



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

**Extensor de autonomia aplicado à veículos
elétricos - Jipe CAB Stark 4x4 híbrido elétrico**

Autor: Gabriel Henrique Chules
Orientador: Prof. Dr. Rudi Henri Van Els

Brasília, DF
2022



Gabriel Henrique Chules

**Extensor de autonomia aplicado à veículos elétricos -
Jipe CAB Stark 4x4 híbrido elétrico**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotivada Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Rudi Henri Van Els

Brasília, DF

2022

CG118ee

Gabriel Henrique Chules

Extensor de autonomia aplicado à veículos elétricos - Jipe CAB Stark 4x4 híbrido elétrico/ Gabriel Henrique Chules. – Brasília, DF, 2022-75 p.: il. (algumas color.); 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Rudi Henri Van Els

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA, 2022.

1. Veículo Híbrido. 2. Extensor de autonomia. I. Prof. Dr. Rudi Henri Van Els. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Extensor de autonomia aplicado à veículos elétricos - Jipe CAB Stark 4x4 híbrido elétrico

CDU 02:141:005.6

Gabriel Henrique Chules

Extensor de autonomia aplicado à veículos elétricos - Jipe CAB Stark 4x4 híbrido elétrico

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotivada Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Prof. Dr. Rudi Henri Van Els
Orientador

Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa
Convidado 1

Mahatma Marostica Dos Santos
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Magali e Miguel, que me apoiaram e possibilitaram o meu desenvolvimento até aqui. A minha namorada, Gabriela, que me auxiliou e motivou durante grande parte desta graduação.

Agradeço também a equipe UnBaja, enriquecedora atividade de extensão de grande diferencial em minha formação pessoal e acadêmica.

Por fim, agradeço aos membros da universidade, desde professores a colegas e amigos que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico.

*“In the end, your success will speak for itself”
(Patrick Bet David)*

Resumo

A inserção dos Veículos elétricos (VEs) no setor de mobilidade, motivada principalmente por questões ambientais e de eficiência energética, está gradativamente maior nos últimos anos. Acelerar a predominância dos VEs no setor automotivo tem se tornado prioridade, e um dos principais empecilhos para o uso deste tipo de veículo em maiores proporções é sua autonomia, que em geral ainda se demonstra inferior aos veículos a combustão. Sendo assim, este trabalho aborda uma análise de um modelo híbrido com um extensor de autonomia aplicado ao jipe Stark 4x4. Este extensor consiste em um gerador elétrico acoplado a um motor a combustão que será responsável por recarregar as baterias durante o uso e reduzir a quantidade de baterias, o que conseqüentemente reduz o custo e peso do veículo. Foram feitas análises teóricas com base no cálculo das resistências ao movimento para avaliar a escolha feita pelo fabricante, com auxílio de softwares de cálculo numérico, como o Octave; e de desenho 3D, como CATIA e Fusion 360. Para fazer uma análise da utilização do extensor, desenvolveu-se um algoritmo com três diferentes ciclos de condução, tanto no modo puramente elétrico quanto no modo híbrido. Os resultados mostraram que a autonomia do Stark ficará inferior aos demais VEs de mercado, com isso fez-se uma análise buscando soluções para aumento da autonomia além de uma comparação de custos entre a utilização da versão diesel e da versão híbrida elétrica.

Palavras-chaves: Extensor de Autonomia, Híbrido de longo alcance, Veículo fora de estrada.

Abstract

The insertion of Electric Vehicles (EVs) in the mobility sector, motivated mainly by environmental and energy efficiency issues, is gradually increasing in recent years. Accelerating the predominance of EVs in the automotive industry has become a priority. One of the main obstacles to using this type of vehicle in larger proportions is its autonomy, which is still inferior to combustion vehicles. Therefore, this paper discusses an analysis of a hybrid model with a range extender applied to the Jeep Stark 4x4. This extender consists of an electric generator coupled with a combustion engine. It is responsible for recharging the batteries during use and reducing the number of batteries, consequently decreasing the vehicle's cost and weight. Theoretical analyses based on motion resistance calculations were made to evaluate the choice made by the manufacturer, with the support of numerical calculation software such as Octave; and 3D design software, such as CATIA and Fusion 360. To analyze the use of the extender, an algorithm was developed with three different driving cycles, both in pure electric mode and hybrid mode. The results obtained a lower autonomy from the Stark than the other EVs on the market. It sought solutions to increase autonomy, and a cost comparison was performed between the diesel and hybrid versions.

Key-words: *Range Extender, Extended-range electric vehicle, Off-road.*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fotos do CAB Stark 4x4 diesel	15
Figura 2 – Veículo percorrendo uma rampa	18
Figura 3 – Turbilhonamento do ar devido ao movimento do veículo	21
Figura 4 – FIAT Palio convertido	23
Figura 5 – Gurgel BR-800 convertido	23
Figura 6 – Projeto Tecnomobe. A) Motor WEG acoplado ao câmbio. B) Esquemático da montagem da direção elétrica	24
Figura 7 – Projeto GamaGolfe	25
Figura 8 – Pontos importantes na história dos VEs	26
Figura 9 – Topologia do veículo elétrico de autonomia estendida	28
Figura 10 – Conector tipo 1	31
Figura 11 – Conector tipo 2	32
Figura 12 – Conector CHADeMO	32
Figura 13 – Conector combo tipo 1 a esquerda e conector combo tipo 2 a direita	33
Figura 14 – Diagrama do extensor de autonomia	34
Figura 15 – Moto-gerador Branco B4T3500-E.	37
Figura 16 – Modelo simplificado em CAD do veículo diesel.	38
Figura 17 – Modelo simplificado em CAD do veículo híbrido.	39
Figura 18 – CAD do invólucro do conjunto de baterias e dos componentes eletrônicos	41
Figura 19 – Modelo de funcionamento de um trocador do tipo chiller.	42
Figura 20 – Sistema de arrefecimento a água e a ar.	43
Figura 21 – Diagrama de Sankey do fluxo de energia de um veículo elétrico	44
Figura 22 – Curva de desempenho do motor F1A	46
Figura 23 – Curva de desempenho do motor M24Px-S	46
Figura 24 – Sistema de transmissão	48
Figura 25 – Rota do <i>rally</i> do gama.	49
Figura 26 – Perfil de velocidade NEDC plotado via Octave	54
Figura 27 – Perfil de velocidade WLTP plotado via Octave	54
Figura 28 – Perfil de velocidade GPS plotado via Octave	55
Figura 29 – Parte do algoritmo em Octave responsável por calcular as resistências.	56
Figura 30 – Geração e consumo de energia em uma rota WLTP	57
Figura 31 – Geração e consumo de energia na rota WLTP	58
Figura 32 – Geração e consumo de energia na rota NEDC	59
Figura 33 – Geração e consumo de energia na rota de GPS	59
Figura 34 – Vista superior e lateral de seis baterias e um extensor de autonomia	62

Lista de tabelas

Tabela 1 – Ficha técnica do Stark 4x4 diesel	16
Tabela 2 – Comparativo de peso:	38
Tabela 3 – Subsistemas alterados no projeto Stark	40
Tabela 4 – Dados de entrada do algoritmo.	48
Tabela 5 – Ciclos de condução utilizados para estimar autonomia.	50
Tabela 6 – Potência requerida pelos componentes auxiliares do primeiro cenário .	52
Tabela 7 – Comparativo de veículos elétricos	53
Tabela 8 – Resultados do Stark puramente elétrico	56
Tabela 9 – Autonomia total do Stark híbrido.	57

Lista de abreviaturas e siglas

IEMA Instituto de Energia e Meio Ambiente

PROCONVE Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

CAN *Controller Area Network*

MCI Motor a Combustão Interna

VE Veículo Elétrico

VPE Veículo Puramente Elétrico

VHEP Veículo Híbrido Elétricos *Plug-in*

VEAE Veículo Elétrico de Autonomia Estendida

VEH-S Veículo Elétrico Híbrido Série

VEH-P Veículo Elétrico Híbrido Paralelo

VEH-M Veículo Elétrico Híbrido Misto

SAE *Society of Automotive Engineers*

IEC *International Electrotechnical Commission*

NiCd Níquel-Cadmio

PbA Chumbo-Ácido

NaNiCl₂ Sódio Cloreto de Níquel

Li-Ion Ion de Lítio

NBR Norma Brasileira

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

UnB Universidade de Brasília

NEDC New European Driving Cycle

WLTP Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure

C_x Coeficiente aerodinâmico

GPS Global Positioning System

Lista de símbolos

η_m	Rendimento mecânico da transmissão
α	Inclinação do solo
ρ	Massa específica do ar
η	Eficiência

Sumário

	Lista de ilustrações	8
	Lista de tabelas	9
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO	17
2.1	Dinâmica veicular	17
2.1.1	Resistência mecânica	17
2.1.2	Resistência ao aclone	18
2.1.3	Resistência de inércia	19
2.1.4	Resistência ao rolamento	20
2.1.5	Resistência aerodinâmica	20
2.1.6	Potência	21
2.2	Projetos de eletrificação desenvolvidos na UnB	22
2.3	Breve história dos veículos elétricos e híbridos	26
2.4	Tipos de veículos elétricos e híbridos	27
2.4.1	Motores elétricos	28
2.4.2	Baterias	29
2.4.3	Carregadores	30
2.5	Extensores de autonomia	33
2.6	Dimensionamento de um moto gerador	34
2.7	Vantagens da arquitetura híbrida	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	Eletrificação do Jipe CAB Stark	37
3.2	Subsistemas	39
3.3	Grau de proteção	40
3.4	Arrefecimento	41
3.5	Eficiência	43
3.6	Breve comparação das curvas dos motores	45
3.7	Estimativa da Autonomia	47

3.7.1	Obtenção dos dados	47
3.7.2	Desenvolvimento do algoritmo	48
4	RESULTADOS	51
4.1	Possibilidades de montagens	51
4.1.1	Cenários para definição da motorização de tração	51
4.1.2	Cenários para serviços secundários do veículo	51
4.2	Demais veículos elétricos do mercado	52
4.3	Algoritmo de autonomia	53
4.3.1	Algoritmo desenvolvido	53
4.3.2	Comparação dos resultados obtidos com dados reais	56
4.3.3	Extensor de autonomia	57
4.4	Elétrico X Diesel	60
4.5	Comparativo entre uso de mais baterias ou de um extensor extensor de autonomia	61
5	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS	64
	ANEXOS	69
	ANEXO A – CÓDIGO EM OCTAVE UTILIZADO NO TRABALHO:	70

1 Introdução

1.1 Contextualização

Os veículos a combustão contribuem com uma parcela significativa de emissões no Brasil. Dados do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) revelam que em 2019 o setor de transporte foi responsável pela emissão de 196,5 milhões de toneladas de CO₂e, sendo os automóveis e caminhões os causadores de 71% destes gases de efeito estufa emitidos (ALBUQUERQUE et al., 2020).

A fim de limitar as emissões de gases de efeito estufa e incentivar o desenvolvimento de tecnologias menos poluentes, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu a norma PROCONVE P8 de emissões para veículos diesel (IBAMA, 2021). A norma P8 especifica novas metodologias de testes de emissões e novos limites máximos de emissão para gases de escapamento, partículas e ruído (MILLER, 2019).

Os VEs possuem uma eficiência consideravelmente maior que os veículos a combustão. Segundo Martins (2000), veículos a combustão entregam entorno de 30% da energia consumida, enquanto os VEs podem entregar até 83% segundo Santos (2020). Este é um importante fator que justifica a crescente demanda por tecnologias elétricas e híbridas no meio de mobilidade.

Com as limitações determinadas por novas legislações, a eficiência energética dos VEs e a crescente pressão por opções mais sustentáveis, a busca por mobilidade elétrica expande progressivamente. Segundo ABVE (2021) as vendas de veículos eletrificados no Brasil bateram novo recorde em 2020, com aumento de 66,5% nos emplacamentos em relação a 2019. Neste ano foram vendidos 19.745 VEs, e o mercado de eletrificados chegou a 1% do mercado total de veículos no Brasil.

Os VEs possuem também uma grande vantagem quanto a manutenção (PEREIRA, 2015; BRASIL, 2018). Devido ao número reduzido de peças móveis para sofrerem desgaste e a ausência da necessidade de manutenções rotineiras, como troca de óleo e filtros, o custo de utilização tende a ser expressivamente menor. Em testes feitos com veículos da Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos, o custo com manutenção por quilômetro para os veículos a combustão foi de R\$0,415 enquanto o custo dos VEs operados de maneira similar foi de R\$0,043 (PEREIRA, 2015).

Apesar de apresentar pontos positivos relevantes, os VEs também possuem algumas desvantagens em relação aos veículos a combustão, entre elas pode-se elencar a baixa autonomia, o maior período de reabastecimento do sistema e o maior custo empregado a tecnologia. Parte destes pontos pode ser amenizada com a hibridização, que permite a

utilização de uma quantidade reduzida de baterias sem a perda da autonomia.

O jipe Stark, apresentado na figura 1, foi o objeto de estudo deste trabalho, e é um projeto desenvolvido e fabricado no Brasil. Este veículo está sendo eletrificado e em seguida receberá um extensor de autonomia, com intuito de se obter um veículo menos poluente, mais eficiente e ainda capaz de entregar boa autonomia. O extensor é uma opção interessante e eficaz para aumentar a autonomia sem necessitar de grandes quantidades de bateria, que influenciam diretamente no custo, peso e na dificuldade de empacotamento dos módulos no veículo.

O veículo fabricado pela empresa CAB Motors caracteriza-se como um utilitário esportivo com tração 4x4 que pode ser utilizado tanto fora de estrada quanto em perímetro urbano. Segundo FENABRAVE (2022), o mercado de utilitários esportivos no Brasil vem crescendo anualmente. O percentual de emplacamentos acumulados em 2021 foi de 37,26% e até março de 2022, e o percentual acumulado já atinge 48,01%. O mercado de veículos elétricos também demonstra grande crescimento, segundo ABVE (2022) as vendas de 2021 aumentaram 77% em relação a 2020.

O projeto do jipe Stark foi desenvolvido pela empresa TAC Motors e teve cerca de 270 unidades vendidas. Posteriormente o projeto foi comprado pela empresa CAB Motors, com intuito de modernizar e manter este veículo nacional em fabricação.

Figura 1 – Fotos do CAB Stark 4x4 diesel



Fonte: (CAB, c2021)

Originalmente o Stark possui um motor turbo diesel de 2.3 litros acoplado a uma caixa de marchas de cinco velocidades com opção de tração 4x2, 4x4 e 4x4 com reduzida. A tabela 1 apresenta a ficha técnica do veículo.

Tabela 1 – Ficha técnica do Stark 4x4 diesel

Peso em ordem de marcha	1824 kg
Comprimento total	4038 mm
Entre eixos	2540 mm
Vão livre	260 mm
Ângulo de ataque	49°
Ângulo de saída	44°
Potência máxima	93,5 cv
Torque máximo	320 Nm
Aceleração (0 a 100 km/h)	12,8 s
Velocidade máxima	145 km/h
Autonomia urbana	595 km
Autonomia rodoviária	693 km
Área frontal	2,85 m ²
Coefficiente aerodinâmico (Cx)	0,56

Fonte: (MATIELLO, 2011)

A demanda de um veículo mais eficiente e menos poluente resultou em um projeto de eletrificação e hibridização. Após a conversão para propulsão elétrica, o veículo receberá um extensor de autonomia, que gerará energia elétrica para recarregar as baterias a partir da combustão de combustíveis, como a gasolina e etanol.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho abordará um estudo de caso sobre o um extensor de autonomia aplicado a versão eletrificada do jipe Stark 4x4, com o desenvolvimento de um algoritmo matemático para simulação teórica de autonomia e da eficácia do extensor selecionado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um código para calcular o consumo energético do veículo durante uma rota;
- Analisar o ganho de autonomia, tempo e capacidade de recarga trazidos pelo extensor selecionado;
- Comparar autonomia e custo de uso do Stark Diesel e do Stark híbrido.

2 Fundamentação

2.1 Dinâmica veicular

O entendimento da dinâmica veicular é necessário para compreender o funcionamento do veículo e estimar dados de autonomia e desempenho. Segundo Leal, Rosa e Nicolazzi (2012) as forças transmitidas ao solo por atrito devem se equilibrar com as forças geradas contra o movimento, que são:

- Resistência mecânica;
- Resistência de atrie;
- Resistência de inércia;
- Resistência de rolamento;
- Resistência aerodinâmica.

2.1.1 Resistência mecânica

“A resistência mecânica é considerada como toda e qualquer perda que ocorra entre o volante do motor e os mancais das rodas motrizes.” (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

Em outras palavras, a resistência mecânica pode ser considerada como as perdas provenientes do atrito de todos os componentes da transmissão do veículo. Neste caso, pode-se considerar o rendimento de transmissão de força a partir da equação 2.1:

$$P_c = P_e \cdot \eta_m \quad (2.1)$$

que também pode ser escrita da seguinte maneira:

$$P_m = (1 - \eta_m) \cdot P_e$$

onde,

η_m - Rendimento mecânico da transmissão,

P_c - Potência no cubo,

P_e - Potência efetiva no motor,

P_m - Potência consumida na transmissão.

O rendimento de uma transmissão automotiva fica entre 0,84 e 0,93, variando de acordo com as soluções de projeto empregadas e com a relação (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

Vale ressaltar que também deve-se considerar o escorregamento entre o pneu e o solo. O escorregamento se dá por uma relação entre a velocidade real e a velocidade teórica.

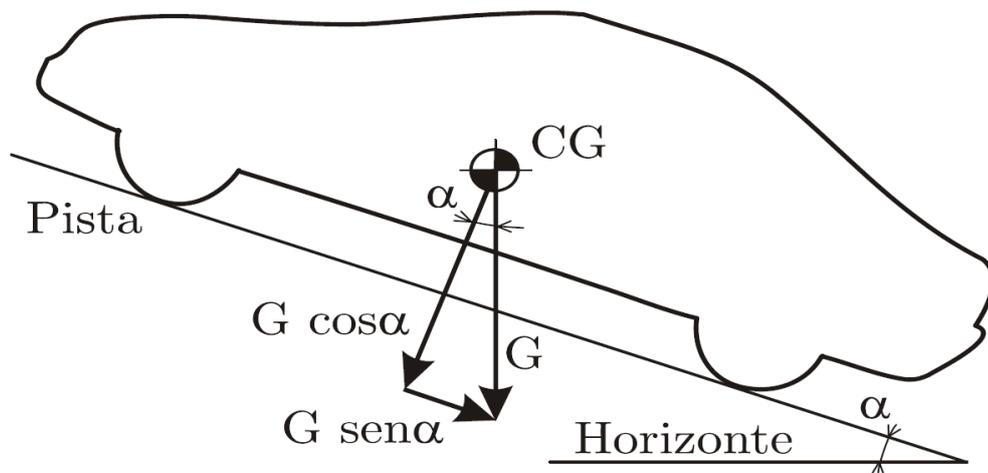
"No caso de solos rígidos (asfalto, concreto), com o veículo em marcha normal, o escorregamento dificilmente ultrapassa 5%". (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

Ou seja, a velocidade real tende a ser menor do que a velocidade teórica, já que pode haver até 5% de escorregamento.

2.1.2 Resistência ao aclive

Esta força ocorre devido a inclinação do terreno, quando o veículo está em um aclive existe uma força contrária ao movimento. Parte do peso do veículo é decomposto pela força normal e parte age de forma contrária ao movimento, paralela ao solo. O valor da resistência ao aclive pode ser encontrado a partir da equação 2.2.

Figura 2 – Veículo percorrendo uma rampa



Fonte: (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012)

$$Q_s = G \cdot \text{sen } \alpha \quad (2.2)$$

onde,

Q_s - Resistência ao aclave,

G - Peso do veículo,

α - Inclinação do solo.

2.1.3 Resistência de inércia

"O automóvel é um conjunto de inércias em translação e rotação e deve-se considerar as massas em translação e as inércias rotativas, pois a aceleração angular existente é proporcional as lineares" (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

A parcela da inércia vinda das massas em translação pode ser definida por:

$$F_1 = m \cdot a \quad (2.3)$$

onde,

m - Massa,

a - Aceleração.

A parcela da inércia vinda das massas em rotação, como eixos, engrenagens e rodas, pode ser definida por (RODRIGUES, 2017):

$$Q_i = m \cdot a \left(\frac{J}{m \cdot r_d^2} \right) \quad (2.4)$$

com

$$J = J_r + i_d^2 (J_t + i_{c_j}^2 \cdot J_m)$$

e

$$r_d = 1,02 \cdot 0,47 \cdot D$$

onde,

J - Somatório das inércias rotativas,

J_r - Inércias dos componentes transversais como rodas, discos de freio e semi eixos,

J_t - Inércias dos componentes longitudinais como cardans e engrenagens,

J_m - Inércia do motor,

i_d - Relação de transmissão do diferencial,

i_{cj} - Relação de transmissão da caixa de marchas,

r_d - Raio dinâmico do pneu,

D - Diâmetro do pneu.

O raio dos pneus podem variar de acordo com a velocidade dos mesmos, devido a elasticidade de seus componentes e a força centrífuga. Pode ser definida pela equação do raio dinâmico apresentada acima.

2.1.4 Resistência ao rolamento

Esta, por sua vez, ocorre devido as perdas existentes entre o pneu e o solo e pode ser definida por (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012):

$$Q_r = f \cdot G \cdot \cos \alpha \quad (2.5)$$

onde,

f - Coeficiente de atrito de rolamento,

G - Peso do veículo,

α - Inclinação da pista.

O coeficiente varia de acordo com a velocidade, pressão dos pneus, carga radial e tipo de pneu, além do tipo do piso, temperatura e outras variáveis de menor influência, mas pode ser estimado a partir da equação:

$$f = a + 0,052 \left(\frac{v_t}{100} \right)^2 \quad (2.6)$$

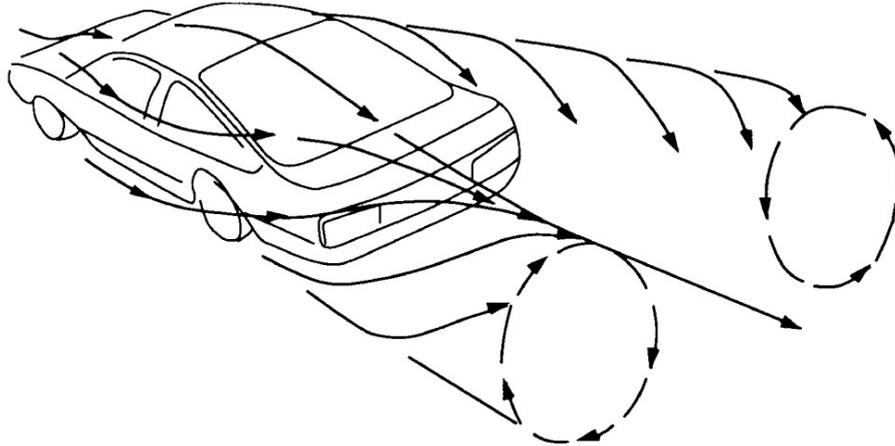
Onde a constante "a" varia de acordo com o tipo de pneu, sendo 0,0150 para pneus normais e 0,0258 para pneus de alta histerese.

2.1.5 Resistência aerodinâmica

A resistência aerodinâmica age de três maneiras, através da resistência de forma, da resistência de atrito e por perdas por correntes de ar (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

O primeiro caso ocorre devido a geometria do veículo. Conforme visto na imagem 3, cria-se um turbilhonamento do ar devido ao movimento do veículo, este turbilhonamento altera-se dependendo da geometria da carroceria e da velocidade.

Figura 3 – Turbilhonamento do ar devido ao movimento do veículo



Fonte: (GILLESPIE, 1992)

O segundo caso ocorre devido a viscosidade, e se dá devido a perda por atrito entre a superfície do veículo e o ar. Pode ser amenizada com o uso de superfícies polidas, pois a rugosidade influencia diretamente no atrito gerado (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

O terceiro caso ocorre devido ao ar que penetra a carroceria, principalmente para refrigeração e ventilação. Ao penetrar, o ar perde a velocidade ao sair este ar é acelerado novamente, devido a isto consome potência. Este caso contribui com 1 a 10% da resistência total do veículo (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

A resistência aerodinâmica pode ser calculada por:

$$Q_a = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_x \cdot A \quad (2.7)$$

onde,

ρ - Massa específica do ar,

v - Velocidade relativa do vento,

C_x - Coeficiente de resistência aerodinâmica,

A - Área projetada da seção transversal do veículo.

2.1.6 Potência

A potência consumida pelas resistências ao movimento pode ser calculada a partir do produto da velocidade com o somatório de todas as resistências citadas acima.

$$P = v_t \cdot \sum Q \quad (2.8)$$

Vale ressaltar que para a resistência aerodinâmica deve-se usar a velocidade real do veículo, enquanto as demais usa-se da velocidade teórica, a qual considera o escoamento.

2.2 Projetos de eletrificação desenvolvidos na UnB

Alguns projetos realizados na Universidade de Brasília (UnB) campus Gama anteriormente efetuaram a conversão de veículos a combustão para veículos elétricos. Os automóveis utilizados nestes projetos foram um Fiat Palio 1999, um Gurgel BR-800 1991, uma Van Peugeot Boxer 2008 e um carrinho de golfe.

No projeto de conversão do Fiat Palio EDX 1.0 ano 1999, o veículo recebeu um motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo com 22 kW refrigerado a água. O sistema de transmissão foi mantido original do veículo, o sistema de arrefecimento também teve seus componentes mantidos, porém, um termostato foi adicionado para que as ventoinhas sejam ligadas quando o líquido de arrefecimento atingir a temperatura estabelecida. Instalou-se sensores de temperatura na armadura do motor com intuito de proteger o motor contra superaquecimentos. Esta conversão resultou em uma bancada de testes e instrumentações que podem ser vistas em oliveira (2018). Houve também um estudo a respeito de frenagem regenerativa, desenvolvido por Ribeiro (2017). Os testes seguiram o ciclo SAE J227a. Durante estes testes utilizou-se de uma bancada de acionamento que utiliza a rede elétrica da própria universidade invés de um pacote de baterias, o que permite uma ampla gama de testes. Também se utilizou de uma bancada dinamométrica disponível no campus. O dinamômetro de rolo utilizado foi fabricado pela Dynamite, do tipo correntes de Foucault. Este modelo é capaz de aferir a potência em somente um eixo e pode ser visto na imagem 4 abaixo.

Figura 4 – FIAT Palio convertido



Fonte: (UnBTV, 2017)

O Gurgel BR-800 ano 1991, assim como o Stark, é um produto nacional, e originalmente possui um sistema de propulsão a combustão interna de 800 cilindradas que gera 24 kW de potência a 5000 RPM. Este veículo passou por dois processos de conversão, inicialmente foi instalado um motor de indução de gaiola com 5,5 kW, fabricado pela WEG, modelo W22 Plus (VIEIRA; ELS; KHALIL, 2015). Na segunda fase o veículo recebeu um motor *brushless* CC refrigerado a água com 30 kW, acoplado a um pacote de baterias de LiFePo4 com 10 kWh. Este veículo permitiu o desenvolvimento de estudos em áreas como a de sistemas de arrefecimento (ELS et al., 2017). Outro grande proveito deste projeto foi a utilização do motor a combustão do BR-800 acoplado a um motor elétrico, com intuito de desenvolver estudos sobre modelos híbridos (CHAVES, 2017; ELS, 2020; RIBEIRO; ELS; MENEGHIN, 2019).

Figura 5 – Gurgel BR-800 convertido

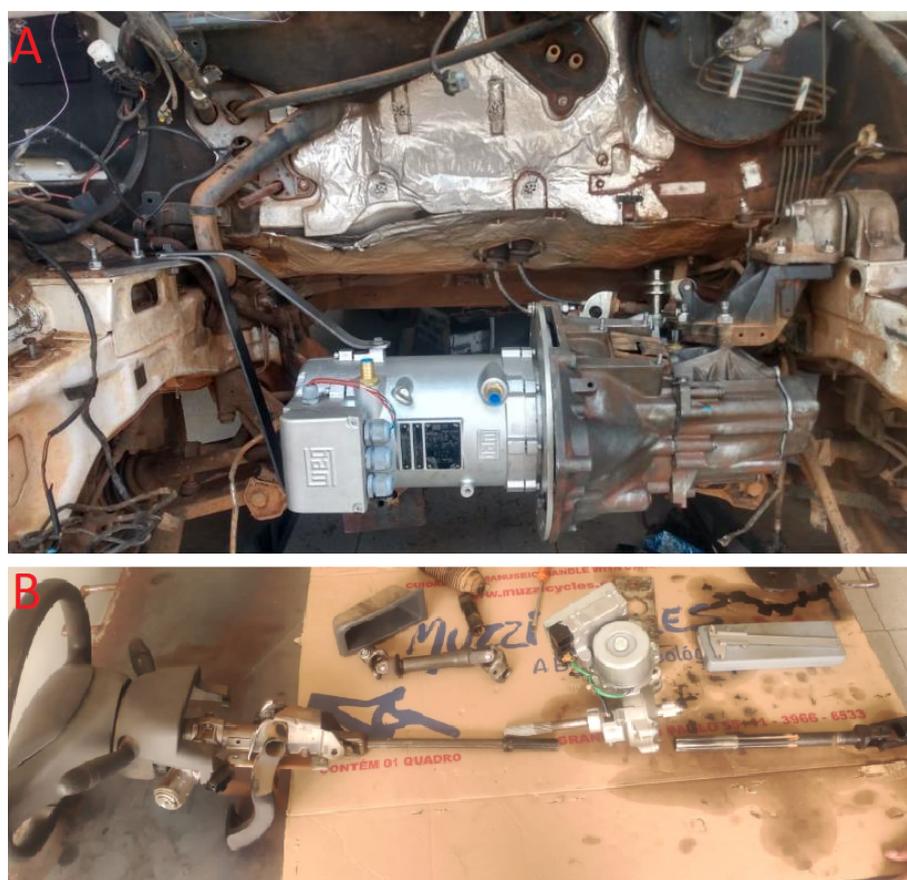


Fonte: (ELS, 2021)

Ainda em fase de desenvolvimento, tem-se o projeto de conversão Tecnomobele, que consiste na conversão de um veículo de transporte de passageiros para propulsão elétrica. A Van Peugeot Boxer ano 2008 teve seu motor turbo diesel removido para a implementação de um motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilos fabricado pela WEG capaz de entregar 30 kW de potência nominal e 60 kW de potência de pico (LOPES, 2021; SILVA, 2021). O inversor utilizado foi o WEG CVW500, específico para implementação automotiva, e o pacote de bateria será composto por baterias de LiPoFe4. Neste trabalho adaptou-se um sistema de direção elétrica, para eliminar o sistema mecânico de acionamento da direção hidráulica original, e uma bomba de vácuo elétrica para permitir o correto funcionamento do sistema de freios. Atualmente está sendo estudado o dimensionamento do sistema de arrefecimento.

Foram removidos da Van, o Motor a Combustão Interna (MCI), o escapamento, o sistema de direção hidráulica, o sistema de ar condicionado, bomba de vácuo mecânica, bomba d'água mecânica, o tanque de combustível e as linhas de combustível, a ECU e a embreagem. Estão sendo adicionados ao veículo o motor elétrico, o inversor, a direção elétrica, bomba de vácuo elétrica, bomba d'água elétrica e o conjunto de bateria.

Figura 6 – Projeto Tecnomobele. A) Motor WEG acoplado ao câmbio. B) Esquemático da montagem da direção elétrica



Fonte: Acervo Tecnomobele

Na figura 6 é possível ver o motor elétrico já acoplado ao veículo e também o início do desenvolvimento do acoplamento do sistema de direção elétrica, a qual foi montada diretamente na coluna de direção original. Este sistema permitirá a eliminação de todos os componentes do antigo sistema de direção elétrica, como bomba de direção, reservatório e mangueiras (KHALIL et al., 2021).

Existe também um projeto de um extensor de autonomia para um carrinho de golfe, com 800 W, convertendo este veículo para híbrido. O carrinho de golfe utiliza de um motor elétrico CC com enrolamento em série, que possui 3,5 kW e opera a 48V, e um pacote de baterias composto de 4 baterias chumbo ácido tracionárias de 12V e 100Ah (OLIVEIRA, 2018). Com o objetivo de modernizar o veículo, serão adicionados módulo de instrumentação, módulo de sinalização, BMS e computador de bordo (OBC), todos interligados por um barramento CAN implementado utilizando o protocolo J1939 e o protocolo OpenCAN. O carro também em recebeu um moto-gerador a gasolina de 1kW e um módulo de controle híbrido para aumentar a sua autonomia (OLIVEIRA, 2018).

Figura 7 – Projeto GamaGolfe



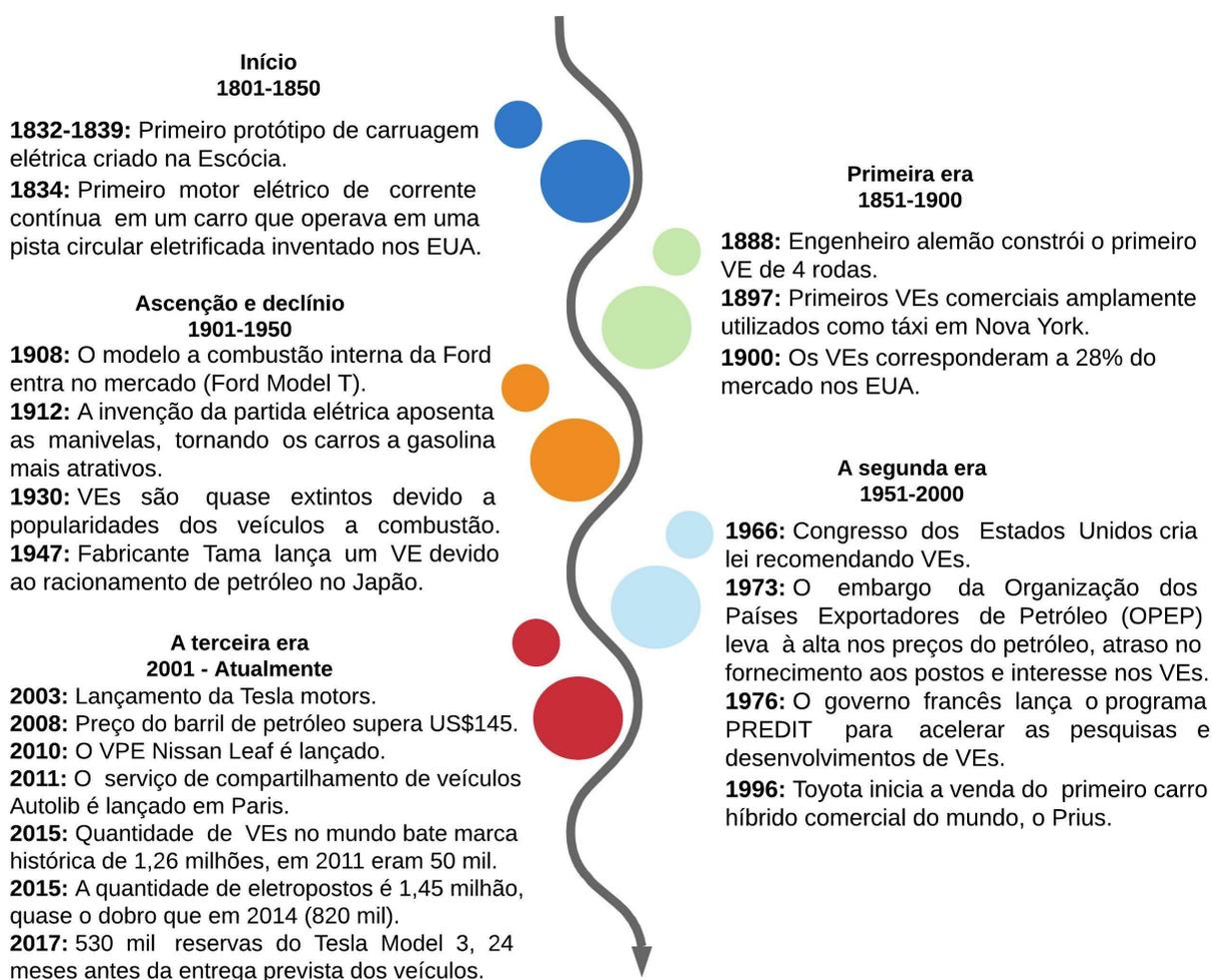
Fonte: (ELS, 2021)

Estes projetos geraram dados importantes para auxiliarem nos processos de eletrificação de outros veículos, como projetos de sistemas de arrefecimento, de adequação do sistema de freio, de instrumentação eletrônica, de comunicação CAN e de freio regenerativo.

2.3 Breve história dos veículos elétricos e híbridos

Os primeiros modelos de VEs foram desenvolvidos na França, Estados Unidos e Reino Unido na década de 1880, ainda com baterias de Chumbo-Ácido. Cerca de duas décadas depois, Thomas Edison apresentou as baterias de níquel-ferro, que aumentavam a capacidade de armazenamento de energia, mas em contra partida tinham um elevado custo de produção. Ainda neste período, surgiram os primeiros modelos de regeneração de energia e os primeiros modelos híbridos elétricos (LEGEY, 2011). A figura 8 apresenta a história resumida dos VEs em uma linha do tempo.

Figura 8 – Pontos importantes na história dos VEs



Fonte: (DENTON, 2018; MAGALHÃES et al., 2017)

Na época do declínio da popularidade dos VEs a distribuição de energia elétrica ainda não havia sido tão expandida. Países como os Estados Unidos já possuíam grandes rodovias interligando os estados, o que demandava grandes autonomias, ponto fraco dos VEs. De acordo com Høyer (2008), Ferdinand Porsche foi um dos primeiros a apresentar um veículo híbrido, ainda em 1900, em Paris. Este veículo tinha o intuito de amenizar o problema da baixa autonomia das baterias.

Outro empecilho para a inserção dos VEs no setor de mobilidade é o alto custo das baterias, cenário que tem sido alterado nos últimos anos. Segundo Knupfer et al. (2017), de 2010 a 2016 os preços das baterias reduziram em cerca de 80%, indo de \$ 1.000,00/kWh a \$ 227,00/kWh. Mesmo após esta significativa redução, as baterias ainda agregam um alto custo aos VEs, porém, projeções indicam que até o final da década os preços das baterias devem estar abaixo de \$ 190,00/kWh, e até 2030 sugerem que estejam menores que \$ 100,00/kWh (KNUPFER et al., 2017).

No Brasil, nos anos de 2019 e 2020 houve um crescimento de 66,5% nos emplacamentos de automóveis eletrificados, no total a frota de automóveis elétricos ou híbridos em circulação no país já chega a 42.269 unidades.

Ao longo da história percebe-se que a popularidade dos VEs dependeu principalmente de incentivos governamentais, demanda de combustíveis derivados do petróleo e as emissões de gases poluentes. Isso explica a expansão do interesse e aceitação dos VEs nos últimos anos dado as preocupações ambientais e os recursos não renováveis utilizados nos MCIs.

2.4 Tipos de veículos elétricos e híbridos

Para se aprofundar nos extensores de autonomia é importante entender como se caracterizam os VEs. Com o passar dos anos, surgiram variações com intuito de adequar as necessidades distintas demandadas pelo mercado.

Denton (2018) classifica os veículos desta categoria com base na topologia de cada um, como:

- Veículo Puramente Elétrico (VPE):

Se refere a veículos onde toda energia vem exclusivamente das baterias.

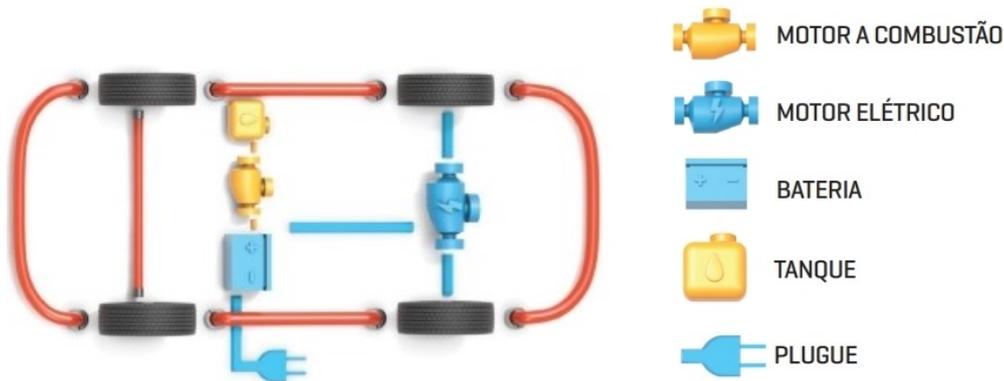
- Veículo Híbrido Elétricos *Plug-in* (VHEP):

São veículos que possuem um MCI além do sistema de baterias, assim o motor elétrico auxilia o motor a combustão. Dependendo da necessidade os motores podem operar individualmente ou de forma conjunta. Possuem também o sistema *Plug-in*, que permite o carregamento externo.

- Veículo Elétrico de Autonomia Estendida (VEAE):

São veículos com a capacidade de carregamento externo (*plug-in*) que também possuem um MCI, porém operando apenas como um gerador, alimentando o sistema elétrico para estender a autonomia das baterias. Esta é a topologia empregada no Stark.

Figura 9 – Topologia do veículo elétrico de autonomia estendida



Fonte: (GRANDE, 2019)

Santos (2020) se estende um pouco mais nestas classificações, citando ramificações para os veículos híbridos, com base na topologia dos mesmos, sendo eles:

- Veículo Elétrico Híbrido Série (VEH-S):

Caracteriza-se por um veículo tracionado exclusivamente pelo motor elétrico, tendo o MCI operando somente como gerador. De maneira muito similar aos VEAes, diferenciando-se somente pela possibilidade de não ser *plug-in*.

- Veículo Elétrico Híbrido Paralelo (VEH-P):

Caracteriza-se por um veículo tracionado por ambos os motores, elétrico e combustão. A montagem pode variar, pode-se ter um motor em cada eixo ou ambos os motores atuando no mesmo eixo.

- Veículo Elétrico Híbrido Misto (VEH-M):

Caracteriza-se por ter ambos os motores acoplados ao mesmo eixo, porém a atuação deles é controlada buscando o melhor desempenho para cada cenário.

2.4.1 Motores elétricos

Motores elétricos são componentes responsáveis por transformar energia elétrica em mecânica. Segundo Thattil et al. (2019) os motores mais utilizados nos veículos elétricos são:

- Motor com escovas

São motores que possuem baixa eficiência e baixa densidade de potência, além de demandarem uma maior manutenção que os demais modelos, a troca de escovas.

- Motor de indução

Embora possuam uma melhor eficiência e densidade de potência que o motor com escovas, ainda entregam resultados inferiores aos demais modelos.

- Motor de relutância comutado

Estes motores possuem baixo custo e bom rendimento, porém possuem baixa densidade de potência, requerendo motores grandes e pesados para atingir a demanda.

- Motor sem escovas (*Brushless*)

São motores com um controle mais complexo, se comparado aos demais, o que apresenta um custo de implementação maior.

- Motor síncrono de ímãs permanentes

Motores com boa densidade de potência, geralmente menores e mais leves que os demais modelos de motores, possuem uma ampla faixa de entrega de torque e potência aliados a uma boa eficiência. Possui um alto custo, devidos aos materiais empregados na fabricação.

O motor empregado no Stark, fabricado pela MAGELEC, possui esta tecnologia.

2.4.2 Baterias

As baterias são componentes responsáveis por armazenar a energia elétrica e alimentar os consumidores no momento de demanda. O que se busca são baterias que consigam armazenar grandes quantidades de energia em pouco espaço e peso, que entreguem uma grande potência capaz de suprir a demanda dos motores elétricos atuais e tenham uma longa vida útil suportando vários ciclos de carga e descarga aliados ao baixo custo. Porém, dificilmente se atende a todos estes critérios, e por isso, selecionam-se os tipos mais adequados a cada projeto. A taxa de descarga de uma bateria, *C-Rate*, especificada pelo fabricante pode ser interpretada da seguinte maneira, com a taxa de 1C a bateria entrega sua capacidade de corrente em uma hora, por exemplo: Uma bateria de 50 Ah com 1C, entrega até 50 A por uma hora. Se esta bateria de 50 Ah tiver uma taxa de 2C, a mesma entregará até 100 A por 30 minutos (BUCHMANN, 2016).

Existem diversos modelos de bateria no mercado e serão citados neste trabalho alguns motivos para a escolha da bateria do Stark perante algumas opções do mercado:

- Níquel-Cádmio (NiCd)

São baterias que possuem longa vida útil e podem ser totalmente descarregadas sem danos, mas possuem um alto custo, efeito memória e são nocivas ao meio ambiente se não recicladas.

Densidade de energia de cerca de 60 Wh/kg, 1350 ciclos com 80% de descarga e 72,5% de eficiência (MATHEYS et al., 2009).

- Chumbo-Ácido (PbA)

São baterias robustas e confiáveis, porém não se comportam bem com grandes taxas de descarga e ciclos de descarga total, tendo sua vida útil reduzida drasticamente. Seus componentes são altamente nocivos ao meio ambiente. Além disso, possui uma baixíssima densidade de energia, o que se traduz em uma grande quantidade de baterias para suprir as necessidades de um VE.

Densidade de energia de cerca de 40 Wh/kg, 500 ciclos com 80% de descarga e 82,5% de eficiência (MATHEYS et al., 2009).

- Sódio Cloreto de Níquel (NaNiCl₂)

São baterias facilmente recicláveis com excelente densidade e eficiência, porém sofrem perda de carga por aquecimento. Além disso, são constituídas por grandes blocos e não podem ser divididas em pequenas células, o que dificulta o empacotamento.

Densidade de energia de cerca de 125 Wh/kg, 1000 ciclos com 80% de descarga e 92,5% de eficiência (MATHEYS et al., 2009).

- Ion de Lítio (Li-Ion)

As baterias de Íon de lítio, modelo selecionado para o Stark, possuem ótima densidade de energia e uma longa vida útil sem grandes problemas de efeito memória e podem ser recicladas.

Densidade de energia de cerca de 125 Wh/kg, 1000 ciclos com 80% de descarga e 90,0% de eficiência (MATHEYS et al., 2009).

Cada um dos sete módulos do Stark possui 91,5 Ah, uma tensão nominal de 51,2 V e o carregamento e descarregamento máximo pode ser feito em 2C.

2.4.3 Carregadores

Conforme citado anteriormente, os VEs podem ter ou não a capacidade de serem recarregados por uma fonte externa. Veículos *plug-in*, como o Stark, estão aptos a este tipo de carregamento, esta tecnologia permite que com um carregador apropriado seja possível recarregar as baterias até mesmo em uma tomada residencial. Esta cômoda tecnologia permite que o usuário recarregue o veículo em casa, eliminando a dependência de postos de combustível ou centros de recarga específicos.

Agora se estendendo aos sistemas de carregamento externo, eles podem variar em diversos aspectos, o que influencia diretamente na velocidade de carregamento e na facilidade de uso. Khalid et al. (2021) cita algumas diferenças, como o tipo de condutividade

dos carregadores, podendo apresentar carregamento indutivo ou condutivo, e também se a alimentação é unidirecional ou bidirecional. O carregador condutivo é aquele que necessita de contato direto do material condutivo para transferir a energia, este é o método mais eficiente e robusto. O carregador indutivo recarrega sem a necessidade de contato, embora apresente uma menor eficiência, é capaz de recarregar sem a necessidade de conectar cabos e pode até mesmo recarregar o veículo em movimento.

Os carregadores bidirecionais são carregadores capazes de injetar a energia armazenada na bateria do veículo na rede, ou seja, o veículo alimenta a rede elétrica.

Kersten et al. (2021) divide os carregadores em quatro principais tipos, carregador modo 1, 2, 3 e 4. No modo 1 a corrente alternada que sai direto da rede é convertida para corrente contínua por um carregador interno ao veículo, este tipo de carregador não excede 16 A e pode usar plugue padrão residencial convencional. O carregador modo 2 possui comunicação com o veículo para garantir a correta recarga. Este pode ser monofásico ou trifásico, o que permite tanto o uso residencial quanto comercial, seu plugue é de 32 A e pode entregar até 22 kW. O modo 3 também entrega corrente alternada que necessita ser convertida e é somente trifásico. Este pode demandar até 63 A, entregando 43 kW. Já o modo 4 fornece corrente contínua e pode entregar até 400 A e 1000 V, ou seja, 400 kW.

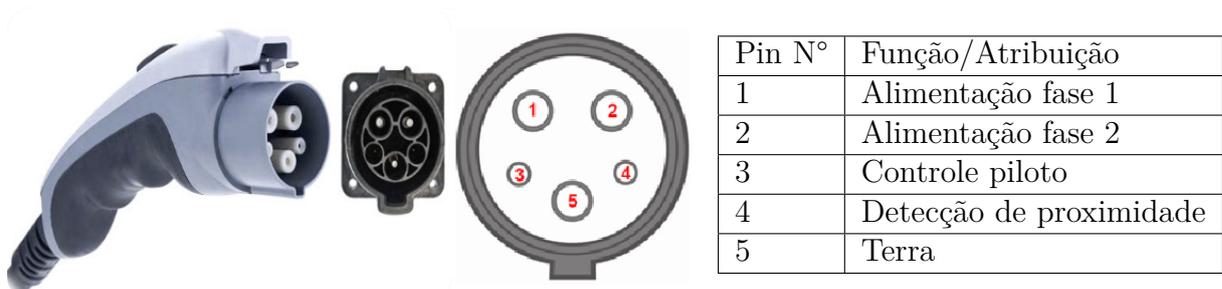
Estes carregadores podem contar com diferentes tipos de plugues, segundo Khalid et al. (2021) os modelos utilizados são:

- **Conector Tipo 1:**

Também conhecido como conector SAE J1772, segue o padrão da norma IEC 62196-2. É utilizado no padrão de corrente alternada e entrada monofásica. Através dos pinos de comunicação ele evita que o veículo se movimente durante o abastecimento e informa a correta corrente e tensão necessária.

Este plugue suporta dois níveis de recarga, o nível 1 opera com até 1,9 kW, o que pode ser usado em um padrão residencial, e o nível 2 opera com até 19,2 kW, geralmente é utilizado em carregadores comerciais.

Figura 10 – Conector tipo 1

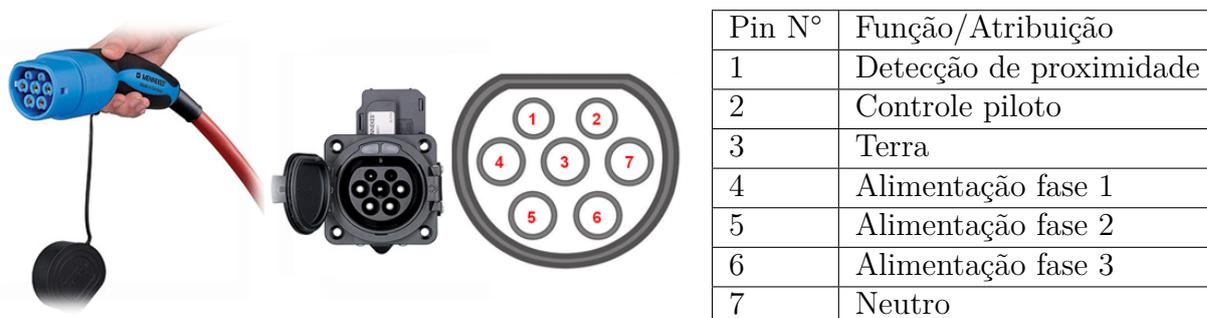


Fonte: (CPFL, c2021)

- **Conector Tipo 2:**

Também conhecido como plug Mennekes, empresa alemã responsável pelo desenvolvimento, pode operar em três diferentes níveis, que variam de 3,7 kW até 44 kW. Possui pinos de comunicação com funcionamento similar ao plugue tipo 1.

Figura 11 – Conector tipo 2

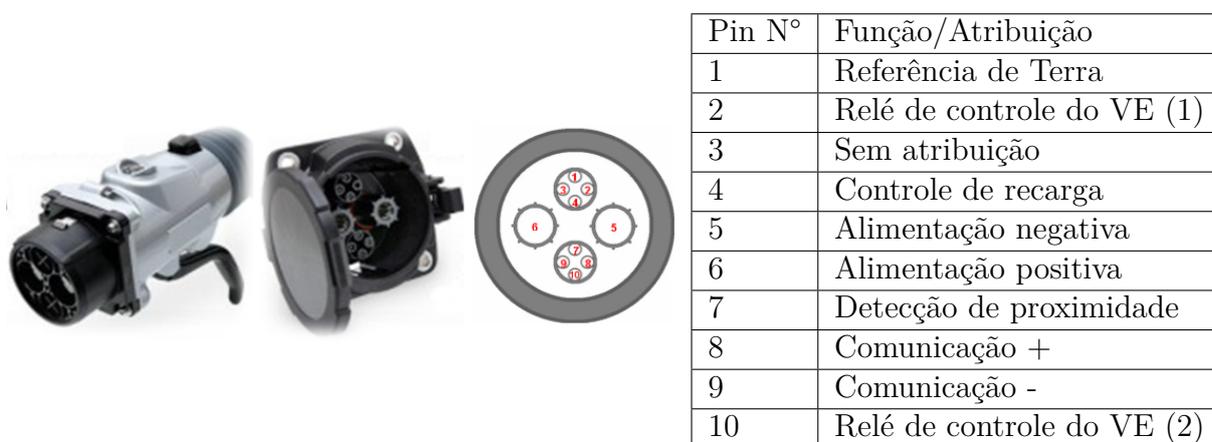


Fonte: (CPFL, c2021)

- **Conector CHADeMO:**

O padrão "*Charge de Move*" foi desenvolvido em parceria pelas principais montadoras japonesas para atender a crescente demanda por um carregamento rápido. Este conector utiliza rede CAN (modelo de comunicação veicular amplamente utilizado no mercado que visa reduzir a quantidade de cabos e aumentar a velocidade de comunicação dos módulos do veículo) para imobilizar o veículo e solicitar as informações necessárias para o seu carregamento. Pode operar com potências elevadas de até 62,5 kW, sempre em corrente contínua.

Figura 12 – Conector CHADeMO



Fonte: (CPFL, c2021)

- **Conectores Combo:**

Os conectores combo tipo 1 e combo tipo 2 podem recarregar tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada monofásica ou trifásica.

Este padrão foi desenvolvido com o intuito de unificar o padrão e facilitar o carregamento para o usuário final.

Figura 13 – Conector combo tipo 1 a esquerda e conector combo tipo 2 a direita



Fonte: (CPFL, c2021)

2.5 Extensores de autonomia

De modo geral, pode-se denominar como um extensor de autonomia qualquer módulo que estenda a capacidade das baterias do veículo, seja por meio de frenagem regenerativa, painéis fotovoltaicos ou geradores propriamente ditos (PINHEIRO, 2013).

Inicialmente os extensores de autonomia utilizavam MCIs comuns, o que resultava em motores que não dispunham de toda sua eficiência, visto que não eram otimizados a trabalhar em regimes constantes. Atualmente com o crescimento da demanda deste tipo de tecnologia desenvolveu-se motores mais otimizados, capazes de atender os requisitos necessários com um menor consumo de combustível e menor deslocamento. Vale ressaltar que não existem somente modelos com o tradicional MCI a pistão, existem versões com motor Wankel e até mesmo com micro-turbinas. Os motores a pistão normalmente empregados operam em ciclo Otto ou em ciclo diesel (PINHEIRO, 2013).

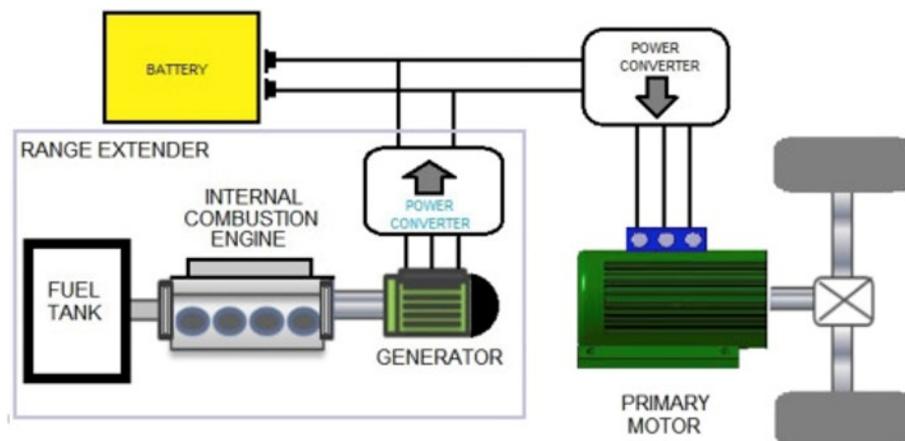
Para a escolha da melhor tecnologia a esta aplicação comercial deve-se considerar parâmetros como emissões, preço, eficiência, custos de manutenção, disponibilidade no mercado e níveis de ruído e vibração.

O motor de ciclo Otto apresenta algumas vantagens, como um custo de aquisição menor, menor dimensão, são menos ruidosos e emitem menos vibração durante o uso, embora possuam uma menor eficiência, precisando de mais combustível para gerar a mesma quantidade de energia. Devido ao ciclo Otto utilizar ignição por centelha, este tipo de motor exige mais manutenções, como a troca de velas de ignição e bobinas (NUNES, 2018). Estes motores podem ser adequados a rodar no etanol, combustível não derivado do petróleo e menos poluente.

O motor de ciclo diesel embora apresente um melhor rendimento e menor custo de

manutenção, graças a sua ignição ser por compressão e dispensar todo sistema de ignição do motor ciclo Otto, tem a desvantagem de ser mais ruidoso, poluente e caro, pontos muito importantes para a aplicação em um VE (NUNES, 2018).

Figura 14 – Diagrama do extensor de autonomia



Fonte: (SHAHZAD; AMJAD, 2018)

Na figura 14 é possível observar como funciona este sistema. O extensor é um módulo a parte do veículo, desta maneira o veículo não precisa dele para operar normalmente, utiliza-se somente para estender a autonomia. Este sistema inclui um tanque de combustível, um MCI e um gerador elétrico. Dependendo do projeto o acionamento pode ser mecânico ou automático. Esta arquitetura pode ser vista em alguns veículos como BMW i3, Chevrolet Volt e até mesmo no projeto GamaGolfe da UnB.

Os utilizados no Stark serão o freio regenerativo, que é um sistema em que o motor elétrico gera uma resistência ao movimento e passa reduzir a velocidade do veículo e operar como um gerador, convertendo a energia cinética dos eixos em energia elétrica, e o gerador acoplado a um MCI, foco principal deste trabalho (ROCHA; ALBERTON; OLIVEIRA, 2014).

2.6 Dimensionamento de um moto gerador

A seguir serão abordadas duas metodologias que se complementam. A primeira foi descrita pela fabricante do moto-gerador e têm-se os seguintes passos a serem seguidos (BRANCO, 2021):

- 1º Calcular o consumo em watts de cada componente, considerando fator de potência e potência de partida, se existir;
- 2º Calcular o consumo total somado e aplicar um fator de segurança de 20%;
- 3º Definir a quantidades de fases, monofásica ou trifásica;

4º A partir destes dados é possível selecionar o gerador do catálogo que melhor se adéque a demanda. Se atentando as diferenças existentes, como partida elétrica ou manual.

A fabricante disponibiliza até mesmo uma calculadora online, que auxilia nos cálculos de dimensionamento (BRANCO, c2021).

Zorzetto (2015) se estende e cita algumas outras características importantes que devem ser verificadas para o dimensionamento:

1. Grau de proteção para suportar as intempéries como poeira, água e solavancos;
2. Queda de tensão admissível (%);
3. Queda de frequência admitida (%);
4. Pico de tensão admitido (%);
5. Tensão de operação;
6. Frequência de operação;
7. Regime de operação.

Os regimes de operação podem ser subdivididos em:

- **Emergencial (*StandBy*)**

Estes geradores são feitos para operar somente em casos emergenciais, não sendo recomendada a utilização contínua.

- **Prime**

Estes modelos possuem a capacidade de serem utilizados esporadicamente, de forma mais planejada.

- **Principal (*Base Load*)**

Estes modelos são projetados para uso contínuo, desde que respeitadas as devidas manutenções, podem ser utilizados ininterruptamente.

Após uma análise feita pelo setor de engenharia da empresa, selecionou-se o modelo B4T-3500E, capaz de entregar 3400 W em uso contínuo.

2.7 Vantagens da arquitetura híbrida

Segundo Pinheiro (2013) esta arquitetura possui diversas vantagens sobre os veículos somente a combustão, como uma menor demanda do MCI, o que resulta em um menor consumo de combustível, logo uma menor emissão de poluentes. Outra grande vantagem é a variedade de matrizes energéticas que podem alimentar o veículo. Devido ao uso do motor elétrico, tem-se a possibilidade de usar frenagem regenerativa, aproveitando uma energia antes desperdiçada. Um dos pontos mais cômodos ao usuário é a baixa demanda de manutenção do conjunto, dado que o motor elétrico não demanda trocas de óleos e filtros e ainda gera menos ruídos e vibrações.

Este sistema híbrido ainda permite diferentes estratégias de gestão da energia, por exemplo, dependendo da rota diária do condutor, caso não exceda o limite da autonomia do veículo, pode-se utilizá-lo majoritariamente como um VPE. Esta estratégia é conhecida como esgotamento de carga, onde apenas se consome a energia elétrica. Enquanto que o modo onde o extensor de autonomia está operando é conhecido como sustentação de carga.

3 Metodologia

O projeto passou por algumas análises de cenários e demandas, que direcionaram a seleção dos componentes.

3.1 Eletrificação do Jipe CAB Stark

Como já citado, alguns dos grandes empecilhos para a eletrificação são a autonomia reduzida e o alto custo e peso das baterias. Por isso, a estratégia de utilizar um extensor de autonomia consequentemente ameniza as desvantagens dos VEs.

Para a versão eletrificada do veículo, foi selecionado o motor de ímãs permanentes MAGELEC M24P4-S de 75 kW de potência, e sete módulos de bateria que juntos entregam 32,26 kWh, operando a 360V. O extensor de autonomia selecionado foi o B4T3500-E da fabricante Branco, que é capaz de entregar 3,4 kW de potência contínua e cerca de 26,86 kWh ao final dos 15 litros de combustível que cabem em seu reservatório.

Figura 15 – Moto-gerador Branco B4T3500-E.



Fonte: Fabricante

A título de comparação, fez-se a tabela 2 com uma breve comparação do peso de alguns componentes de ambas versões. Onde está sendo considerado o peso seco de todos os itens. Outros itens também sofreram modificação, como a troca da direção hidráulica por uma coluna elétrica, troca do compressor de ar condicionado mecânico por um elétrico dentre outras pequenas alterações que não terão grande influência no peso final dadas as proporções do peso do veículo.

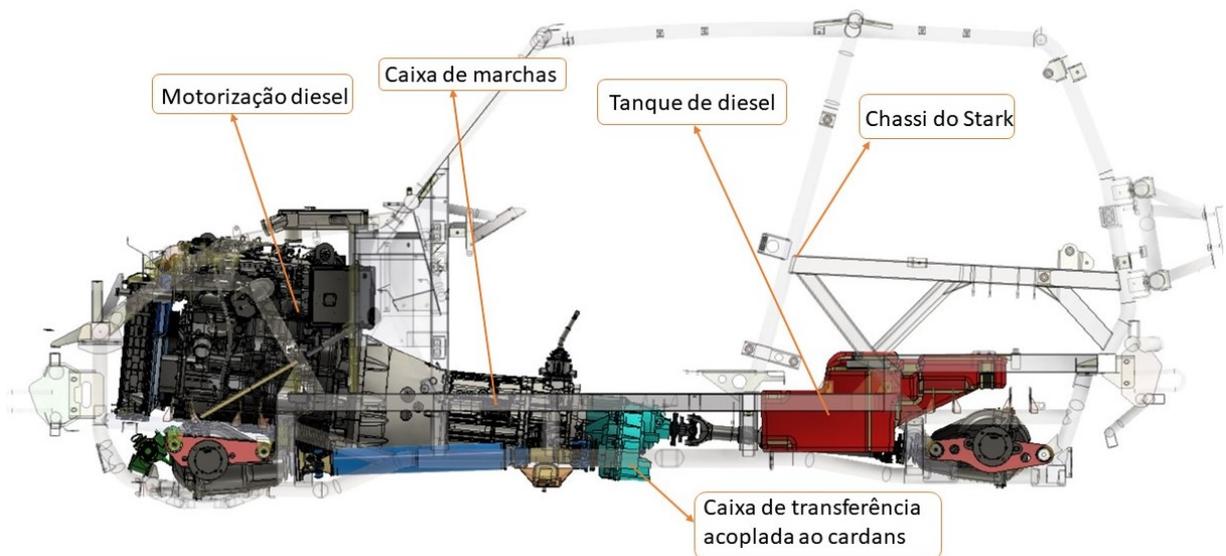
Tabela 2 – Comparativo de peso:

Stark elétrico		Stark Diesel	
Item	Peso [kg]	Item	Peso [kg]
Motor	31,5	Motor	222
Baterias	259	Cambio	57,5
Inversor	13	Tanque de combustível	70
CC CC	8,7		
Carregador	5		
Extensor de autonomia	46		
TOTAL	363,2	TOTAL	349,5

Fonte: Dados dos fabricantes.

Devido às diferenças de peso e dimensão entre os componentes do veículo nas versões elétrica e diesel, algumas peças foram alocadas de maneira diferente, como mostram as figuras 16 e 17.

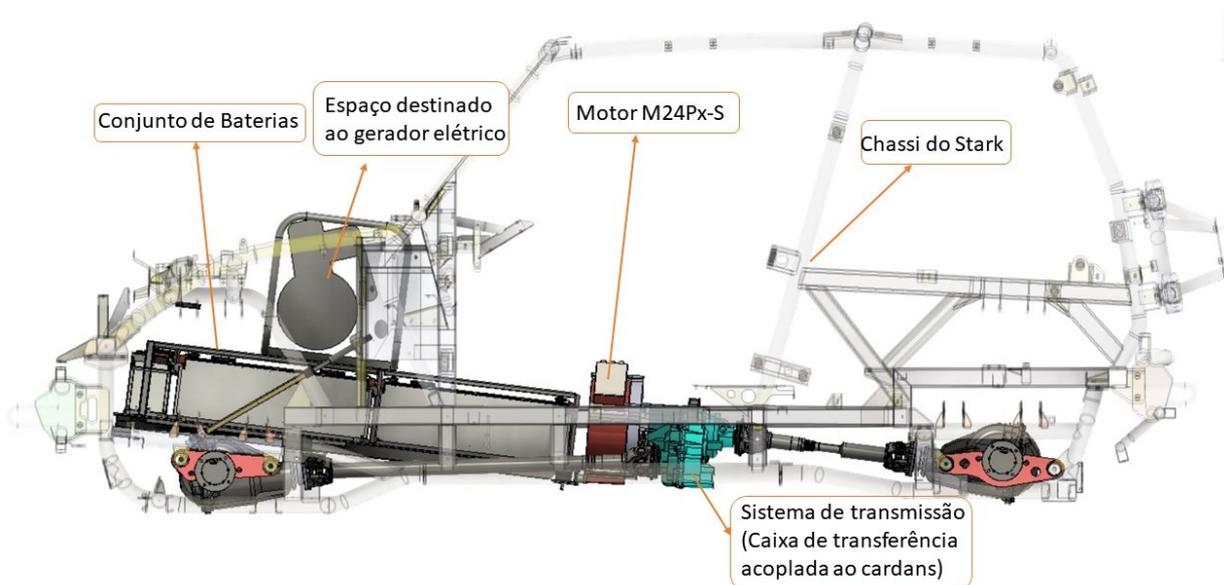
Figura 16 – Modelo simplificado em CAD do veículo diesel.



Fonte: Próprio autor

Na figura 16 é possível analisar a disposição dos componentes do modelo diesel, onde tem-se uma grande parte da massa concentrada na região frontal do veículo. Já na versão elétrica, imagem 17, o motor está posicionado no centro, e as baterias na parte inferior da dianteira do veículo.

Figura 17 – Modelo simplificado em CAD do veículo híbrido.



Fonte: Próprio autor

Nas imagens 16 e 17 nota-se que a massa no veículo elétrico fica concentrada mais abaixo e para trás se comparado ao modelo diesel, o que tende melhorar a distribuição de peso e reduzir a altura do centro de gravidade, pontos importantes para dinâmica do automóvel. Pode-se observar também a diferença de dimensão e peso entre os trens de força, e também a diferença entre a dimensão do tanque de diesel e das baterias, o que se explica pela densidade de energia, onde o diesel possui 12.700 Wh/kg, contra aproximadamente 125 Wh/kg das baterias de Íon de Lítio aplicadas no veículo (BECK, 2016; SCRAGG, 2009).

O desenvolvimento está sendo feito com auxílio do Software Fusion 360, da Autodesk. A utilização de modelos computacionais permite uma fácil análise de diversos cenários possíveis, o que facilita a prever possíveis problemas e otimizar o projeto com um menor custo.

3.2 Subsistemas

O sistema de baixa tensão (12 V) manterá a tradicional bateria chumbo ácido, que será responsável por alimentar todos os componentes de baixa tensão do veículo e iniciar o sistema de alta tensão. Outros carros híbridos do mercado como o Ford Fusion *Hybrid* e o Toyota Corolla *Hybrid* mantêm este mesmo padrão. A bateria 12 V será recarregada através de um transformador CC CC, responsável por converter a tensão de 360 V disponível no pacote de baterias.

Tabela 3 – Subsistemas alterados no projeto Stark

Componentes removidos	Componentes adicionados
Motor diesel	Motor elétrico
ECU	Inversor
Tanque de diesel	Baterias e tanque de gasolina
Alternador 12 V	Conversor CC CC
Compressor Ar condicionado mecânico	Compressor Ar condicionado elétrico
Sistema ATS (tratamento de gases)	
Câmbio	
	Gerador extensor de autonomia
Bomba de vácuo mecânica	Bomba de vácuo elétrica
Sistema de direção hidráulica	Sistema de direção elétrica
Bocal de abastecimento de diesel	Plugue de carregamento

Fonte: Próprio autor

Na tabela 3 é possível observar os principais itens a serem modificados no projeto. Alguns itens tiveram seu dimensionamento terceirizado, como o sistema de direção elétrica e o compressor de ar condicionado elétrico.

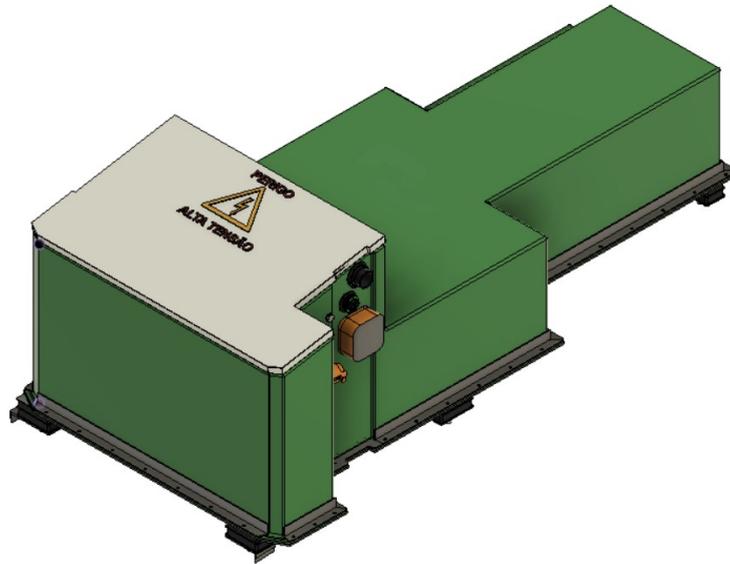
3.3 Grau de proteção

Um aspecto relevante que deve ser considerado é o grau de proteção de todos os componentes que serão implementados, uma vez que estes estarão expostos a água, poeira e intempéries.

O grau de proteção IP está definido pela ABNT, ele indica o quão protegido o componente está quanto ao ingresso de sólidos e de água com efeitos prejudiciais (ABNT, 1980).

Dado que veículos de uso fora de estrada podem ficar parcialmente submersos em água e também podem ficar em constante contato com poeira e outras partículas sólidas, o grau de proteção deve ser rigorosamente analisado. Tendo isto em mente, as baterias e os componentes eletrônicos ficarão armazenados em um invólucro, apresentado na figura 18, constituído de fibra de vidro e alumínio, com intuito de protegê-los.

Figura 18 – CAD do invólucro do conjunto de baterias e dos componentes eletrônicos



Fonte: Próprio autor

O motor elétrico selecionado conta com grau de proteção IP67/IP6K9K, ou seja, proteção para imersão temporária, para jatos em alta pressão de água, para vapor de água em alta temperatura e contra penetração de poeira.

Para o sistema de geração de energia, além do grau de proteção também deve-se ter cautela com a admissão de ar do MCI, visto que caso ocorra a admissão de água o motor pode sofrer uma falha catastrófica por calço hidráulico.

3.4 Arrefecimento

Os componentes do veículo necessitam de um controle de temperatura, tanto para evitar danos quanto para permitir o funcionamento ideal. Na aplicação estudada neste trabalho, o motor elétrico, as baterias, o inversor e o conversor CC CC terão arrefecimento líquido. A refrigeração do líquido será feita em um chiller que fará a troca térmica entre o líquido e o gás do ar condicionado, este sistema permite um controle mais preciso da temperatura e uma maior redução da temperatura.

Este sistema costuma ser composto por um trocador de calor, um reservatório, válvulas, bomba d'água, sensores de temperatura e dutos (CAPELLI, 2010).

- **Trocador de calor:**

Nesta aplicação o trocador de calor será o chiller que tem a função de refrigerar o líquido de arrefecimento, que por sua vez refrigera os componentes.

- **Reservatório:**

O reservatório armazena parte do líquido com intuito de manter o nível do sistema, principalmente devido a expansão que ocorre após o aquecimento.

- **Válvulas:**

As válvulas são utilizadas para liberar a circulação do líquido no sistema, quando o sistema está abaixo da temperatura ideal a válvula se fecha para aquecer mais rapidamente, após o aumento da temperatura a válvula se abre e permite a circulação por todo sistema, refrigerando os componentes. Além de permitir recirculações da água quente para um rápido aquecimento das baterias em dias frios.

- **Bomba d'água:**

A bomba d'água é responsável por circular a água pelo sistema de maneira forçada.

- **Sensores:**

Os sensores de temperatura aferem a temperatura do líquido e informam à central eletrônica e painel, para o correto controle. Esta informação permite estratégias de proteção contra superaquecimento, por exemplo.

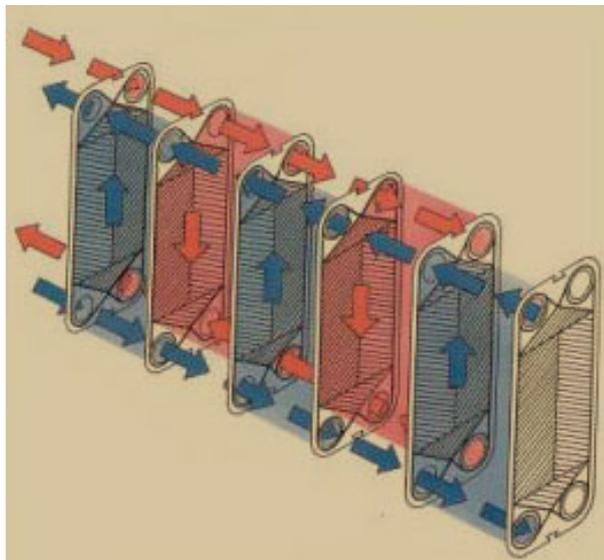
- **Dutos:**

As mangueiras e dutos são responsáveis por levar o líquido pelo sistema entre um componente e outro.

- **Fluído de arrefecimento:**

Deve-se ter uma atenção também ao líquido de arrefecimento, o qual deve ter um alto ponto de ebulição, boa troca térmica e ainda evitar o congelamento, dado que o veículo pode ser usado em diversas regiões com os mais variados climas.

Figura 19 – Modelo de funcionamento de um trocador do tipo chiller.



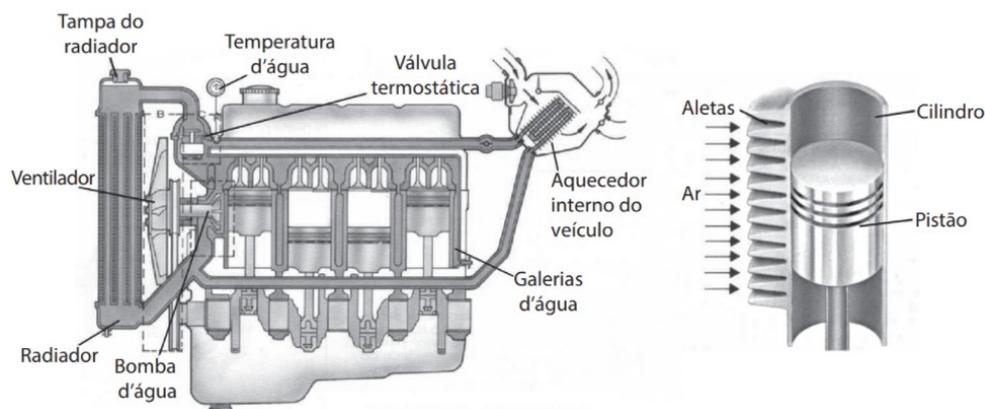
Fonte: Fabricante Alpha Laval.

Ao contrário do radiador utilizado na ampla maioria dos veículos comercializados, o Stark utilizará um chiller. Este sistema permite um controle mais preciso e eficiente da temperatura. No sistema habitual o líquido é arrefecido através do ar externo ao sistema, ou seja, dependendo muito da temperatura e velocidade do vento externa. A utilização do chiller permite que o líquido seja arrefecido pelo ar condicionado, ou seja, tem-se um maior controle sobre todo o sistema e uma menor influência de meios externos.

As baterias também contam com pequenos ventiladores dentro do invólucro, que promovem a circulação do ar, com intuito de promover uma maior troca com a base do trocador de calor.

Demais componentes como o MCI do extensor de autonomia e o carregador interno do veículo tem um sistema refrigerado a ar. O sistema refrigerado a ar possui um funcionamento mais simples, conforme visto na imagem 20, o componente necessita de aletas que trocam calor através do ar que circula ao redor. Embora este sistema não seja tão eficiente, conta com a vantagem de ser altamente simples e dispensar outros componentes como a bomba d'água e radiadores, necessitando apenas de fluxo de ar (BRUNETTI, 2018).

Figura 20 – Sistema de arrefecimento a água e a ar.

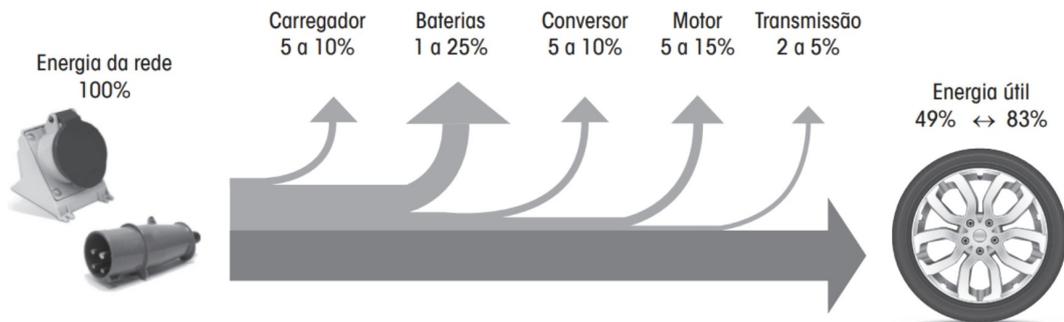


Fonte: Brunetti (2018)

3.5 Eficiência

Os VEs conseguem entregar de 49% a 83% de eficiência da energia que consomem. Este rendimento pode ser visto na imagem 21, com demonstração das perdas e da energia entregue. A partir da imagem é possível observar a importância da correta seleção dos componentes, a utilização de componentes de menor eficiência pode resultar em um veículo cerca de 40% menos eficiente.

Figura 21 – Diagrama de Sankey do fluxo de energia de um veículo elétrico



Fonte: (SANTOS, 2020)

A eficiência influencia em diversos componentes de um veículo e para entender com clareza sua importância foi calculado o consumo do carregador considerando-a.

Para estimar o quanto de energia será consumida durante o carregamento do Stark, é necessário calcular o tempo necessário para isto e a potência de entrada.

Considerando uma bateria de 32,26 kWh, um carregador externo capaz de entregar 3,3 kW e aplicando a equação 3.1 é possível obter o tempo de recarga do veículo (MONTECELOS, 2019).

$$\text{Tempo de recarga} = \frac{32,26 \text{ [kWh]}}{3,3 \text{ [kW]}} \quad (3.1)$$

$$\text{Tempo de recarga} = 9,77 \text{ h} = 9 \text{ h } 46 \text{ min}$$

É importante ressaltar que muitas vezes existem ciclos de carregamento que evitam o superaquecimento e a redução da vida útil das baterias. Além disso, existem controladores de carga que impossibilitam o descarregamento total da bateria, o que pode influenciar no tempo de recarga.

Considerando que o carregador possua uma perda de 5%, tem-se uma eficiência de 95%. A partir destes dados é possível estimar a potência consumida a partir da equação 3.2 (MOHAN, 2016).

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (3.2)$$

$$0,95 = \frac{3,3 \text{ kW}}{P_{entrada}}$$

$$P_{entrada} = 3,47 \text{ kW}$$

onde,

η - Eficiência,

$P_{saída}$ - Potência fornecida na saída do carregador,

$P_{entrada}$ - Potência requerida na entrada do carregador.

Sabendo o quanto de potência o carregador demanda e quanto tempo é necessário para o carregamento do veículo, finalmente pode-se estimar o quanto de energia é consumida no abastecimento.

$$Energia\ consumida = 3,47\ kW \cdot 9,77\ h \quad (3.3)$$

$$Energia\ consumida = 33,95\ kWh$$

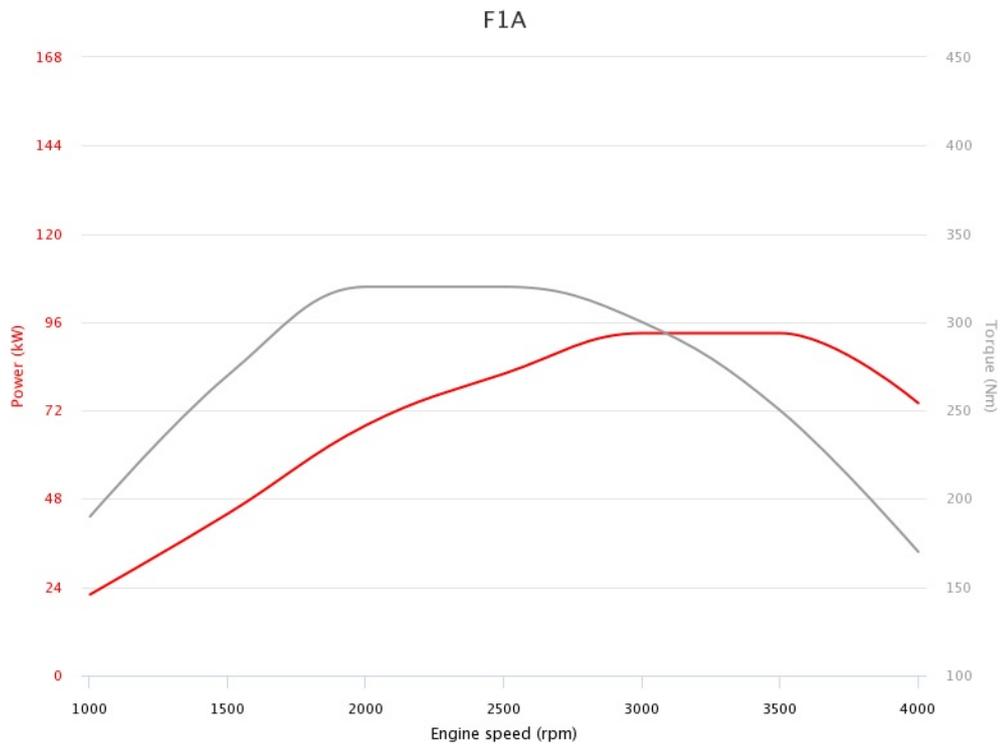
$$Energia\ entregue = 32,26\ kWh$$

Ou seja, 1,70 kWh foram perdidos devido a eficiência do carregador, que é de 95%.

3.6 Breve comparação das curvas dos motores

É relevante abordar também uma breve análise dos trens de força. As figuras 22 e 23 mostram os gráficos dos motores do Stark, o primeiro apresenta as curvas de desempenho do motor F1A da FTP Industrial fora do veículo. Este motor de ciclo diesel, opera com sistema de injeção *common-rail* e entrega um pico de 93,5 kW em 3600 rpm e 320 Nm em 1800 rpm, demonstrando boa elasticidade com uma grande faixa útil, o mesmo pode atingir até 4000 rpm. Este é um motor sobrealimentado de quatro cilindros em linha, com 2287 cm³, 88 mm de diâmetro e 94 mm de curso, razão de compressão estática de 19:1.

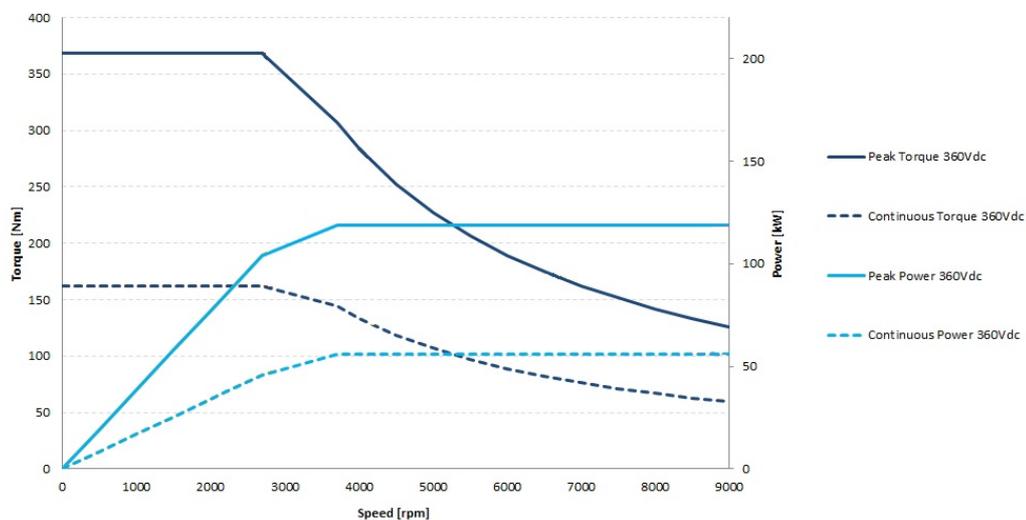
Figura 22 – Curva de desempenho do motor F1A



Fonte: (INDUSTRIAL, c2021)

O motor elétrico, por sua vez, possui a característica da entrega de torque instantânea, desde a partida. Este motor possui um diferente aspecto, se comparado ao motor diesel, onde pode oferecer grandes picos de potência e torque por cerca de 20 segundos, durante este curto espaço de tempo o motor oferece 161 kW e 368 Nm, enquanto a entrega contínua é de 75 kW e 162 Nm.

Figura 23 – Curva de desempenho do motor M24Px-S



Fonte: (MAGELEC, c2021)

Uma das maiores diferenças está na mesa de potência e torque, que como pode-se ver no gráfico da figura 23 fornecido pelo fabricante, este motor é capaz de manter o torque máximo constante de 0 a 3000 rpm e a potência constante de cerca de 3500 a 9000 rpm. Este motor utiliza a tecnologia de ímãs permanentes de fluxo axial e pode operar com eficiência superior a 95%.

Vale ressaltar que ambas as curvas foram fornecidas pelos fabricantes dos motores e representam somente o desempenho do motor fora do veículo.

3.7 Estimativa da Autonomia

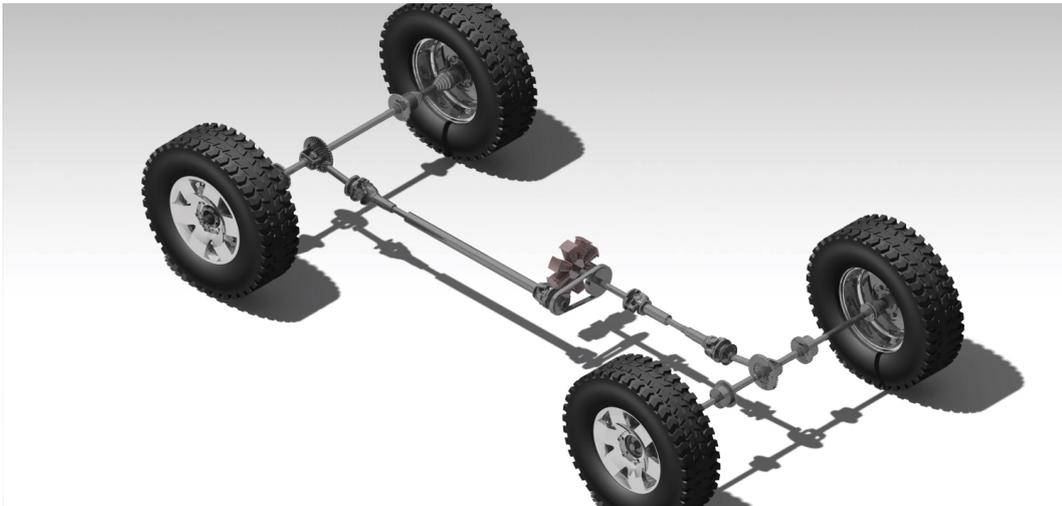
3.7.1 Obtenção dos dados

Para os cálculos foram utilizadas as seguintes informações do veículo: massa, coeficiente aerodinâmico C_x , área frontal, potência do motor, diâmetro do conjunto roda e pneu, capacidade da bateria, eficiência do motor elétrico, inércia rotativa, relação de transmissão da caixa de transferência e dos diferenciais.

A maior parte dos dados foram obtidos através dos fabricantes, somente a inércia do conjunto rotativo foi estimada com auxílio do software CATIA, da *Dassault Systèmes*. Usando a ferramenta *measure* é possível obter uma aproximação de diversos dados, como a massa, área, centro de massa e valores de inércia de cada componente ou de um conjunto de componentes. Para o trabalho em questão considerou-se a inercia do conjunto longitudinal dianteiro (pinhão, terminal do diferencial, cardã dianteiro, engrenagem de saída da caixa de redução), longitudinal traseiro (engrenagem de saída da caixa de redução, cardã traseiro, terminal do diferencial, pinhão), transversal dianteiro (pneus, rodas, discos de freio, cubos de roda, semi-eixos, caixa e coroa do diferencial) e transversal traseiro (pneus, rodas, discos de freio, cubos de roda, semi-eixos, caixa e coroa do diferencial).

Abaixo tem-se a imagem 24 gerada no software CATIA, com todos os componentes com massas rotativas do sistema de tração e a tabela 4 com todos os dados inseridos no programa.

Figura 24 – Sistema de transmissão



Fonte: Próprio autor

Tabela 4 – Dados de entrada do algoritmo.

Dado	Valor
Peso	1824 kg
Aceleração da gravidade	9,81 m/s
Massa específica do ar (ρ)	1,22 km/m ³
Coefficiente aerodinâmico (Cx)	0,56
Área da seção transversal	2,85 m ²
Potência do motor	75 kW
Raio dinâmico do pneu	0,33 m
Capacidade das baterias	32,26 kWh
Eficiência do motor	95%
Inercia transversal dianteira	4,15 kg . m ²
Inercia longitudinal dianteira	0,02 km . m ²
Inercia longitudinal traseira	0,01 km . m ²
Inercia transversal traseira	4,15 kg . m ²
Inercia do motor	0,04 kg . m ²
Relação da caixa de redução	1:2,48
Relação dos diferenciais	1:4,09
Potência do extensor	3,4 kW
Potência do carregador interno	3,3 kW
Eficiência do carregador interno	95%
Velocidade relativa do vento	Velocidade do veículo*

* Considerou-se a velocidade do veículo devido a falta de dados.

Fonte: Fabricantes e CATIA

3.7.2 Desenvolvimento do algoritmo

Tendo em mãos todos os dados necessários do veículo, partiu-se para a busca dos perfis de velocidade a serem testados. Optou-se por testar em três diferentes perfis, o

Ciclo de Condução Europeia (NEDC), o Procedimento Mundial Harmonizado de Teste de Veículos (WLTP) e de uma rota real obtida através de um GPS.

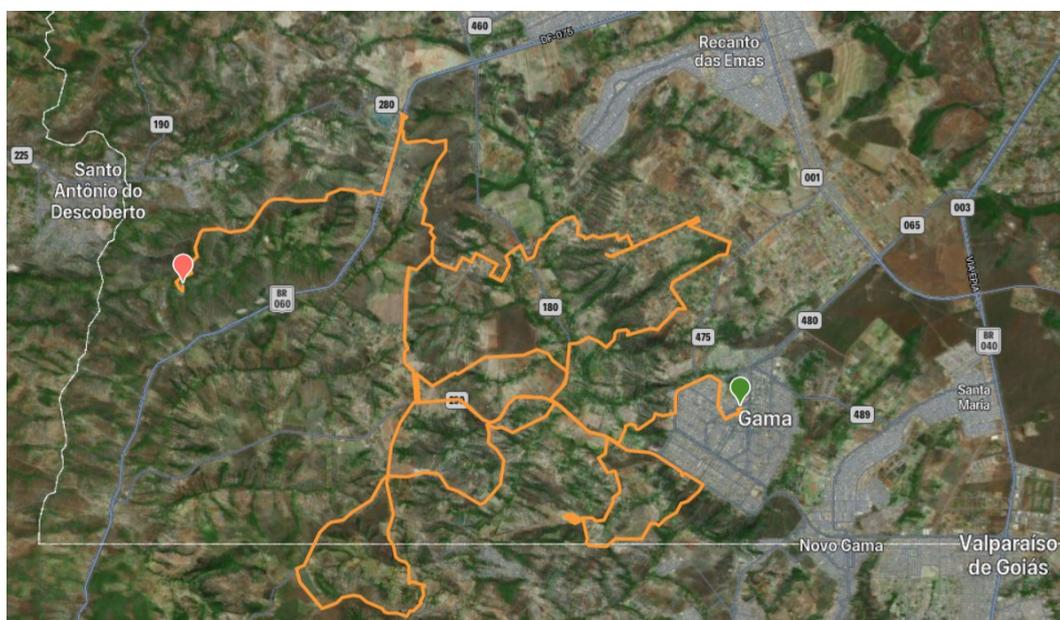
Para extrair os dados da rota real de GPS, velocidade, tempo e altitude, utilizou-se de um código em Python preexistente, somente com pequenas alterações. Os dados foram exportados para uma planilha de Excel para serem utilizados no Octave posteriormente.

O ciclo NEDC é utilizado desde 1992 na União Europeia para aferir consumo de combustível e emissões de poluentes, além de ser uma padronização que permite uma comparação entre veículos distintos. Na tabela 5 tem-se uma comparação entre o tamanho, a duração e as velocidades médias e máximas desenvolvidas durante o trajeto. Mais informações sobre o ciclo podem ser obtidas em UNECE (2012).

O ciclo WLTP foi implementado em setembro de 2017 com intuito de fornecer valores mais realistas com o uso atual dos veículos. Tendo diferentes ciclos urbanos, com duração e velocidade maior que o antigo NEDC. Mais informações sobre o ciclo podem ser obtidas em ACEA (2022).

Por fim fez-se também uma rota obtida através de um GPS, a rota em questão foi no *rally* de irregularidades do Gama *light*. A rota foi escolhida para simular um cenário de uso fora de estada e pode ser vista na imagem 25.

Figura 25 – Rota do *rally* do gama.



Fonte: (WIKILOC, 2021)

Tabela 5 – Ciclos de condução utilizados para estimar autonomia.

	Duração	Distância	Velocidade média	Velocidade Máxima
NEDC	20 minutos	11 km	34 km/h	120 km/h
WLTP	30 minutos	23 km	46 km/h	131 km/h
GPS	6 horas e 27 minutos	136 km	35 km/h	111 km/h

Fonte: Próprio autor

Com base nisso partiu-se para o desenvolvimento em Octave. Utilizando as fórmulas citadas no capítulo anterior, também disponíveis na apostila de dinâmica veicular Leal, Rosa e Nicolazzi (2012), fez-se um algoritmo considerando as forças de resistência ao deslocamento e a eficiência de alguns componentes do veículo.

Vale ressaltar que esta estimativa não considera consumos secundários, como energia consumida pelo sistema de ar condicionado, pelo sistema de iluminação e outros sistemas de entretenimento, ou seja, os cálculos foram feitos considerando somente as resistências e eficiências atuantes sobre o sistema de propulsão e tração.

4 Resultados

4.1 Possibilidades de montagens

Durante o desenvolvimento do projeto alguns cenários foram discutidos dentro da empresa, os quais serão citados neste tópico.

4.1.1 Cenários para definição da motorização de tração

Para a seleção do trem de força elétrico, analisou-se dois cenários, o primeiro seria utilizar dois motores menores, com 44 kW e 46 Nm, acoplados diretamente aos diferenciais do veículo. Esta arquitetura permitiria um melhor controle eletrônico do sistema de tração e eliminaria parte do sistema de transmissão (cardans e caixa de transferência), facilitando o empacotamento das baterias e reduzindo as perdas geradas pelas massas rotativas. Em contra partida, perderia a opção de marcha reduzida, ponto importante para o público alvo, o que impossibilitou este cenário.

Mesmo sendo descartado pela fabricante, este cenário foi testado no algoritmo que será apresentado a frente, e obteve uma autonomia quase 8% maior em todas as rotas testadas, isso se dá devido ao sistema de transmissão ser mais eficiente, com menos perdas após a remoção dos cardans e caixa de transferência.

O segundo cenário analisado foi o de manter os cardans e a caixa de transferência, utilizando somente um motor mais potente. Embora exista uma perda maior agregada ao sistema de transmissão empregado, este cenário possibilita mais facilidade de controlabilidade e ainda mantém a opção de relação reduzida, que no caso do Stark é de 1:2,48 associada ao diferencial com redução de 1:4,09.

A facilidade em controlar o sistema se dá principalmente devido ao fato de que com somente um motor a seleção da tração fica sob responsabilidade do condutor, podendo selecionar entre 4x2, 4x4 e 4x4 com reduzida.

4.1.2 Cenários para serviços secundários do veículo

Visando a facilidade de desenvolvimento e redução de custos, a empresa analisou dois cenários também para a montagem dos periféricos. O primeiro seria manter todos periféricos mecânicos atuais, o que facilitaria a prototipagem, por já ter parte dos componentes em mãos e os contatos com os fornecedores. Este cenário exigiria que o MCI ficasse ligado quase que continuamente, a fim de permitir o funcionamento de todos os periféricos.

Após a empresa fazer um levantamento preliminar da potência requerida pelos acessórios mecânicos já utilizados no Stark diesel, foram encontrados os seguintes valores descritos na tabela 6.

Tabela 6 – Potência requerida pelos componentes auxiliares do primeiro cenário

Componente	Potência requerida
Compressor do ar condicionado	5,5 hp (4,1 kW)
Bomba da direção hidráulica	4 hp (3 kW)
Alternador 12V	4,6 hp (3,4 kW)
Gerador alta tensão	14 hp (11,9 kW)
Total	28,1 hp (21 kW)

Fonte: CAB Motors

Os dados apresentados indicam que este cenário exige um motor de elevada potência. Além disto, este modelo restringiria significativamente o gerenciamento do veículo, dado que o MCI teria que estar constantemente ligado para garantir o funcionamento dos componentes auxiliares, como direção hidráulica e ar condicionado. O ininterrupto funcionamento do MCI acarretaria em um maior nível de emissões, consumo, desconforto aos usuários, devido a vibração e ruído, e impossibilitaria o uso em modo puramente elétrico, muito eficaz para curtas distâncias.

Seguiu-se então para o segundo cenário, com todos os periféricos elétricos. Com a implementação dos periféricos elétricos operando diretamente em 360 V ou 12 V, pode-se utilizar o motor exclusivamente para o gerador elétrico de alta tensão, esta montagem além de demandar um motor de menor cilindrada, ainda permitirá uma melhor exploração do seu funcionamento, ligando-o somente quando necessário.

4.2 Demais veículos elétricos do mercado

A partir de uma breve análise dos VEs comercializados no país, gerou-se uma tabela com a capacidade da bateria, autonomia e peso de alguns modelos. Pode-se observar que em geral os VEs possuem uma autonomia próxima a 300 km.

Tabela 7 – Comparativo de veículos elétricos

Veículo	Bateria	Autonomia NEDC	Autonomia WLTP	Peso
Renault Twizy	6,1 kWh	— km	100 km	473 kg
JAC Iev40	40 kWh	300 km*		1460 kg
Nissan Leaf	40 kWh	350 km	270 km	1580 kg
Renault Zoe	41 kWh	400 km	300 km	1502 kg
BMW i3	42 kWh	345 km	283 km	1440 kg
Cherry Arrizo 5e	53 kWh	410 km*		1520 kg
Chevrolet Bolt	55 kWh	565 km	459 km	1641 kg
JAC Iev60	63 kWh	420 km	300 km	1710 kg

* Fabricante não divulgou o ciclo utilizado para medição de autonomia.

Fonte: Fabricantes dos veículos

O Stark conta com 7 módulos de bateria, cada um com 16 células, totalizando cerca 32,26 kWh operando a 360 V, uma menor capacidade se comparado a parte dos veículos comercializados no Brasil que estão listados na tabela 7, o que demandou a aplicação de um extensor de autonomia para atender os requisitos de autonomia esperados.

A arquitetura utilizada no Stark pode ser vista também no Chevrolet Volt, que possui somente 16 kWh nas baterias e um extensor com motor de 1,4 l e 53 kW.

Embora tenha uma arquitetura diferente, o Jeep Wrangler 4xE é uma ótima referência para a balizar as expectativas de autonomia do Stark elétrico. Segundo a fabricante, quando operado de maneira puramente elétrica, ele é capaz de percorrer 53 km no ciclo WLTP com os 17,3 kWh de bateria. Este caso é uma ótima base por também se tratar de um utilitário esportivo com tração 4x4. O Wrangler possui cerca de 500 kg a mais que Stark diesel, e um motor elétrico de aproximadamente 107 kW (JEEP, 2022).

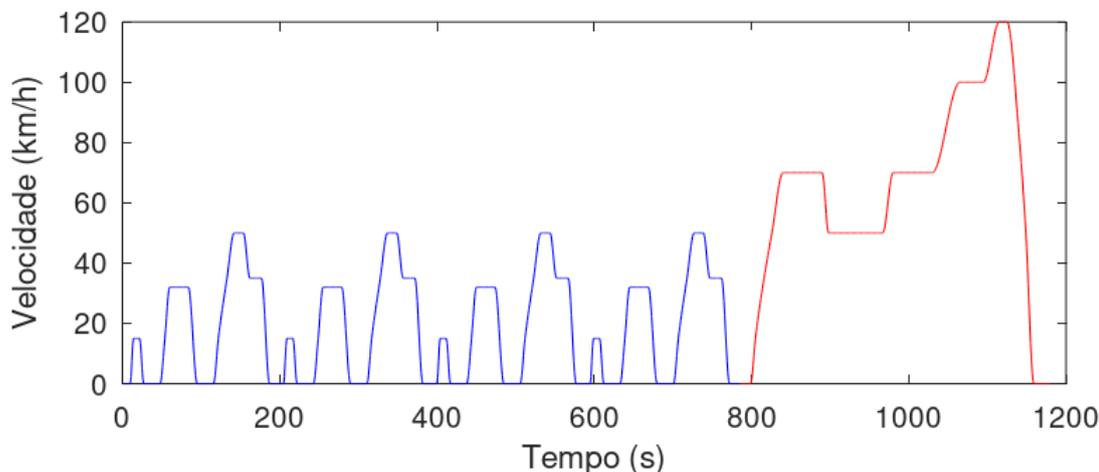
4.3 Algoritmo de autonomia

O algoritmo elaborado é usado para estimar a autonomia baseada nos cálculos apresentados anteriormente no tópico de dinâmica veicular. Lembrando que esta estimativa considera somente as resistências e eficiências atuantes sobre o sistema de propulsão e tração.

4.3.1 Algoritmo desenvolvido

Abaixo têm-se os perfis de velocidade de cada um dos ciclos utilizados nas simulações. No ciclo NEDC, apresentado na figura 26, é possível observar o perfil de velocidade onde é notória a diferenciação do perfil urbano, que se repete quatro vezes, representado em azul, e também o perfil extra-urbano, representado em vermelho. O ciclo urbano se caracteriza por ter uma menor velocidade e por ter mais reduções abruptas de velocidade, chegando a ficar parado repetidas vezes.

Figura 26 – Perfil de velocidade NEDC plotado via Octave

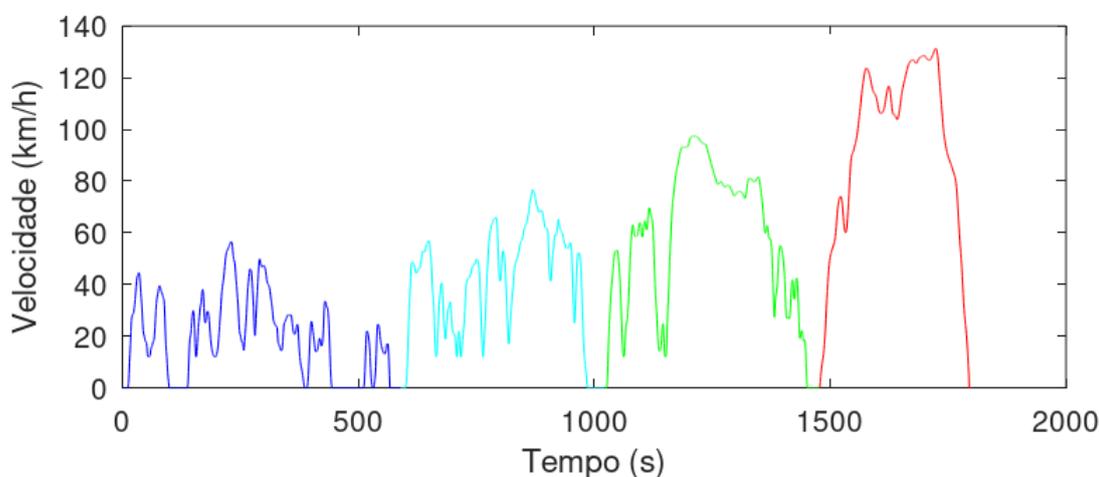


Fonte: Próprio autor

Na figura 27, é possível observar o perfil de velocidade do ciclo WLTP. Neste existem quatro diferentes perfis, que são definidos pela ACEA (2022) como ciclo baixo, ciclo médio, ciclo alto e ciclo extra alto. Os perfis apresentam diferentes velocidades e durações, visando representar os mais diversos usos, na tentativa de atingir um padrão próximo ao uso real.

O primeiro perfil, em azul, representa o ciclo baixo. O segundo perfil, em ciano, representa o ciclo médio. O terceiro perfil, em verde, representa o ciclo alto. Por fim tem-se o perfil em vermelho, que representa o ciclo extra alto.

Figura 27 – Perfil de velocidade WLTP plotado via Octave

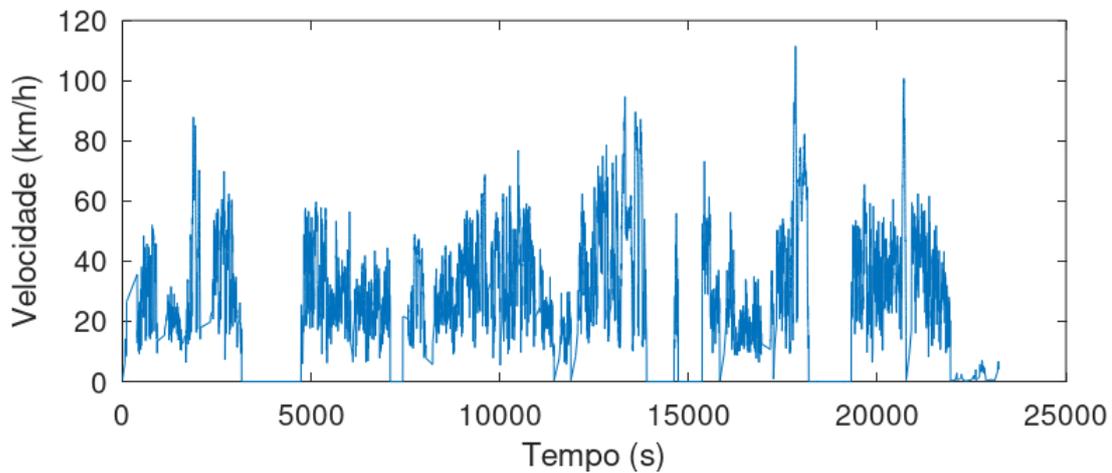


Fonte: Próprio autor

O perfil de velocidade capturado via GPS pode ser observado na figura 28. Este perfil foi gerado em um trajeto real durante uma competição realizada no Gama-DF. O

trajeto dura cerca de 6 horas e 27 minutos, mas houveram longos momentos parados, o período em movimento foi de cerca de 4 horas e 9 minutos.

Figura 28 – Perfil de velocidade GPS plotado via Octave



Fonte: Próprio autor

O código apresentado na figura 29 considerou:

- Resistência ao aclave, equação 2.2;
- Resistência inercial, equações 2.3 e 2.1.3;
- Resistência ao rolamento, equação 2.5;
- Resistência aerodinâmica, equação 2.7;
- Potência total, equação 2.8
- Eficiência do motor elétrico, equação 3.2.

Após a inserção de todos os dados da tabela 4 e das rotas, obteve-se um consumo de 5,13 kWh para percorrer os 23,26 km do ciclo WLTP. Sabendo que a descarga completa das baterias pode acarretar em problemas para recarrega-las, utilizou-se 80% de sua capacidade nos cálculos, e com isso tem-se:

$$\frac{32,26 \text{ kWh} \cdot 0,8}{5,13 \text{ kWh}} = 5,03 \quad (4.1)$$

Ou seja, o veículo será capaz de realizar o trajeto 5,03 vezes, e a autonomia esperada do Stark utilizando somente as baterias será de:

$$5,03 \cdot 23,26 \text{ km} = 117,07 \text{ km}$$

Abaixo é apresentada a tabela 8 com a autonomia e o consumo médio de cada umas das rotas testadas.

Tabela 8 – Resultados do Stark puramente elétrico

Ciclo	Autonomia	Consumo médio
WLTP	117 km	4,54 km/kWh
NEDC	158 km	6,13 km/kWh
Rally de irregularidades do gama	87 km	3,36 km/kWh

Fonte: (ACEA, 2022; UNECE, 2012; WIKILOC, 2021).

Figura 29 – Parte do algoritmo em Octave responsável por calcular as resistências.

```

83 ##### Vetor distância total, o ângulo de inclinação e aceleração #####
84 alpha(1) = 0;
85 sum_dist(1) = dist(1);
86 for t = 2 : tamanho
87     sum_dist(t) = dist(t) + sum_dist(t-1); %Vetor somatório da distância [m]
88     alpha(t) = atand((alt(t)-alt(t-1))/(sum_dist(t)-sum_dist(t-1))); %Vetor com o ângulo de inclinação [deg]
89 end
90
91 alpha(isnan(alpha)) = 0; %Remove possíveis erros NaN do vetor
92 a = diff(vt); %Vetor aceleração [m/s²]
93 #####
94
95 ##### Cálculo das resistências #####
96 J = Jr + idif^2*(Jt+(imar^2*Jm));
97 sigma = J/(m*rd*rd);
98 vv=vel; %Devido a falta de dados, considerar velocidade relativa do vento como a velocidade do veículo.
99
100 for t = 1 : tamanho
101     f(t) = 0.0258 + (0.052*((vt(t)/100)^2)); %Coef. em função do tipo de pneu e velocidade
102
103     Fs(t) = m * g * sin(max(alpha(t),0)); %Resistência ao aclave [N]
104     Fr(t) = f(t) * m * g * cos(max(alpha(t),0)); %Resistência ao rolamento [N]
105     Fa(t) = 0.5 * rho * (vv(t)^2) * cx * Af; %Resistência aerodinâmica [N]
106     Fi(t) = m * max(a(t),0) * (1 + sigma); %Resistência inercial [N]
107
108     sum_F(t) = Fs(t) + Fi(t) + Fr(t) + Fa(t); %Somatório das resistências [N]
109 end
110 #####
111
112 ##### Cálculo do trabalho necessário total #####
113 Trab = sum(sum_F.*vt);
114 E2 = (Trab/(3.6*(10^6))); %Conversão de J para kWh
115 E = E2/e m; %Aplicando a eficiência do motor [kwh]
116 #####

```

Fonte: Próprio autor

4.3.2 Comparação dos resultados obtidos com dados reais

Como forma de testar os resultados obtidos pelo algoritmo em Octave, utilizou-se dos dados disponibilizados pela fabricante do Wrangler 4xe. As informações não encontradas foram mantidas iguais às do Stark, dadas as similaridades dos veículos. Segundo a fabricante, o Wrangler 4xe é capaz de percorrer 53 km com os 17,3 kWh de bateria no ciclo WLTP. No algoritmo desenvolvido, o mesmo foi capaz de percorrer 58 km, uma diferença pequena dada a falta de todos os dados e a desconsideração de todos os consumidores secundários.

O Stark, que possui 32,26 kWh de bateria, teve uma autonomia de 117 km em condições similares.

4.3.3 Extensor de autonomia

Agora considerando o extensor de autonomia B4T-3500E, desenvolveu-se um complemento para o algoritmo no software Octave levando em conta os seguintes fatores:

- Autonomia e potência do Moto-gerador aplicado;
- Eficiência e capacidade do carregador interno do veículo.

O moto-gerador selecionado é capaz de gerar cerca de 26,86 kWh até o esgotamento do tanque de combustível e pode operar com uma potência contínua de até 3,4 kW.

O carregador interno selecionado tem 95% de eficiência e opera com até 3,3 kW. Devido a esta eficiência tem-se que a entrega máxima é de 25,52 kWh.

Com base nisto, têm-se os seguintes resultados:

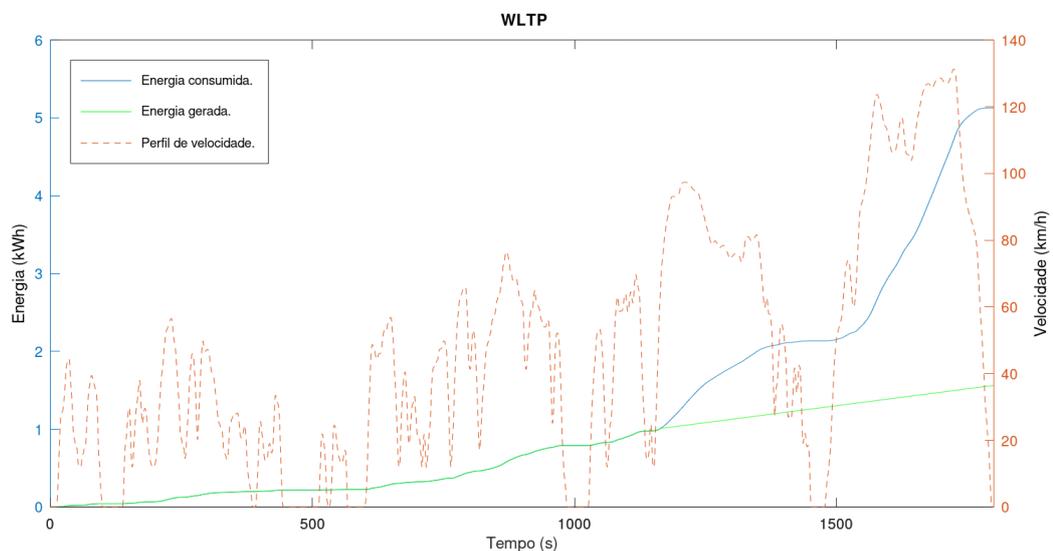
Tabela 9 – Autonomia total do Stark híbrido.

Ciclo	Autonomia	Consumo médio
WLTP	181 km	4,54 km/kWh
NEDC	275 km	6,13 km/kWh
Rally de irregularidades do gama	174 km	3,36 km/kWh

Fonte: Próprio autor

O gráfico da figura 30 apresenta o perfil de velocidade da rota WLTP tracejada ao fundo juntamente com a energia consumida e gerada durante a rota. O perfil de velocidade foi representado para que seja possível observar como o trecho com maior velocidade exige uma energia notoriamente superior. Nota-se também que no início do trajeto o extensor tem sua geração limitada pelo consumo de energia.

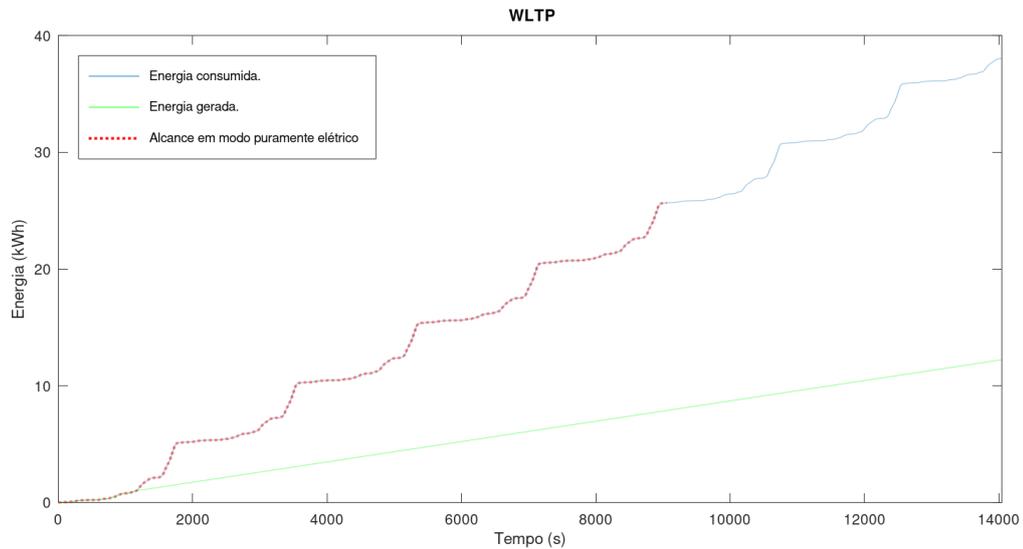
Figura 30 – Geração e consumo de energia em uma rota WLTP



Fonte: Próprio autor

Já no gráfico da figura 31 é possível notar a quantidade de vezes em que a rota pode ser realizada tanto em modo puramente elétrico, representado pela parte pontilhada em vermelho no início do percurso, quanto a quantidade de vezes total, até o esgotamento dos 80% de bateria. Lembrando que esta simulação considerou o extensor ligado continuamente desde o início da utilização do veículo.

Figura 31 – Geração e consumo de energia na rota WLTP

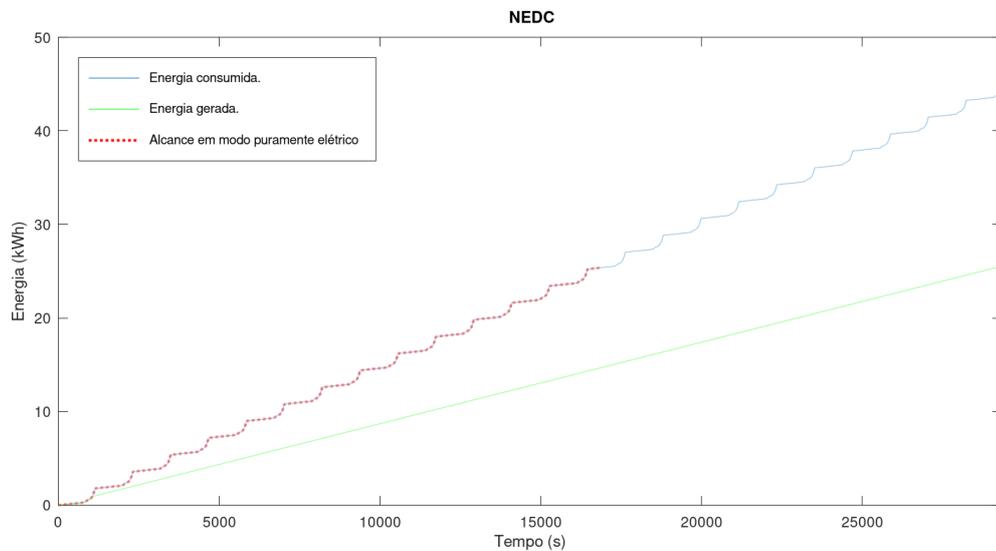


Fonte: Próprio autor

O extensor entregando 3,3 kWh não se demonstrou capaz de atender toda a demanda do ciclo WLTP, onde só foi entregue metade da capacidade de geração, cerca de 12 kWh, até o esgotamento dos 80% da bateria.

Nas demais rotas testadas este extensor se mostrou satisfatório, onde o mesmo conseguiu gerar até o fim de sua autonomia. No gráfico da figura 32 é possível observar como o ciclo NEDC exige um consumo inferior, sendo possível realizar a rota 14,31 vezes em modo puramente elétrico e 24,88 vezes ao todo.

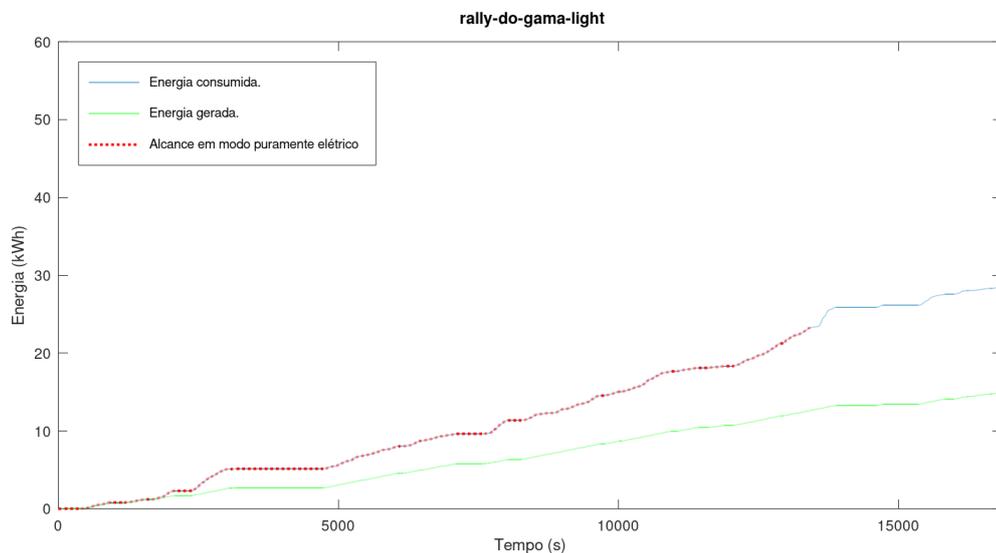
Figura 32 – Geração e consumo de energia na rota NEDC



Fonte: Próprio autor

Já durante a rota de GPS, a de maior consumo médio, não foi possível completá-la em modo puramente elétrico, mas devido a longa duração da mesma, a entrega do extensor se demonstrou satisfatória, permitindo aproximadamente o dobro de autonomia.

Figura 33 – Geração e consumo de energia na rota de GPS



Fonte: Próprio autor

Usando como exemplo o ciclo WLTP, caso fosse de interesse dobrar autonomia seria necessário um extensor e um carregador capazes de entregar 5,3 kWh de maneira contínua. Vale ressaltar que no projeto do Stark, o reservatório de combustível será modificado para facilitar o abastecimento e a acomodação do mesmo dentro do veículo, o que permitirá que

a capacidade do reservatório seja alterada de acordo com a necessidade, e que a autonomia seja aumentada em algumas rotas como a NEDC e a de GPS.

Para atingir uma autonomia similar aos demais VEs citados aqui, ou seja, cerca de 300 km no ciclo WLTP, seria necessário a utilização de um extensor e de um carregador de cerca de 6,6 kWh de forma contínua durante a realização das rotas WLTP.

4.4 Elétrico X Diesel

Para fazer uma análise comparativa do custo de utilização da versão elétrica e da versão diesel, foram analisados os seguintes dados:

- Segundo ANP (2022) o preço médio do diesel S10 no Distrito federal em março de 2022 é de R\$ 6,883 por litro;
- A troca de óleo e filtros do motor diesel a cada 15.000 km, custa R\$ 1192,00 em concessionária;
- Segundo ANP (2022) o preço médio da gasolina no Distrito federal em março de 2022 é de R\$ 7,229 por litro;
- Segundo (ENEL, 2021) o kWh está custando R\$0,6369.

A versão comercializada com motor turbo diesel é capaz de percorrer cerca de 600 km com um tanque de 70 litros de diesel, em perímetro urbano. Com isso tem-se um custo de R\$481,81 reais em diesel a cada 600 km, ou R\$0,80 de por quilômetro rodado. Se for adicionada a manutenção básica de troca de óleo e filtros, o custo total é de R\$0,88 por quilômetro rodado.

Para se calcular o custo por quilômetro rodado na versão híbrida é necessário analisar o custo para quando o veículo estiver rodando de maneira puramente elétrica e quanto estiver sendo alimentado pelo extensor de autonomia. Considerando o custo por kWh de R\$0,6369, para carregar 80% da bateria do Stark em um carregador com 95% de eficiência tem-se um custo de R\$17,30 por carga. No ciclo WLTP, tem-se um custo por quilômetro rodado de R\$0,15. Já para o extensor de autonomia, que possui um reservatório de 15 l de gasolina, o custo é de R\$0,60 por quilômetro rodado.

O custo final utilizando toda energia do extensor e da bateria é de R\$ 0,42 por quilômetro rodado. Vale ressaltar que no dia a dia, em rotas de curta distância, não será necessária a utilização do extensor, e portanto pode-se considerar somente o custo do puramente elétrico, que é cerca de 6 vezes menor que o custo da versão diesel. Mesmo em uma rota onde usa-se uma carga da bateria e um tanque do extensor, o custo da versão elétrica é duas vezes menor que a diesel.

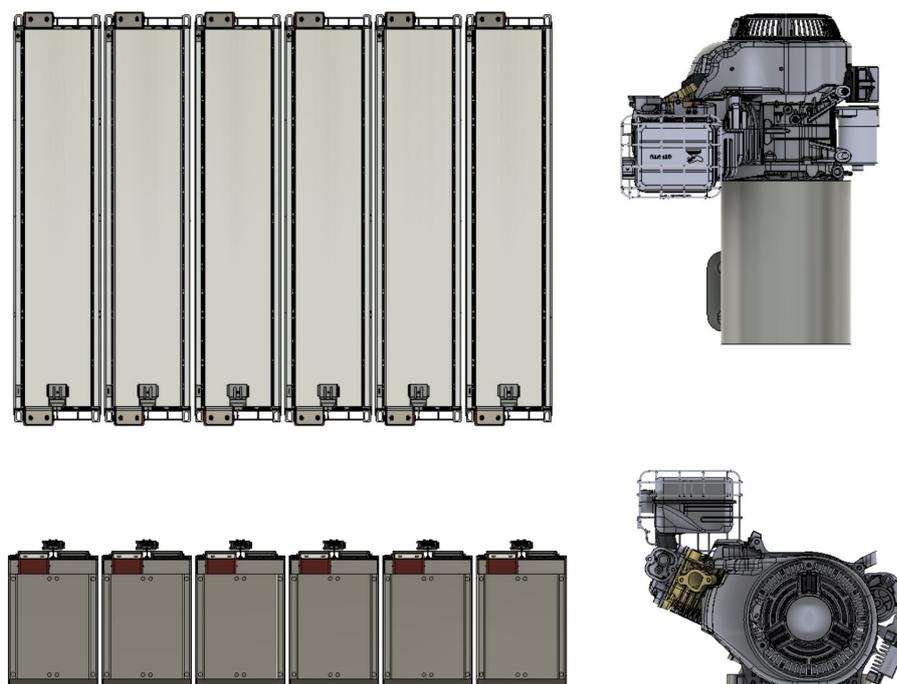
4.5 Comparativo entre uso de mais baterias ou de um extensor extensor de autonomia

Fazendo uma análise considerando o custo, o peso e as dimensões para se ter a mesma energia total deste extensor aplicado em baterias, têm-se:

- **Baterias:**
 - Custo desta bateria utilizada é de cerca de 1,2 mil dólares, cada módulo com 16 células de 3.2 v e 90 Ah. Como cada módulo entrega cerca de 4,6 kWh, seria necessário adicionar 6 módulos, que seriam capazes de entregar 27,65 kWh a um custo de pouco mais de 7,6 mil dólares. Desconsiderando frete e impostos tem-se pouco mais de 36 mil reais na cotação atual do dólar.
 - Cada módulo de bateria possui 37 kg, o que totalizaria 222 kg
- **Extensor de autonomia Branco B4T-500E:**
 - Custo de aquisição de 3,4 mil reais.
 - Peso 46 kg

O extensor com um peso de quase 5 vezes menor e um custo pelo menos 10 vezes menor, demonstrou-se ser uma alternativa mais viável e eficaz que aumentar a quantidade de baterias no veículo. Na figura 34 é possível observar a diferença de dimensão entre o moto gerador e o conjunto de 6 baterias.

Figura 34 – Vista superior e lateral de seis baterias e um extensor de autonomia



Fonte: Próprio autor

5 Conclusões

Atualmente os veículos elétricos ganham cada vez mais espaço no mercado graças a seu ótimo desempenho devido ao torque instantâneo fornecido pelo motor elétrico, a sua menor necessidade de manutenções periódicas e o seu custo de utilização inferior, dada a maior eficiência e menor custo da energia elétrica em comparação ao preço dos combustíveis fósseis. Além disso, são menos poluentes e ruidosos, pontos que impactam fortemente a qualidade de vida principalmente em grandes centros urbanos com a redução da poluição sonora, do material particulado, da fuligem, do CO₂ e, por consequência, das chuvas ácidas.

A proposta inicial do trabalho constituía de uma avaliação prática com testes dinamométricos do veículo já eletrificado, mas devido a atrasos no desenvolvimento, optou-se por realizar as simulações de forma teórica. Com o auxílio de softwares de cálculos matemáticos e modelagem 3D foi possível estimar a autonomia não só com o conjunto de baterias como também a autonomia com auxílio do extensor de autonomia selecionado pela fabricante do veículo.

Os cálculos consideraram as principais resistências ao movimento existentes, conforme citadas neste trabalho. Os resultados obtidos demonstraram que dependendo da intensidade da rota, o extensor tem a capacidade de dobrar a autonomia, porém, em rotas de maior intensidade a autonomia pode não ser tão satisfatória. Para atingir uma autonomia comparada aos demais veículos do mercado brasileiro seria necessária uma alteração não só do extensor de autonomia como também do carregador interno do veículo, o qual é limitado em 3,3 kWh.

Para trabalhos futuros, seriam interessantes testes práticos, que validassem os resultados obtidos aqui tanto em ensaios dinamométricos como em ciclos reais, desde rotas curtas do dia a dia a usos de maior intensidade como o *rally* do gama testado neste trabalho. Uma análise mais detalhada do extensor de autonomia também seria eficaz, encontrando as faixas de maior eficiência e entrega, otimizando seu uso e permitindo outras maneiras de controle e utilização. Além disso, também é possível fazer levantamentos do consumo de energia de componentes secundários, como ar condicionado, sistema de iluminação, sistema de som, painel e outros, e de como eles afetam a autonomia final do veículo.

Referências

- ABVE, A. B. do V. E. *2020: o melhor ano da eletromobilidade no Brasil*. 2021. Section: Home. Disponível em: <<https://www.abve.org.br/2020-o-melhor-ano-da-eletromobilidade-no-brasil/>>. Citado na página 14.
- ABVE, A. B. do V. E. *Eletrificados batem todas as previsões em 2021*. 2022. Section: Home. Disponível em: <<https://www.abve.org.br/eletrificados-batem-todas-as-previsoes-em-2021/>>. Citado na página 15.
- ACEA. *What is WLTP: the Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure*. 2022. Disponível em: <<https://www.wltpfacts.eu/what-is-wltp-how-will-it-work/>>. Citado 3 vezes nas páginas 49, 54 e 56.
- ALBUQUERQUE, I. et al. Seeg 8 - análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do brasil. p. 41, 2020. Citado na página 14.
- ANP, A. N. do P. *Síntese dos Preços Praticados - Diesel S10*. Governo Federal, 2022. Disponível em: <https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Por_Municipio_Index.asp>. Citado na página 60.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR6146: Invólucros de equipamentos elétricos - Proteção*. [S.l.], 1980. Citado na página 40.
- BECK, R. F. Baterias lítio-íon (lib). perspectivas e mercado - cpqd. 2016. Citado na página 39.
- BRANCO. Catálogo branco - 2021. p. 51, 2021. Citado na página 34.
- BRANCO. *Calculadora de dimensionamento do gerador*. c2021. Disponível em: <<https://calculadorabriggs.com.br/geradores/>>. Citado na página 35.
- BRASIL, C. P. da Silva ; Augusto Cesar de M. Análise comparativa do consumo energético e emissões de gases de efeito estufa gerado por veículos elétricos e à combustão interna. p. 51, 2018. Citado na página 14.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna - Vol. 1*. [S.l.]: BLUCHER, 2018. Citado na página 43.
- BUCHMANN, I. *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers*. [S.l.]: Cadex Electronics Incorporated, 2016. Citado na página 29.
- CAB. *CAB Motors*. c2021. Disponível em: <<https://cabmotors.ind.br/>>. Citado na página 15.
- CAPELLI, A. *Eletroeletrônica Automotiva - Injeção Eletrônica, Arquitetura do Motor e Sistemas embarcados*. [S.l.]: ERICA, 2010. Citado na página 41.
- CHAVES, H. B. Bancada híbrida combustão/energia elétrica. 2017. Citado na página 23.

- CPFL. *Mobilidade na CPFL - Tipos de Plug*. c2021. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br:443/sites/mobilidade-eletrica/mobilidade-e/Paginas/default.aspx>>. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.
- DENTON, T. *Veículos elétricos e híbridos*. [S.l.]: Blucher, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- ELS, P. P. D. van et al. Conversão de br800 e dimensionamento do sistema de arrefecimento. 2017. Citado na página 23.
- ELS, R. H. V. *Veículos elétricos - Conhecer e desenvolver*. [S.l.: s.n.], 2021. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- ELS, R. H. van. Developing technology for a brazilian hybrid electric mini car. 2020. Citado na página 23.
- ENEL. *Tarifas aplicadas e valores cobráveis*. Enel, 2021. Disponível em: <<https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/megamenu/taxas,-tarifas-e-impostos/cartaz-tarifas-2021.pdf>>. Citado na página 60.
- FENABRAVE. *Emplacamento Automóveis e Comerciais Leves Mar/2022*. São Paulo, p. 46, 2022. Citado na página 15.
- GILLESPIE, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1992. Citado na página 21.
- GRANDE, P. C. *Conheça os tipos de carro híbrido que existem atualmente no mercado*. 2019. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/especial/conheca-os-tipos-de-carros-eletricos-e-hibridos-existent-no-mercado/>>. Citado na página 28.
- HØYER, K. G. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, jun. 2008. Publisher: Pergamon. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957178707000768>>. Citado na página 26.
- INDUSTRIAL, F. *Veículos Comerciais Leves - Potência e torque*. c2021. Disponível em: <https://www.fptindustrial.com/global/pt/motores/on-road/veiculos-comerciais-leves/www.fptindustrial.com/global/pt/Pages/onroad_lcv_fla.aspx>. Citado na página 46.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Programa de controle de emissões veiculares (Proconve)*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>>. Citado na página 14.
- JEEP. Jeep, 2022. Disponível em: <<https://www.jeep.pt/4xe-hibrido/novo-wrangler-4xe>>. Citado na página 53.
- KERSTEN, A. et al. Review of technical design and safety requirements for vehicle chargers and their infrastructure according to national swedish and harmonized european standards. *Energies*, jan. 2021. Number: 11 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3301>>. Citado na página 31.

- KHALID, M. R. et al. A comprehensive review on structural topologies, power levels, energy storage systems, and standards for electric vehicle charging stations and their impacts on grid. *IEEE Access*, 2021. Conference Name: IEEE Access. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- KHALIL, S. et al. Tecnomobelet – adaption of van for electric propulsion and design of steering, cooling and braking assistance subsystems. 2021. Citado na página 25.
- KNUPFER, S. M. et al. *Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability*. 2017. Citado na página 27.
- LEAL, L. da C. M.; ROSA, E. da; NICOLAZZI, L. C. *Uma introdução à modelagem quase-estática de automóveis*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 6 vezes nas páginas 17, 18, 19, 20, 21 e 50.
- LEGEY, R. B. . L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no brasil. mar. 2011. Accepted: 2014-05-09T18:34:57Z Publisher: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1489>>. Citado na página 26.
- LOPES, L. L. L. Estudo da conversão do trem de potência a combustão para elétrico de uma van. análise da demanda de potência e projeto da bancada de ensaios. 2021. Citado na página 24.
- MAGALHÃES, S. C. L. de et al. Carros elétricos. p. 112, 2017. Citado na página 26.
- MAGELEC. *M24Px-x-19 MGU Axial Flux Permanent Magnet*. c2021. Disponível em: <<http://www.magelec.cn/en/products/details/20>>. Citado na página 46.
- MARTINS, J. Redução no Consumo dos Motores de Combustão Interna de Veículos. In: . [S.l.: s.n.], 2000. Citado na página 14.
- MATHEYS, J. et al. Comparison of the environmental impact of five electric vehicle battery technologies using LCA. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 2009. Disponível em: <<http://www.inderscience.com/link.php?id=23977>>. Citado na página 30.
- MATIELLO, J. P. Análise do desempenho de aceleração do veículo stark 2.3wd. 2011. Citado na página 16.
- MILLER, F. P. J. Norma PROCONVE P-8 de emissões no Brasil. p. 8, 2019. Citado na página 14.
- MOHAN, N. *Sistemas elétricos de potência*. [S.l.]: Grupo Gen - LTC, 2016. Citado na página 44.
- MONTECELOS, J. T. *Vehículos eléctricos*. [S.l.]: Ediciones Paraninfo, S.A, 2019. Citado na página 44.
- NUNES, B. B. Gerador de energia. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- OLIVEIRA, T. costa de. Estudo da tecnologia empregada em veículos elétricos com autonomia estendida: comparativo experimental com veículos híbridos. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 25.

- PEREIRA, E. A. *Análise comparativa dos custos dos veículos de combustão interna e veículos elétricos: Estudo de caso dos Correios*. 2015. Disponível em: <<https://silo.tips/download/analise-comparativa-dos-custos-dos-veiculos-de-combustao-interna-e-veiculos-elet>>. Citado na página 14.
- PINHEIRO, C. S. A. Desenvolvimento de um *Range Extender* para veículo elétrico. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 36.
- RIBEIRO, A. d. N. Caracterização de frenagem regenerativa de veículo elétrico com motor de indução considerando marcha e tempo de desaceleração. 2017. Citado na página 22.
- RIBEIRO, A. N.; ELS, R. H. van; MENEGHIN, P. Design of controle system for electric motor of two-stroke hybrid 800cc internal combustion engine. in 25th abcm. 2019. Citado na página 23.
- ROCHA, B. P. da; ALBERTON, H. B. de S.; OLIVEIRA, L. B. de. Frenagem regenerativa. 2014. Citado na página 34.
- RODRIGUES, J. C. B. Dimensionamento do Sistema de Tração para Veículos Elétricos - Tração Dianteira In-Wheel. 2017. Citado na página 19.
- SANTOS, M. M. D. *Veículos elétricos e Híbridos: Fundamentos, Características e Aplicações*. [S.l.]: Saraiva Educação S.A., 2020. Citado 3 vezes nas páginas 14, 28 e 44.
- SCRAGG, A. *Biofuels: Production, Application and Development*. CABI, 2009. (Cabi Series). ISBN 9781845935924. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=e2OLEkGWg3EC>>. Citado na página 39.
- SHAHZAD, M. H.; AMJAD, H. *Modern Technologies in Automobiles*. Tese (Doutorado), 2018. Citado na página 34.
- SILVA, P. cezar da. Análise de viabilidade técnica e econômica da conversão de van peugeot a combustão para elétrica. 2021. Citado na página 24.
- THATTIL, A. et al. Comparative study of using different electric motors for ev. n. 04, 2019. Citado na página 28.
- UnBTV. *Projeto da UnB estuda a tecnologia dos motores elétricos*. 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=1t8JRR2jffk>>. Citado na página 23.
- UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. *Regulation N° 101 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of passenger cars powered by an internal combustion engine only, or powered by a hybrid electric power train with regard to the measurement of the emission of carbon dioxide and fuel consumption and/or the measurement of electric energy consumption and electric range, and of categories M 1 and N 1 vehicles powered by an electric power train only with regard to the measurement of electric energy consumption and electric range*. [S.l.], 2012. Legislative Body: UNECE. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 56.
- VIEIRA, M. V. B.; ELS, R. van; KHALIL, S. B. Avaliação de um veículo a combustão interna convertido para tração elétrica. p. 10, 2015. Citado na página 23.

WIKILOC. *Rally do Gama Light*. 2021. Disponível em: <<https://www.wikiloc.com/offroading-trails/rally-do-gama-light-85349376>>. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 56.

ZORZETTO, R. Premissas de eficiência energética no dimensionamento elétrico de um motor gerador a diesel. p. 29, 2015. Citado na página 35.

Anexos

ANEXO A – Código em Octave utilizado no trabalho:

```

clc
clear all
close all
format short
pkg load io

g=9.80665;           %Acelerac\~{a}o da gravidade [m/s2]
m=1824/g;           %Massa [kg]

rho=1.22557;        %Massa especifica do ar [kg/m3]
cx=0.56;           %Coef. aerodinamico

Af=2.85;           %Area frontal [m3]

Pe = 75000;        %Potencia no motor [W]

n = 0.84;          %Rendimento de transmissao [0.84 a 0.93]
vv = 1;           %Velocidade relativa do vento [m/2]
re = 0.47*0.696;  %Raio estatico do pneu [m]
rd = 1.02*re;     %Raio dinamico do pneu [m]
E_bat = 4608*7*0.8;%Potencia de 80% do pack de baterias do Stark [Wh]

e_m = 0.95;       %Eficiencia do motor eletrico

Jrd = 4.153;      %Inercia do eixo transversal dianteiro [kg*m2]
Jrt = 4.156;      %Inercia do eixo transversal traseiro [kg*m2]
Jtd = 0.023;     %Inercia do eixo longitudinal dianteiro [kg*m2]
Jtt = 0.013;     %Inercia do eixo longitudinal traseiro [kg*m2]
Jm = 0.04;       %Inercia do motor segundo fabricante [kg*m2]

Jr = Jrt + Jrd;
Jt = Jtt + Jtd;

imar = 2.48;     %Relacao marcha
idif = 4.09;     %Relacao diferencial

%arquivo = ' rally-do-gama-light';
%arquivo = ' NEDC';

```

```

arquivo = ' WLTP';

vel = xlsread(strcat('Velocidade - ',arquivo,'.xlsx')); %vetor velocidade [m/s]
alt = xlsread(strcat('Altitude - ',arquivo,'.xlsx')); %vetor altitude [m]
dist = xlsread(strcat('Distancia - ',arquivo,'.xlsx')); %vetor distancia [m]
temp = xlsread(strcat('Tempo - ',arquivo,'.xlsx')); %vetor tempo [s]

fprintf('Rota excutada: %s.\n\n',arquivo)

%Garantir que todos vetores tem o mesmo tamanho para facilitar as manipulacoes
futuras.
tamanho = length(vel);
if tamanho > length(alt)
    tamanho = length(alt);
end

if (tamanho > length(dist))
    tamanho = length(dist);
end

if (tamanho > length(temp))
    tamanho = length(temp);
end

vel = vel (1:tamanho);
alt = alt (1:tamanho);
dist = dist (1:tamanho);
temp = temp (1:tamanho);

%Garantir que vetor tempo inicia em 0
temp1 = temp(1);

for t = 1 : tamanho
    temp(t) = temp(t) - temp1;
end

%Vetor distancia total, o angulo de inclinacao e aceleracao
vt = vel/0.95; %Velocidade teorica, considerando 5% de escorregamento

sum_dist = dist(1);

alpha(1) = 0;

for t = 2 : tamanho
    sum_dist(t) = dist(t) + sum_dist(t-1); %Vetor somatorio da distancia [m]
    alpha(t) = atand((alt(t)-alt(t-1))/(sum_dist(t)-sum_dist(t-1))); %Vetor
com o angulo de inclinacao [deg]

```

```
end
```

```
alpha(isnan(alpha)) = 0; %Remove possíveis erros NaN do vetor
```

```
a = diff(vt); %Vetor aceleracao [m/s ]
```

```
a(tamanho) = 0;
```

```
%Calculo das resistencias
```

```
J = Jr + idif^2*(Jt+(imar^2*Jm));
```

```
sigma = J/(m*rd*rd);
```

```
vv=vel; %Devido a falta de dados, considerou-se a velocidade relativa do vento  
como a velocidade do veiculo.
```

```
for t = 1 : tamanho
```

```
    f(t) = 0.0258 + (0.052*((vt(t)/100)^2)); %Coef. em funcao do tipo de pneu  
e velocidade
```

```
    Fs(t) = m * g * max(sin(alpha(t)),0); %Resistencia ao aclave [N]
```

```
    Fr(t) = f(t) * m * g * max(cos(alpha(t)),0); %Resistencia ao rolamento [N]
```

```
    Fa(t) = 0.5 * rho * (vv(t)^2) * cx * Af; %Resistencia aerodinamica [N]
```

```
    Fi(t) = m * max(a(t),0) * (1 + sigma); %Resistencia inercial [N]
```

```
    Fi(isnan(Fi)) = 0; %Remove possíveis erros NaN do vetor
```

```
    sum_F(t) = Fs(t) + Fi(t)+ Fr(t) + Fa(t); %Somatorio das resistencias [N]
```

```
end
```

```
%Calculo do trabalho necessario total
```

```
%Trab = trapz(sum_dist,sum_F);
```

```
Trab = sum(sum_F.*vt); %Trabalho realizado [J]
```

```
E2 = (Trab/(3.6*(10^6))); %Conversao de J para kWh
```

```
E = E2/e_m; %Aplicando a eficiencia do motor [kwh]
```

```
fprintf('Energia Total: %.2f kWh \n\n',E)
```

```
%Extensor de autonomia
```

```
P_ext = 3300; %Potencia do extensor em 50% de carga[W]
```

```
A_ext = 8.14; %Autonomia do extensor operando em 50% [h]
```

```
e_c = 0.95; %Eficiencia do carregador
```

```
E_ch = P_ext * e_c * A_ext; %Energia de saida a partir da eficiencia do  
carregador [W]
```

```
E_bat = E_bat/1000; %Converte para kWh
```

```
E_ch = E_ch/1000; %Converte para kWh
```

```
dist_f = sum_dist(tamanho)/1000; %Converte para km
```

```
temp_f = temp(tamanho)/3600; %Converte tempo para hora
```

```
c_m = dist_f/E; %Consumo medio [km/kWh]
```

```
fprintf('Duracao da rota%s: %.0f h %.0f min\n',arquivo, floor(temp_f), (mod  
(abs(temp_f),1)*60))
```

```
fprintf('Consumo medio na rota%s: %.2f km/kWh\n',arquivo, c_m)
```

```
fprintf('Comprimento da rota%s: %.2f km\n\n',arquivo, dist_f)
```

```
x_bat = E_bat/E;
```

```

fprintf('E possível realizar a rota%s cerca de %.2f vezes sem extensor\n'
,arquivo, x_bat)
fprintf('Totalizando %.2f km\n',dist_f*x_bat)
x_ch = E_ch/E;

%Grafico com consumo e geracao de energia
x=x_bat;
sum_trab = sum_F(1).*vt(1)/(3.6*(10^6))/n/e_m;
for t = 2 : tamanho      %cria o vetor consumo total de potencia
    sum_trab(t) = (sum_F(t).*vt(t))/(3.6*(10^6))/n/e_m + sum_trab(t-1);
%Vetor somatorio do consumo [Kw] D
end

gerado = 1;
sum_trab_bat=1;
while ceil(sum_trab_bat-gerado) ~= ceil(E_bat)
    for y=0 : ceil(x)-1
        for t=1 : tamanho
            temp_bat(t+y*tamanho) = temp(t)+(temp(tamanho)*y);
            sum_trab_bat(t+y*tamanho) = sum_trab(t)+(sum_trab(tamanho)*y);
        end
    end
end

gerado = linspace(0, (temp_f*e_c*x*P_ext/1000), (tamanho*ceil(x)));

for t = 1 : tamanho*ceil(x)
    if sum_trab_bat(t) < gerado(t)
        gerado(t) = sum_trab_bat(t);
        i=t;
    endif
end
gerado2 = linspace(gerado(i),gerado(i)+((temp(tamanho)*ceil(x))-temp(i))
/3600*P_ext/1000*e_c, (tamanho*ceil(x))-i);

for t = 1 : (tamanho*ceil(x))-i
    gerado(t+i) = gerado2(t); %vetor de geracao real, limitado pelo consumo
end

x = x+max(gerado)/E;
end
teste = sum_trab_bat-gerado;

[dif, ktst] = min(abs(teste-E_bat));

gerado(ktst)
if gerado(ktst) > E_ch
    [dif, ktst] = min(abs(gerado-E_ch));

```

```

end
gerado(ktst)

fprintf('e possivel realizar a rota%s cerca de %.2f vezes com a autonomia do
extensor\n',arquivo, ktst/tamanho)
fprintf('Totalizando %.2f km\n\n', (ktst/tamanho)*dist_f)

figure (1)
plot(temp_bat(1:ktst),sum_trab_bat(1:ktst))
hold on
plot(temp_bat(1:ktst),gerado(1:ktst), 'g')
hold on
plot(temp_bat(1:x_bat*tamanho),sum_trab_bat(1:x_bat*tamanho), 'LineWidth',1.8, 'r')
xlim ([0, ktst]);
title(arquivo)
legend({'Energia consumida.', 'Energia gerada.', 'Alcance em modo puramente
eletrico.'}, 'Location', 'northwest')
ylabel('Energia (kWh)')
xlabel('Tempo (s)');

figure(2)
[hAx,hLine1,hLine2] = plotyy(temp_bat(1:tamanho),sum_trab_bat(1:tamanho),temp_bat
(1:tamanho),vel*3.6);
hold on
plot(temp_bat(1:tamanho),gerado(1:tamanho), 'g')

title(arquivo)
legend({'Energia consumida.', 'Energia gerada.', 'Perfil de velocidade.'},
'Location', 'northwest')
ylabel(hAx(1), 'Energia (kWh)', 'Color', 'k')
ylabel(hAx(2), 'Velocidade (km/h)', 'Color', 'k')
xlabel('Tempo (s)');
set ([hLine2], "linestyle", "--");

%Custo
rs_gas = 7.229; %Preco da gasolina
rs_die = 6.882; %Preco do diesel
rs_kwh = 0.6369; %Preco do kWh
cst_die = ((rs_die*70)/600) + (1192/15000);
cst_ele = ((E_bat/e_c*rs_kwh)/(dist_f*x_bat));
cst_gas = ((15*rs_gas)/(dist_f*ktst/tamanho));
cst_comb= ((E_bat/e_c*rs_kwh)+(15*rs_gas))/((dist_f*x_bat)+(dist_f*ktst/tamanho));
fprintf('Custo por km rodado na versao diesel: %.2f \n',cst_die)
fprintf('Custo por km rodado puramento eletrico: %.2f\n',cst_ele)

```

```
fprintf('Custo por km rodado com o extensor de autonomia: %.2f\n', cst_gas)
fprintf('Custo por km rodado na versao hibrida: %.2f\n\n', cst_comb)
fprintf('O modo puramente eletrico e cerca de %.2f vezes mais barato que o
diesel\n', cst_die/cst_ele)
fprintf('O modo combinado e cerca de %.2f vezes mais barato que o diesel\n',
cst_die/cst_comb)
```