow 138,2495916 \text{ N/m} \quad (\text{segunda marcha})$$

$$T_{m_0^\circ} = \frac{1194,906483}{0,9 \times 5,827008} \rightarrow 227,8483006 \text{ N/m} \quad (\text{terceira marcha})$$

$$T_{m_0^\circ} = \frac{1194,906483}{0,9 \times 4,272} \rightarrow 310,785082 \text{ N/m} \quad (\text{quarta marcha})$$

$$T_{m_0^\circ} = \frac{1194,906483}{0,9 \times 3,515856} \rightarrow 377,624644 \text{ N/m} \quad (\text{quinta marcha})$$

$$T_{m_0^\circ} = \frac{1194,906483}{0,9 \times 2,887872} \rightarrow 459,7412455 \text{ N/m} \quad (\text{sexta marcha})$$

Na rampa:

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3885,648739}{0,9 \times 18,245712} \rightarrow 236,6247745 \text{ N/m} \quad (\text{primeira marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3885,648739}{0,9 \times 9,603456} \rightarrow 449,5660195 \text{ N/m} \quad (\text{segunda marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3885,648739}{0,9 \times 5,827008} \rightarrow 740,9269882 \text{ N/m} \quad (\text{terceira marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3885,648739}{0,9 \times 4,272} \rightarrow 1010,624412 \text{ N/m} \quad (\text{quarta marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3885,648739}{0,9 \times 3,515856} \rightarrow 1227,976199 \text{ N/m} \quad (\text{quinta marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3885,648739}{0,9 \times 2,887872} \rightarrow 1495,006526 \text{ N/m} \quad (\text{sexta marcha})$$

No caso da rampa, os cálculos foram feitos para 15 graus, que por ser um grande ângulo de inclinação, só foi considerado o cálculo para subida em primeira marcha com o valor de 236,6247745 N/m.

Calculando o torque no motor (T_m) em cada marcha, no caso do veículo já em movimento, usando a Equação (7).

No plano horizontal:

$$T_{m_{0^\circ}} = \frac{380,9489832}{0,9 \times 18,245712} \rightarrow 23,19869173 \text{ N/m} \quad (\text{primeira marcha})$$

$$T_{m_{0^\circ}} = \frac{380,9489832}{0,9 \times 9,603456} \rightarrow 44,07545034 \text{ N/m} \quad (\text{segunda marcha})$$

$$T_{m_{0^\circ}} = \frac{380,9489832}{0,9 \times 5,827008} \rightarrow 72,64047827 \text{ N/m} \quad (\text{terceira marcha})$$

$$T_{m_{0^\circ}} = \frac{380,9489832}{0,9 \times 4,272} \rightarrow 99,08161236 \text{ N/m} \quad (\text{quarta marcha})$$

$$T_{m_{0^\circ}} = \frac{380,9489832}{0,9 \times 3,515856} \rightarrow 120,3907805 \text{ N/m} \quad (\text{quinta marcha})$$

$$T_{m_{0^\circ}} = \frac{380,9489832}{0,9 \times 2,887872} \rightarrow 146,5704325 \text{ N/m} \quad (\text{sexta marcha})$$

Na rampa:

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3071,691239}{0,9 \times 18,245712} \rightarrow 187,057116 \text{ N/m} \quad (\text{primeira marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3071,691239}{0,9 \times 9,603456} \rightarrow 355,3918782 \text{ N/m} \quad (\text{segunda marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3071,691239}{0,9 \times 5,827008} \rightarrow 585,7191659 \text{ N/m} \quad (\text{terceira marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3071,691239}{0,9 \times 4,272} \rightarrow 798,9209423 \text{ N/m} \quad (\text{quarta marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3071,691239}{0,9 \times 3,515856} \rightarrow 970,7423357 \text{ N/m} \quad (\text{quinta marcha})$$

$$T_{m_{15^\circ}} = \frac{3071,691239}{0,9 \times 2,887872} \rightarrow 1181,835713 \text{ N/m} \quad (\text{sexta marcha})$$

No caso da rampa, os cálculos foram feitos para 15 graus, que por ser um grande ângulo de inclinação, considerou-se somente o cálculo para subida em primeira marcha com o valor de 187,057116 N/m.

Calculando a rotação nas rodas (R_R) com o veículo se movendo no plano horizontal e na rampa, usando a Equação (8).

$$R_{R_{\text{plano horizontal}}} = \frac{\left(\frac{V_m}{60}\right) \times 1000}{2 \times \pi \times r}$$

$$R_{R_{\text{plano horizontal}}} = \frac{\left(\frac{80}{60}\right) \times 1000}{2 \times 3,141592 \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 15'' \times 0,0254\right) + 0,70 \times 0,195\right]}$$

$$R_{R_{\text{plano horizontal}}} = 648,9499539 \text{ RPM}$$

$$R_{R_{\text{rampa}}} = \frac{\left(\frac{V_i}{60}\right) \times 1000}{2 \times \pi \times r}$$

$$R_{R_{\text{rampa}}} = \frac{\left(\frac{20}{60}\right) \times 1000}{2 \times 3,141592 \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 15'' \times 0,0254\right) + 0,70 \times 0,195\right]}$$

$$R_{R_{\text{rampa}}} = 162,2374885 \text{ RPM}$$

Calculando a rotação máxima no motor (R_m) em cada marcha com o veículo se movendo no plano horizontal e na rampa, usando a Equação (9).

No plano horizontal:

$$R_{m_{\text{max}0^\circ}} = 648,9499539 \times 18,245712 \rightarrow 11840,55396 \text{ RPM} \quad (\text{primeira marcha})$$

$$R_{m_{\text{max}0^\circ}} = 648,9499539 \times 9,603456 \rightarrow 6232,162329 \text{ RPM} \quad (\text{segunda marcha})$$

$$R_{m_{\text{max}0^\circ}} = 648,9499539 \times 5,827008 \rightarrow 3781,436573 \text{ RPM} \quad (\text{terceira marcha})$$

$$R_{m_{\text{max}0^\circ}} = 648,9499539 \times 4,272 \rightarrow 2772,314203 \text{ RPM} \quad (\text{quarta marcha})$$

$$R_{m_{\text{max}0^\circ}} = 648,9499539 \times 3,515856 \rightarrow 2281,614589 \text{ RPM} \quad (\text{quinta marcha})$$

$$R_{m_{\text{max}0^\circ}} = 648,9499539 \times 2,887872 \rightarrow 1874,084401 \text{ RPM} \quad (\text{sexta marcha})$$

No caso do plano horizontal, só será considerada a rotação máxima no motor relativa à sexta marcha onde o veículo irá chegar à velocidade máxima de 80 km/h.

Na rampa:

$$R_{m_{\max 15^\circ}} = 162,2374885 \times 18,245712 \rightarrow 2960,13849 \text{ RPM} \quad (\text{primeira marcha})$$

$$R_{m_{\max 15^\circ}} = 162,2374885 \times 9,603456 \rightarrow 1558,040582 \text{ RPM} \quad (\text{segunda marcha})$$

$$R_{m_{\max 15^\circ}} = 162,2374885 \times 5,827008 \rightarrow 945,3591433 \text{ RPM} \quad (\text{terceira marcha})$$

$$R_{m_{\max 15^\circ}} = 162,2374885 \times 4,272 \rightarrow 693,0785508 \text{ RPM} \quad (\text{quarta marcha})$$

$$R_{m_{\max 15^\circ}} = 162,2374885 \times 3,515856 \rightarrow 570,4036473 \text{ RPM} \quad (\text{quinta marcha})$$

$$R_{m_{\max 15^\circ}} = 162,2374885 \times 2,887872 \rightarrow 468,5211003 \text{ RPM} \quad (\text{sexta marcha})$$

Calculando a velocidade angular na roda (ω_R) com o veículo se movendo no plano horizontal e na rampa, usando a Equação (10).

$$\omega_{R_{\text{plano horizontal}}} = 2 \times \pi \times \frac{R_R}{60}$$

$$\omega_{R_{\text{plano horizontal}}} = 2 \times 3,141592 \times \frac{648,9499539}{60}$$

$$\omega_{R_{\text{plano horizontal}}} = 67,9578661191 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{R_{\text{rampa}}} = 2 \times 3,141592 \times \frac{162,2374885}{60}$$

$$\omega_{R_{\text{rampa}}} = 16,9894665326 \text{ rad/s}$$

Calculando a velocidade angular no motor (ω_m) para cada marcha, com o veículo se movendo no plano horizontal e na rampa, usando a Equação (11).

No plano horizontal:

$$\omega_{m0^\circ} = 67,9578661191 \times 18,245712 = 1239,939653 \text{ rad/s} \quad (\text{primeira marcha})$$

$$\omega_{m0^\circ} = 67,9578661191 \times 9,603456 = 652,6303771 \text{ rad/s} \quad (\text{segunda marcha})$$

$$\omega_{m0^\circ} = 67,9578661191 \times 5,827008 = 395,9910295 \text{ rad/s} \quad (\text{terceira marcha})$$

$$\omega_{m0^\circ} = 67,9578661191 \times 4,272 = 290,3160041 \text{ rad/s} \quad (\text{quarta marcha})$$

$$\omega_{m0^\circ} = 67,9578661191 \times 3,515856 = 238,9300713 \text{ rad/s} \quad (\text{quinta marcha})$$

$$\omega_{m0^\circ} = 67,9578661191 \times 2,887872 = 196,2536187 \text{ rad/s} \quad (\text{sexta marcha})$$

Na rampa:

$$\omega_{m15^\circ} = 16,9894665326 \times 18,245712 = 309,9849134 \text{ rad/s} \quad (\text{primeira marcha})$$

$$\begin{aligned}\omega_{m_{15^\circ}} &= 16,9894665326 \times 9,603456 = 163,1575943 \text{ rad/s} && \text{(segunda marcha)} \\ \omega_{m_{15^\circ}} &= 16,9894665326 \times 5,827008 = 98,9977574 \text{ rad/s} && \text{(terceira marcha)} \\ \omega_{m_{15^\circ}} &= 16,9894665326 \times 4,272 = 72,57900103 \text{ rad/s} && \text{(quarta marcha)} \\ \omega_{m_{15^\circ}} &= 16,9894665326 \times 3,515856 = 59,73251785 \text{ rad/s} && \text{(quinta marcha)} \\ \omega_{m_{15^\circ}} &= 16,9894665326 \times 2,887872 = 49,06340469 \text{ rad/s} && \text{(sexta marcha)}\end{aligned}$$

Calculando a potência no motor (P_m) para cada marcha, no caso do veículo saindo do repouso no plano horizontal e na rampa, usando a Equação (12).

No plano horizontal:

$$\begin{aligned}P_{m_{0^\circ}} &= 72,76635026 \times 1239,939653 = 90225,88312 \text{ W} && \text{(primeira marcha)} \\ P_{m_{0^\circ}} &= 138,2495916 \times 652,6303771 = 90225,88312 \text{ W} && \text{(segunda marcha)} \\ P_{m_{0^\circ}} &= 227,8483006 \times 395,9910295 = 90225,88312 \text{ W} && \text{(terceira marcha)} \\ P_{m_{0^\circ}} &= 310,785082 \times 290,3160041 = 90225,88312 \text{ W} && \text{(quarta marcha)} \\ P_{m_{0^\circ}} &= 377,624644 \times 238,9300713 = 90225,88312 \text{ W} && \text{(quinta marcha)} \\ P_{m_{0^\circ}} &= 459,7412455 \times 196,2536187 = 90225,88312 \text{ W} && \text{(sexta marcha)}\end{aligned}$$

Na rampa:

$$\begin{aligned}P_{m_{15^\circ}} &= 236,6247745 \times 309,9849134 = 73350,11023 \text{ W} && \text{(primeira marcha)} \\ P_{m_{15^\circ}} &= 449,5660195 \times 163,1575943 = 73350,11023 \text{ W} && \text{(segunda marcha)} \\ P_{m_{15^\circ}} &= 740,9269882 \times 98,9977574 = 73350,11023 \text{ W} && \text{(terceira marcha)} \\ P_{m_{15^\circ}} &= 1010,624412 \times 72,57900103 = 73350,11023 \text{ W} && \text{(quarta marcha)} \\ P_{m_{15^\circ}} &= 1227,976199 \times 59,73251785 = 73350,11023 \text{ W} && \text{(quinta marcha)} \\ P_{m_{15^\circ}} &= 1495,006526 \times 49,06340469 = 73350,11023 \text{ W} && \text{(sexta marcha)}\end{aligned}$$

Calculando a potência no motor (P_m) para cada marcha, no caso do veículo já em movimento no plano horizontal e na rampa, usando a Equação (12).

No plano horizontal:

$$\begin{aligned}P_{m_{0^\circ}} &= 23,19869173 \times 1239,939653 = 28764,97778 \text{ W} && \text{(primeira marcha)} \\ P_{m_{0^\circ}} &= 44,07545034 \times 652,6303771 = 28764,97778 \text{ W} && \text{(segunda marcha)} \\ P_{m_{0^\circ}} &= 72,64047827 \times 395,9910295 = 28764,97778 \text{ W} && \text{(terceira marcha)} \\ P_{m_{0^\circ}} &= 99,08161236 \times 290,3160041 = 28764,97778 \text{ W} && \text{(quarta marcha)} \\ P_{m_{0^\circ}} &= 120,3907805 \times 238,9300713 = 28764,97778 \text{ W} && \text{(quinta marcha)}\end{aligned}$$

$$P_{m_0^\circ} = 146,5704325 \times 196,2536187 = 28764,97778 \text{ W} \quad (\text{sexta marcha})$$

Na rampa:

$$P_{m_{15^\circ}} = 187,057116 \times 309,9849134 = 57984,88389 \text{ W} \quad (\text{primeira marcha})$$

$$P_{m_{15^\circ}} = 355,3918782 \times 163,1575943 = 57984,88389 \text{ W} \quad (\text{segunda marcha})$$

$$P_{m_{15^\circ}} = 585,7191659 \times 98,9977574 = 57984,88389 \text{ W} \quad (\text{terceira marcha})$$

$$P_{m_{15^\circ}} = 798,9209423 \times 72,57900103 = 57984,88389 \text{ W} \quad (\text{quarta marcha})$$

$$P_{m_{15^\circ}} = 970,7423357 \times 59,73251785 = 57984,88389 \text{ W} \quad (\text{quinta marcha})$$

$$P_{m_{15^\circ}} = 1181,835713 \times 49,06340469 = 57984,88389 \text{ W} \quad (\text{sexta marcha})$$

APÊNDICE B – Cálculos para previsão da produção de energia pelo painel fotovoltaico

Tabela 32 - r_t = fração da radiação solar incidente na hora i em relação a radiação solar incidente no dia todo

r_t	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
07-08	0,04847821	0,04608326	0,0422132	0,03671824	0,03139039	0,02876473	0,02966502	0,03456189	0,03993748	0,04472992	0,04772336	0,04772336
08-09	0,07521015	0,07462065	0,07343899	0,07140909	0,0691517	0,06795604	0,06837158	0,07052519	0,07264137	0,07423582	0,07503838	0,07503838
09-10	0,09986913	0,10119485	0,10292829	0,10476965	0,10605294	0,1065425	0,10638415	0,1053403	0,10376614	0,10185144	0,10031219	0,10031219
10-11	0,1188425	0,12176182	0,1259472	0,13109135	0,13543913	0,13740117	0,1367404	0,13291604	0,12817407	0,12329078	0,1197956	0,1197956
11-12	0,12916392	0,13298602	0,13856776	0,14560554	0,15172211	0,15453775	0,15358547	0,14815274	0,14158931	0,13501081	0,13040554	0,13040554
12-13	0,12916392	0,13298602	0,13856776	0,14560554	0,15172211	0,15453775	0,15358547	0,14815274	0,14158931	0,13501081	0,13040554	0,13040554
13-14	0,1188425	0,12176182	0,1259472	0,13109135	0,13543913	0,13740117	0,1367404	0,13291604	0,12817407	0,12329078	0,1197956	0,1197956
14-15	0,09986913	0,10119485	0,10292829	0,10476965	0,10605294	0,1065425	0,10638415	0,1053403	0,10376614	0,10185144	0,10031219	0,10031219
15-16	0,07521015	0,07462065	0,07343899	0,07140909	0,0691517	0,06795604	0,06837158	0,07052519	0,07264137	0,07423582	0,07503838	0,07503838
16-17	0,04847821	0,04608326	0,0422132	0,03671824	0,03139039	0,02876473	0,02966502	0,03456189	0,03993748	0,04472992	0,04772336	0,04772336
soma	0,9431278	0,9532932	0,9661909	0,9791877	0,9875125	0,9904044	0,9894932	0,9829923	0,9722167	0,9582375	0,9465501	0,9465501

Fonte: O autor, 2023.

Figura 49 - Potencial Solar - SunData v 3.0

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Rio de Janeiro
Município: Rio de Janeiro, RJ - BRASIL
Latitude: 22,901° S
Longitude: 43,249° O
Distância do ponto de ref. (22,900417° S; 43,225006° O): 2,5 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
<input checked="" type="checkbox"/>	Piano Horizontal	0° N	6,04	6,22	5,06	4,36	3,59	3,35	3,34	4,20	4,43	5,11	5,14	5,93	4,73

Fonte: CRESESB, 2018.

Tabela 33 – Irradiação solar diária

Inclinação 0° (0°N) - RJ

Mês	Kwh/m ² /dia	MJ/m ² /dia
Janeiro	6,04	21,74
Fevereiro	6,22	22,39
Março	5,06	18,22
Abril	4,36	15,70
Mai	3,59	12,92
Junho	3,35	12,06
Julho	3,34	12,02
Agosto	4,20	15,12
Setembro	4,43	15,95
Outubro	5,11	18,40
Novembro	5,14	18,50
Dezembro	5,93	21,35
Total	56,77	
Média	4,730833333	

Fonte: CEPEL - CRESESB, 2014.

Tabela 34 - Dados horários de Radiação solar (kWh/m²) – Energia

IT	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
07-08	0,2928084	0,2866379	0,2135988	0,1600915	0,1126915	0,0963618	0,0990812	0,1451600	0,1769230	0,2285699	0,2452981	0,2829995
08-09	0,4542693	0,4641404	0,3716013	0,3113436	0,2482546	0,2276527	0,2283611	0,2962058	0,3218012	0,3793451	0,3856973	0,4449776
09-10	0,6032096	0,6294320	0,5208171	0,4567957	0,3807301	0,3569174	0,3553231	0,4424293	0,4596840	0,5204609	0,5156047	0,5948513
10-11	0,7178087	0,7573585	0,6372929	0,5715583	0,4862265	0,4602939	0,4567129	0,5582474	0,5678111	0,6300159	0,6157494	0,7103879
11-12	0,7801501	0,8271731	0,7011529	0,6348401	0,5446824	0,5177015	0,5129755	0,6222415	0,6272406	0,6899052	0,6702845	0,7733049
12-13	0,7801501	0,8271731	0,7011529	0,6348401	0,5446824	0,5177015	0,5129755	0,6222415	0,6272406	0,6899052	0,6702845	0,7733049
13-14	0,7178087	0,7573585	0,6372929	0,5715583	0,4862265	0,4602939	0,4567129	0,5582474	0,5678111	0,6300159	0,6157494	0,7103879
14-15	0,6032096	0,6294320	0,5208171	0,4567957	0,3807301	0,3569174	0,3553231	0,4424293	0,4596840	0,5204609	0,5156047	0,5948513
15-16	0,4542693	0,4641404	0,3716013	0,3113436	0,2482546	0,2276527	0,2283611	0,2962058	0,3218012	0,3793451	0,3856973	0,4449776
16-17	0,2928084	0,2866379	0,2135988	0,1600915	0,1126915	0,0963618	0,0990812	0,1451600	0,1769230	0,2285699	0,2452981	0,2829995
	5,6964920	5,9294837	4,8889259	4,2692585	3,5451700	3,3178546	3,3049074	4,1285677	4,3069201	4,8965938	4,8652678	5,6130424

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 35 - Radiação Solar Horária Média (W/m²) – Potência

G	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
07-08	292,808365	286,637904	213,59881	160,091523	112,691504	96,361835	99,0811812	145,159956	176,923032	228,569872	245,298078	282,999533
08-09	454,269308	464,140415	371,601288	311,343621	248,254607	227,652724	228,361065	296,205787	321,801248	379,345053	385,697258	444,977576
09-10	603,209562	629,431983	520,817147	456,795659	380,730055	356,91736	355,323057	442,429274	459,684008	520,460879	515,604677	594,851311
10-11	717,808692	757,35849	637,292852	571,558289	486,226469	460,293917	456,712935	558,247356	567,811131	630,015875	615,749392	710,387917
11-12	780,150089	827,173059	701,152861	634,840138	544,682361	517,701474	512,975467	622,241488	627,240628	689,905219	670,284479	773,304856
12-13	780,150089	827,173059	701,152861	634,840138	544,682361	517,701474	512,975467	622,241488	627,240628	689,905219	670,284479	773,304856
13-14	717,808692	757,35849	637,292852	571,558289	486,226469	460,293917	456,712935	558,247356	567,811131	630,015875	615,749392	710,387917
14-15	603,209562	629,431983	520,817147	456,795659	380,730055	356,91736	355,323057	442,429274	459,684008	520,460879	515,604677	594,851311
15-16	454,269308	464,140415	371,601288	311,343621	248,254607	227,652724	228,361065	296,205787	321,801248	379,345053	385,697258	444,977576
16-17	292,808365	286,637904	213,59881	160,091523	112,691504	96,361835	99,0811812	145,159956	176,923032	228,569872	245,298078	282,999533

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 36 - Médias Mensais Horárias da Temperatura [°C] (Média 2010 a 2020), calculadas a partir dos dados da estação meteorológica do Alerta Rio de São Cristóvão

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
07-08	26,99	26,88	28,53	25,86	23,37	21,84	21,94	21,11	22,43	22,67	24,28	25,70
08-09	27,45	27,94	27,67	27,56	24,19	22,23	22,95	22,07	23,37	23,48	25,08	26,54
09-10	28,53	29,02	27,29	25,77	23,10	23,11	22,85	22,87	24,28	24,29	25,89	27,37
10-11	29,78	30,17	27,67	24,54	23,06	23,48	22,75	23,74	25,14	25,13	26,62	28,26
11-12	30,65	31,26	28,66	25,41	24,11	22,11	23,20	24,62	25,87	25,83	27,18	29,04
12-13	31,34	32,07	26,99	28,29	23,06	21,96	22,31	25,26	26,46	26,27	27,57	29,58
13-14	31,87	32,41	27,37	26,69	22,20	23,30	21,34	25,52	26,65	26,39	27,70	29,89
14-15	31,93	32,35	27,17	25,07	22,89	23,17	21,78	25,48	26,40	26,21	27,63	29,82
15-16	31,37	31,92	27,77	25,91	23,36	21,98	23,27	25,22	25,98	25,83	27,32	29,30
16-17	30,61	31,14	26,66	24,26	23,39	22,54	24,24	24,64	25,43	25,33	26,77	28,77

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 37 - Dados do catálogo do painel CS6R-445H-AG 445W

Parâmetros	Valor	Unidade
Temperatura NOCT =	41	°C
Temp. amb. (NOCT) =	20	°C
Radiação (NOCT) =	800	W/m ²
Coef. Térmico da MP.	-0,26%	%/°C
Eficiência STC	22,80%	
Potência Máxima (STC)=	445	W
Temp. STC	25	°C
Área do painel	1,95	m ²
Coef. Térmico da MP.	-1,157	W/°C
T amb =	35	°C
G =	1000	W/m ²

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 38 - Temperatura horária da célula fotovoltaica

T _{cell}	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
07-08	43,558982	43,4658003	43,277834	42,1736397	41,4742652	41,2213655	41,2401239	41,2011248	41,5379231	41,7620881	42,3131148	43,0180627
08-09	45,2305994	45,6039446	44,5621417	43,9435244	42,299133	41,633236	41,8430517	41,7648092	42,3568067	42,6513295	43,4495749	44,6390405
09-10	47,432717	48,0977564	45,7455718	44,2927468	42,4748865	42,3875002	42,2651545	42,5885206	43,460093	43,7918531	44,7990294	46,4778325
10-11	49,7789477	50,6264282	47,1060621	44,2464494	42,8602895	43,001422	42,5686563	43,6125894	44,648778	45,0382375	46,091921	48,3316858
11-12	51,3816014	52,6399058	48,5932549	45,292892	43,801512	42,3677891	43,0522745	44,5907759	45,6024375	46,0250763	47,0177872	49,7356595
12-13	52,0549098	53,4753959	47,1233236	47,5809723	43,0807752	42,2654925	42,4786555	45,0921273	46,0666287	46,4034588	47,3462756	50,2643605
13-14	51,6524599	52,7514154	46,8676027	45,7815499	42,338606	42,8987469	41,7647542	44,8506984	45,7199838	46,0332121	46,9278073	49,7849067
14-15	49,9973007	50,7195903	45,6671919	43,8943081	42,3738415	42,4137357	41,7927332	44,0328106	44,6802145	45,0376069	45,9172588	48,2992213
15-16	47,458051	47,9149833	44,6072963	43,2982433	42,0423881	41,5629144	41,9320707	42,9340494	43,406988	43,7661499	44,5297892	46,1755495
16-17	44,8829972	44,9912254	42,7769682	41,8515363	41,4770307	41,3057073	41,5248389	41,8417976	42,2004797	42,5215159	43,0758242	44,1019993

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 39 - Potência Máxima na Irradiação de 1000 W/m²

P _{max}	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
07-08	423,527258	423,635069	423,852546	425,130099	425,939275	426,23188	426,210177	426,255299	425,865623	425,606264	424,968726	424,153101
08-09	421,593196	421,161236	422,366602	423,082342	424,984903	425,755346	425,512589	425,603116	424,918175	424,577412	423,653842	422,27763
09-10	419,045346	418,275896	420,997373	422,678292	424,781556	424,882662	425,024216	424,650082	423,641672	423,257826	422,092523	420,150148
10-11	416,330758	415,350223	419,423286	422,731858	424,335645	424,172355	424,673065	423,465234	422,266364	421,815759	420,596647	418,00524
11-12	414,476487	413,020629	417,702604	421,521124	423,246651	424,905468	424,113518	422,333472	421,16298	420,673987	419,52542	416,380842
12-13	413,697469	412,053967	419,403315	418,873815	424,080543	425,023825	424,777196	421,753409	420,625911	420,236198	419,145359	415,769135
13-14	414,163104	412,891612	419,699184	420,955747	424,939233	424,29115	425,603179	422,032742	421,026979	420,664574	419,629527	416,323863
14-15	416,078123	415,242434	421,088059	423,139286	424,898465	424,852308	425,570808	422,979038	422,229992	421,816489	420,798732	418,042801
15-16	419,016035	418,487364	422,314358	423,828933	425,281957	425,836708	425,409594	424,250305	423,703115	423,287565	422,404034	420,499889
16-17	421,995372	421,870152	424,432048	425,502773	425,936076	426,134297	425,880761	425,51404	425,099045	424,727606	424,086271	422,898987

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 40 - Eficiência horária do painel fotovoltaico

E _{pta}	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
07-08	0,21699824	0,21705347	0,2171649	0,21781947	0,21823406	0,21838397	0,21837285	0,21839597	0,21819632	0,21806343	0,21773679	0,21731889
08-09	0,2160073	0,21578598	0,21640356	0,21677028	0,21774507	0,21813982	0,21801544	0,21806182	0,21771088	0,21753629	0,21706309	0,21635798
09-10	0,21470189	0,21430765	0,21570203	0,21656326	0,21764089	0,21769269	0,21776522	0,21757353	0,21705686	0,21686019	0,21626314	0,21526794
10-11	0,21331104	0,21280865	0,21489553	0,2165907	0,21741242	0,21732876	0,2175853	0,21696646	0,2163522	0,21612133	0,21549671	0,21416898
11-12	0,21236099	0,21161506	0,21401392	0,21597037	0,21685446	0,21770437	0,21729861	0,21638659	0,21578688	0,21553633	0,21494786	0,2133367
12-13	0,21196185	0,21111979	0,21488529	0,214614	0,21728172	0,21776502	0,21763865	0,21608939	0,2155117	0,21531203	0,21475313	0,21302329
13-14	0,21220042	0,21154896	0,21503689	0,2156807	0,21772167	0,21738962	0,21806185	0,21623251	0,21571719	0,21553151	0,2150012	0,21330751
14-15	0,2131816	0,21275343	0,21574849	0,21679945	0,21770079	0,21767714	0,21804527	0,21671735	0,21633357	0,21612171	0,21560025	0,21418822
15-16	0,21468687	0,2144416	0,21637679	0,2171528	0,21789727	0,2181815	0,21796267	0,2173687	0,21708834	0,21687543	0,21642274	0,21544713
16-17	0,21621336	0,2161492	0,21746181	0,21801041	0,21823242	0,21833398	0,21820408	0,21801618	0,21780356	0,21761325	0,21728465	0,21667633

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 41 - Produção horária do painel fotovoltaico (kWh)

Energia	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
07-08	0,12390085	0,12132072	0,09045302	0,06799855	0,04795659	0,04103557	0,04219145	0,06181958	0,07527771	0,09719333	0,10415031	0,11992723
08-09	0,1913447	0,19530224	0,15681089	0,13160559	0,10540962	0,09683724	0,09708316	0,12595279	0,13661629	0,16091657	0,16325525	0,18773517
09-10	0,25254495	0,26303957	0,21906556	0,19290406	0,16158173	0,15151169	0,15088515	0,18770875	0,19456625	0,22009113	0,21743725	0,24970221
10-11	0,29857721	0,31428626	0,2670552	0,24139871	0,20613776	0,19506845	0,19377934	0,23618585	0,23955202	0,26551175	0,25874934	0,29667895
11-12	0,32306321	0,34133245	0,29261012	0,26735799	0,23032776	0,21977646	0,21736427	0,26255719	0,26393308	0,2899643	0,28094861	0,3216999
12-13	0,32245601	0,34053357	0,29380151	0,26567888	0,23078156	0,21983768	0,21770441	0,26219657	0,26359651	0,28966254	0,28069409	0,32122729
13-14	0,29702265	0,31242588	0,26723087	0,24038448	0,20643098	0,19512309	0,19420376	0,23538689	0,23884892	0,26478713	0,25815437	0,2954856
14-15	0,2507567	0,26113193	0,21911275	0,19311445	0,1616262	0,15150086	0,1510792	0,18697009	0,19391791	0,21934164	0,21677077	0,24844978
15-16	0,19017503	0,1940623	0,1567915	0,13183782	0,1054833	0,09685575	0,09705966	0,12555244	0,13622563	0,16042771	0,16277363	0,18694483
16-17	0,12345271	0,12081528	0,09057669	0,06805816	0,04795623	0,04102617	0,04215884	0,06171208	0,07514221	0,09699267	0,10393404	0,11957264

Produção diária de energia (média de cada mês)

2,37329402	2,4642502	2,0535081	1,80033868	1,50369175	1,40857295	1,40350925	1,74604223	1,81767652	2,06488877	2,04686766	2,34742361
------------	-----------	-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

Fonte: O autor, 2023.