

Mario Akira de Santi

**Ferramentas Livres para
Simulação de Veículos Elétricos:
Estudo de Caso de um Kart Elétrico**

Brasil

2025

Mario Akira de Santi

**Ferramentas Livres para
Simulação de Veículos Elétricos:
Estudo de Caso de um Kart Elétrico**

Trabalho apresentado à disciplina Desenvolvimento de Monografia como requisito para conclusão do curso de Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica

Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Dr. Paulo Roberto Ubaldo Guazzelli

Brasil

2025

Mario Akira de Santi
Ferramentas Livres para
Simulação de Veículos Elétricos:
Estudo de Caso de um Kart Elétrico/ Mario Akira de Santi. – Brasil, 2025-
98 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Paulo Roberto Ubaldo Guazzelli

Desenvolvimento de Monografia – Universidade Federal de São Carlos – UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica, 2025.

1. Veículos Elétricos. 2. Simulação. 3. *Python* 4. *Gym Electric Motors* 5.
PyBaMM

CDU 02:141:005.7

Este trabalho é dedicado à minha família que sempre me incentivou e apoiou a estudar e aprender.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Ricardo Matubaro de Santi e Aparecida de Fátima Soler Matubaro de Santi, minhas irmãs, Natalí Soler Matubaro de Santi e Nicole Soler Matubaro de Santi, que sempre me incentivaram e apoiaram a estudar mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço também ao Prof. Dr. Paulo Roberto Ubaldo Guazzelli, pela orientação durante este trabalho. Sempre com grande atenção, dedicação e paciência em ensinar e ajudar com todas as dúvidas durante o meu desenvolvimento.

Agradeço também à Universidade Federal de São Carlos por permitir o meu ingresso a universidade, ao acesso aos laboratórios de ensino e ao aprendizado desenvolvido durante a graduação em Engenharia Elétrica. Além de todos os amigos que fiz e que me ajudaram durante toda a graduação.

*“The wonder is,
not that the field of stars is so vast,
but that man has measured it.
(Anatole France)*

Resumo

De acordo com a crescente busca por métodos de redução da emissão de gases causadores do efeito estufa, os veículos elétricos têm sido uma alternativa global para os veículos a combustão, por isso a importância de estudar e desenvolver tecnologias na área. A modelagem e simulação dos veículos elétricos são extremamente importantes para a redução de custos, segurança e eficiência desses veículos. Porém, as simulações são realizadas majoritariamente através de ferramentas proprietárias, como *Matlab*, *Simulink* e *Simcenter Amesim*. Sendo assim, é interessante buscar ferramentas alternativas para simulação de veículos elétricos de forma gratuita. Dessa maneira, será utilizado um kart elétrico como estudo de caso para as simulações, adaptando bibliotecas de simulação *open source* do *Python* já existentes com as simulações necessárias, como simulação de um ciclo de condução e eficiência energética. As bibliotecas utilizadas foram a *Gym Electric Motor* para simulação de controle do motor de acordo com as cargas dinâmicas do kart e a biblioteca *PyBaMM* para simulação da bateria. Para o ciclo de condução, foram utilizados os dados de velocidade de um kart a combustão em um kartódromo de aluguel para gerar a referência de velocidade do kart elétrico. Com isso, foi possível simular o controle de uma máquina elétrica de acordo com a referência de velocidade do ciclo de condução e a resposta da bateria do sistema para a simulação do kart elétrico.

Palavras-chaves: Veículos Elétricos. Máquina Síncrona. Célula de Lítio. Simulação. *Python*. *Gym Electric Motors*. *PyBaMM*

Abstract

In response to the increasing demand for methods to reduce greenhouse gas emissions, electric vehicles have emerged as a global alternative to combustion vehicles, highlighting the importance of study and development technologies in this field. Modeling and simulation of electric vehicles are crucial for cost reduction, safety, and efficiency. However, most simulations are carried out using proprietary tools, such as Matlab, Simulink, and Simcenter Amesim. Therefore, it is worthwhile to explore free, alternative tools for electric vehicle simulation. In this context, an electric go-kart is used as a case study, employing existing open-source Python simulation libraries to perform essential simulations, such as driving cycle and energy efficiency analysis. The main libraries considered are Gym Electric Motor, to simulate motor control under the go-kart's dynamic loads, and PyBaMM, for battery simulation. For the driving cycle, speed data from a combustion go-kart at a rental kart track was used to generate a speed reference for the electric go-kart. This approach enabled the simulation of the electric machine's control according to the driving cycle's speed reference and the system's battery response for the electric go-kart simulation.

Key-words: Electric Vehicles. Synchronous Machine. Lithium Cell. Simulation. Python.Gym Electric Motors. PyBaMM

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ciclo de Condução WLTP	26
Figura 2 – Diagrama de blocos para simulação de um veículo elétrico no <i>Matlab-Simulink</i>	26
Figura 3 – Diagrama de blocos de simulação no <i>SimCenter Amesin</i>	27
Figura 4 – Diagrama com os principais sistemas de um VE.	29
Figura 5 – Comparativo entre tipos de baterias para parâmetros de densidade energética e de potência, faixa de temperatura, retenção de carga, tensão por célula, ciclabilidade, preço e segurança.	30
Figura 6 – Composição dos tipos de baterias presentes nos veículos elétricos disponíveis no mercado automotivo em 2023	31
Figura 7 – Diagrama da reação na célula de íon de lítio para representação das reações químicas durante os ciclos de carregamento e descarregamento da bateria.	32
Figura 8 – Comparação de diferentes tipos de composição das células de íons de lítio para parâmetros de densidade de potência e energética, custo, ciclo de vida e segurança.	32
Figura 9 – Classificação de tipos de máquinas elétricas.	34
Figura 10 – Seções transversais de máquinas CC, de indução, de relutância chaveada e síncrona de ímã permanente.	34
Figura 11 – Distribuição percentual da utilização dos tipos de máquinas elétricas no mercado automobilístico em 2020(a) e 2023(b).	35
Figura 12 – Diagrama de diferentes tipos de máquinas síncronas com classificação da influência de fluxo magnético e relutância.	37
Figura 13 – Circuito conversor <i>Full Bridge</i> CC-CC Cidirecional.	38
Figura 14 – Circuito simplificado de inversor.	39
Figura 15 – Diagrama de forças de um kart.	40
Figura 16 – Diagrama do ambiente de simulação de máquinas elétricas da biblioteca GEM.	43
Figura 17 – Diagrama de malha de controle genérica do GEM.	45
Figura 18 – Diagrama da malha de controle de velocidade de uma máquina PMSM.	46
Figura 19 – Fluxograma da simulação de uma máquina elétrica no GEM.	46
Figura 20 – Diagrama de representação do processo de simulação do <i>PyBaMM</i>	48
Figura 21 – Tensão e corrente da célula durante o ciclo de corrente criado.	49
Figura 22 – Visão aérea do kartódromo ECPA.	51
Figura 23 – Visão geral da plataforma de aquisição do ciclo de condução.	52
Figura 24 – Visão geral do <i>Raspberry Pi 1 model A</i>	52

Figura 25 – Módulo GPS GY-NEO6MV2.	53
Figura 26 – Dados de velocidade durante todo o evento.	54
Figura 27 – Velocidade de referência do kart e da máquina.	54
Figura 28 – Potência elétrica (a) e torque elétrico (b) necessários para a máquina elétrica.	57
Figura 29 – Fluxograma do processo de simulação.	63
Figura 30 – Velocidade da máquina PMSM e do kart elétrico durante o ciclo de condução.	65
Figura 31 – Potência elétrica e mecânica da simulação da máquina PMSM durante ciclo de condução (a) e corrente do barramento CC durante ciclo de condução (b).	65
Figura 32 – Corrente por ramo de células da bateria com o total de 9 voltas de treino. 66	
Figura 33 – Estado de carga(SoC) da bateria ao fim do treino (a) e Tensão da bateria durante as 9 voltas do treino (b).	66
Figura 34 – Corrente por ramo de células da bateria com o total de 16 voltas de corrida.	67
Figura 35 – Estado de carga(SoC) da bateria ao fim da corrida (a) e tensão da bateria durante as 14 voltas da corrida (b).	67
Figura 36 – Velocidade da máquina PMSM e do kart elétrico durante o ciclo de condução para nova massa de baterias.	68
Figura 37 – Corrente por ramo de células da bateria com o total de 9 voltas de treino para nova massa de bateria para nova massa de bateria.	69
Figura 38 – Estado de carga da bateria (a) e tensão da bateria durante (b) durante as 9 voltas de treino para nova massa de bateria.	69
Figura 39 – Corrente por ramo de células da bateria com o total de 16 voltas de corrida para nova massa de bateria.	70
Figura 40 – Estado de carga (a) e tensão da bateria com o total de 16 voltas de corrida para nova massa de bateria.	70

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dados quantitativos de um comparativo entre os tipos de bateria em relação a densidade energética e de potência, ciclo de vida e custo.	30
Tabela 2 – Comparação entre máquinas síncronas, assíncronas e de relutância chaveada quanto à eficiência, torque e custo.	35
Tabela 3 – Parâmetros elétricos da máquina PMSM.	58
Tabela 4 – Parâmetros elétricos da célula de lítio SAMSUNG INR 18650-25R.	59
Tabela 5 – Parâmetros mecânicos do kart.	60
Tabela 6 – Resultado das substituições dos parâmetros mecânicos.	61
Tabela 7 – Resultado das substituições dos parâmetros mecânicos.	64
Tabela 8 – Resultados das simulações.	71

Lista de abreviaturas e siglas

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DFN	Doyle, Fuller e Newman
FOC	<i>Field Oriented Control</i> (Controle Orientado por Campo)
GEM	<i>Gym Electric Motor</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HP	<i>Horse Power</i> (Cavalo-Vapor)
IPMSM	Motor Síncrono de Ímãs Permanentes Montados no Interior
LFP	Lítio-Ferro-Fosfato
LTO	Lítio-Titânio
lmo	Lítio-Manganês
MTPA	Máximo Torque por Ampère
MTPF	Máximo Torque por Fluxo
NCA	Lítio-Níquel-Cobalto-Alumínio
NMC	Lítio-Níquel-Manganês-Cobalto
Pma-SynRM	Motor Síncrono de Relutância Assistido por Ímãs Permanentes
SMPMSM	Motor Síncrono de Ímãs Permanentes Montados na Superfície
SoC	<i>State of Charge</i> (Estado de Carga)
SynRM	Motor Síncrono de Relutância
UDDS	Ciclo de Condução Urbano por Dinamômetro
VE	Veículo Elétrico
VEHP	Veículos Híbridos <i>Plug-in</i>
WLTP	Procedimento de Teste Harmonizado Mundial para Veículos Leves

Lista de símbolos

A_f	Área Frontal do Kart
B	Coefficiente de Atrito Viscoso
C_1	Capacitor do Conversor
c_D	Coefficiente de Arrasto Aerodinâmico
D_1	Diodo do Conversor
f_n	Frequência Nominal
F_R	Forças de Reação ao Movimento do Kart
F_T	Força de Tração do Kart
F_W	Força de Atrito Aerodinâmico
F_r	Força de Resistência ao Rolamento
g	Aceleração da Gravidade
I_0	Relação de Transmissão Final
I_g	Relação de Transmissão
i_A	Corrente de Saída do Conversor
i_{sd}	Corrente de Estator na Coordenada d
i_{sq}	Corrente de Estator na Coordenada q
i_s	Corrente da Entrada do Conversor
L_1	Indutor do Conversor
L_d	Indutância de Estator na Coordenada d
L_q	Indutância de Estator na Coordenada q
M	Massa Total do Kart
p_p	Pares de Polos
P_n	Potência Nominal da Máquina Elétrica

Q	Transistor do Inversor
R_r	Coefficiente de Resistência ao Rolamento da Roda
R_s	Resistência de Estator na Coordenada d
r_d	Raio da Roda
S	Chave do Conversor
T_e	Torque Elétrico gerado pela Máquina Elétrica
T_f	Torque da Máquina
T_L	Torque de Carga
T_N	Torque Nominal da Máquina
T_r	Torque da Transmissão
U_a	Tensão da Fase A do Inversor
U_b	Tensão da Fase B do Inversor
U_c	Tensão da Fase C do Inversor
U_{CC}	Tensão Nominal do Barramento CC
U_o	Tensão de Saída do Conversor
U_s	Tensão de Entrada do Conversor
U_{cc}	Tensão de Entrada CC do Inversor
U_{ds}	Tensão de Estator na Coordenada d
U_{qs}	Tensão de Estator na Coordenada q
V	Velocidade do Kart
V_{Vento}	Velocidade do Vento
α	Ângulo de Inclinação da Pista
λ_m	Fluxo Magnético dos Ímãs do Rotor
λ_{ds}	Fluxo do Estator na Coordenada d
λ_{qs}	Fluxo do Estator na Coordenada q
ω_m	Velocidade angular do rotor

ω_{mec} Velocidade Angular Mecânica da Máquina

ω_r Velocidade de Saída da Transmissão

ρ Densidade do Ar

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Motivações e Justificativa	25
1.2	Objetivos	27
1.3	Organização da Monografia	28
2	VEÍCULOS ELÉTRICOS	29
2.1	Baterias	29
2.1.1	Baterias de Íons de Lítio	31
2.2	Máquinas Elétricas	33
2.2.1	Máquinas Síncronas	36
2.3	Conversores de Potência	37
2.3.1	Conversores CC-CC <i>Full Bridge</i> Bidirecional	37
2.3.2	Conversores CC-CA: Inversores	38
2.4	Dinâmica Veicular Longitudinal	39
3	SOFTWARES LIVRES	43
3.1	Biblioteca <i>Gym Electric Motors</i> - GEM	43
3.1.1	<i>Arquitetura de Simulação</i>	43
3.1.1.1	Carga Mecânica	44
3.1.1.2	<i>Controle das Máquinas</i>	45
3.1.1.3	<i>Estrutura de Código</i>	46
3.2	Biblioteca <i>Python Battery Mathematical Modelling</i> - PyBaMM	47
3.2.1	<i>Arquitetura de Simulação</i>	47
3.2.2	<i>Estrutura de Código</i>	48
4	PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DO CICLO DE CONDUÇÃO	51
4.1	<i>Raspberry Pi</i>	51
4.2	<i>Módulo GPS GY-NEO6MV2</i>	53
4.3	<i>Estrutura dos Dados</i>	53
5	ESTUDO DE CASO DO KART ELÉTRICO	57
5.1	Modelagem Elétrica do Kart	57
5.2	Modelagem Mecânica do Kart	60
6	RESULTADOS	63
6.1	Controle	64
6.2	Primeira Simulação	64

6.2.1	Simulação - Motor	64
6.2.2	Simulação - Baterias	65
6.2.2.1	Treino	65
6.2.2.2	Corrida	66
6.3	Segunda Simulação	68
6.3.1	Simulação - Motor	68
6.3.2	Simulação - Baterias	68
6.3.2.1	Treino	68
6.3.2.2	Corrida	69
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
7.1	Conclusões	73
7.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	73
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICES	79
	APÊNDICE A – CÓDIGO DA MODELAGEM DA MÁQUINA ELÉ- TRICA	81
	APÊNDICE B – CÓDIGO DA PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DO CICLO DE CONDUÇÃO	85
	APÊNDICE C – CÓDIGO DE SIMULAÇÃO DA BATERIA	89
	APÊNDICE D – CÓDIGO DE SIMULAÇÃO DA MÁQUINA PMSM DO KART ELÉTRICO	91
	APÊNDICE E – DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÕES DINÂMI- CAS	97

1 Introdução

A participação de Veículos Elétricos (VE) e Veículos Híbridos *Plug In* (VHP) no mercado de automóveis mundial deve alcançar 50% até 2050 para garantir a diminuição da emissão de gases do efeito estufa (International Energy Agency, 2023). A seguir serão apresentadas as motivações e justificativas para o estudo de ferramentas alternativas para simulação de veículos elétricos além dos objetivos e da organização da monografia.

1.1 Motivações e Justificativa

Diante disso, a eletrificação dos veículos é importante e existem diversas etapas para o desenvolvimento dessa tecnologia, como a modelagem do sistema como um todo. A modelagem garante ao projeto uma qualidade de segurança, redução de custos e uma melhor eficiência (BAZZO; PEREIRA, 2009).

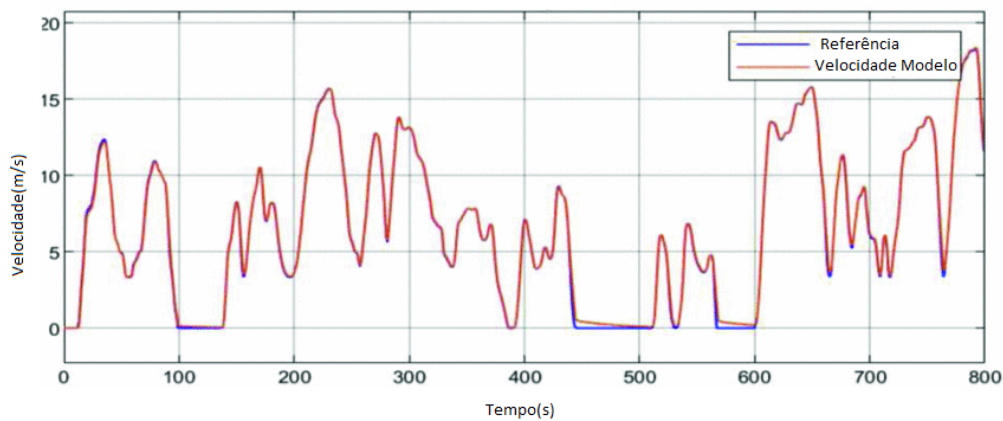
A partir da modelagem, é possível iniciar outra etapa, a simulação. As simulações permitem visualizar como o sistema responde as condições e hipóteses previstas na modelagem (BAZZO; PEREIRA, 2009). A partir das simulações é possível alterar o sistema para garantir a sua segurança, custo e eficiência de acordo com a necessidade do projeto.

Nesse sentido, surgem as ferramentas proprietárias de simulação, que apesar de serem importantes e muito confiáveis, podem ser empecilhos para pequenos projetos. Dessa maneira, é interessante a busca por ferramentas alternativas livres que permitam realizar essas simulações.

No âmbito do estudo e desenvolvimento de *VE's*, a eficiência dos veículos é algo de extrema importância para sua colocação no mercado automobilístico. A estimativa da eficiência é levada em conta para o desenvolvimento desses veículos (MALARSELVAM; CARUNAISELVANE, 2023).

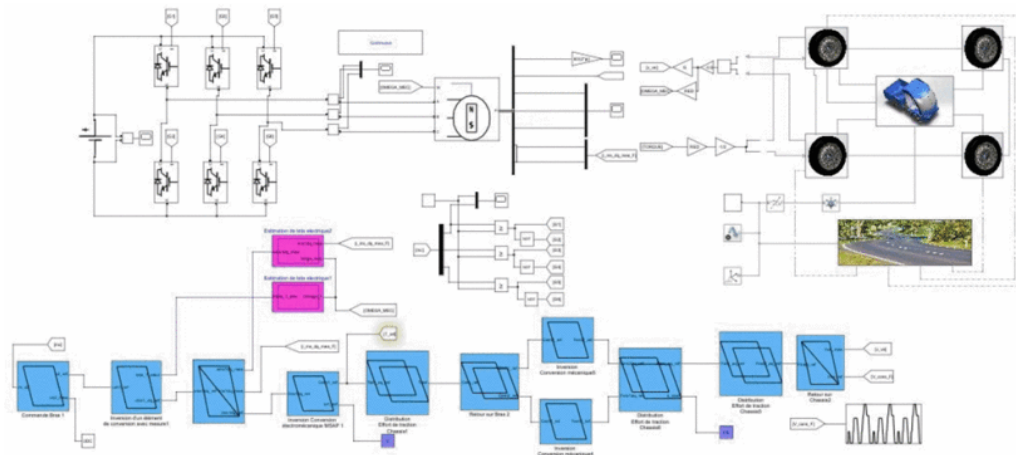
A eficiência é determinada por um Ciclo de Condução (*Drive Cycle*). Isso é, um perfil de velocidades que o veículo deve seguir durante um período de tempo, como pode ser visualizado na Figura 1, para determinar uma estimativa de autonomia em quilômetros que consegue rodar em uma carga. Existem diversos tipos de perfis de condução pelo mundo, dentre eles o *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS), *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure* (WLTP) e os diversos ciclos específicos de cada mercado (ALMATRAFI; BADAAM; QAISAR, 2023).

Figura 1 – Ciclo de Condução WLTP



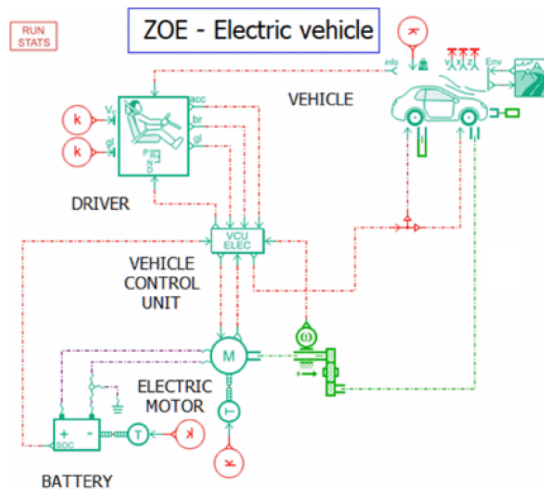
Fonte: Adaptado de Almatrafi, Badaam e Qaisar (2023)

Existem diversos *softwares* que permitem a simulação de um perfil de velocidades para um veículo elétrico considerando diversas características necessárias. O *Matlab-Simulink* é uma ferramenta poderosa que possui uma grande variedade de opções para simulações de veículos elétricos como *Simscape Power Systems* (JBARI; ASKOUR; IDRISSE, 2023) e *Advisor* (N et al., 2023). A Figura 2 é uma representação do trabalho de Jbari, Askour e Idrissi (2023) de um veículo elétrico.

Figura 2 – Diagrama de blocos para simulação de um veículo elétrico no *Matlab-Simulink*

Fonte: Jbari, Askour e Idrissi (2023).

Outra ferramenta existente é o *SimCenter Amesim* da *Siemens*, que também permite a simulação de um veículo elétrico. A Figura 3 representa um diagrama de blocos de uma simulação utilizando a ferramenta da *Siemens* por Irimia et al. (2019).

Figura 3 – Diagrama de blocos de simulação no *SimCenter Amesin*

Fonte: Irimia et al. (2019).

Frente a essa realidade de *softwares*, é possível perceber que todos são ferramentas proprietárias, ou seja, devem ser adquiridas. Dessa maneira, é interessante buscar ferramentas livres que permitam realizar esses estudos com a mesma qualidade.

A linguagem de programação *Python* é uma ferramenta que permite a realização de cálculos, manipulação e análise de dados, automação de tarefas e aprendizado de máquinas. A partir de sistemas de equações diferenciais é possível modelar e determinar soluções para sistemas contínuos no domínio do tempo (NAUMOVIC et al., 2020). Senso assim, é possível utilizar *Python* para simular modelos de máquinas elétricas, baterias e diversos tipos de sistemas que podem ser representados por um conjunto de equações diferenciais.

1.2 Objetivos

Para realizar a simulação de um VE, faz-se necessária a modelagem do veículo, esse processo deve considerar um modelo de condução, os componentes eletrônicos e mecânicos do veículo, além do sistema de controle (LI; WANG; QU, 2022). A simulação deve levar em consideração cada uma das hipóteses consideradas no modelo para demonstrar a resposta desejada.

O objetivo desse trabalho é buscar ferramentas livres como alternativas para simulação que os *softwares* proprietários realizam. Para isso será utilizado um kart elétrico como estudo de caso das ferramentas livres encontradas, sendo necessário modelar mecanicamente um kart e projetar o sistema de *powertrain* e banco de baterias desse veículo.

Além disso, será necessário determinar um perfil de velocidade para aplicar o sistema modelado em um ciclo de condução. Por fim, será necessário o uso de outra

ferramenta que permita a simulação do banco de baterias para verificar a eficiência dos sistema como um todo. Têm-se os seguintes objetivos:

- Modelar um kart elétrico, a partir de parâmetros elétricos e mecânicos, além de uma quantidade inicial de baterias;
- Definir um ciclo de condução para o kart e um perfil desejado de descarga para as baterias;
- Simular o controle da máquina elétrica de acordo com as hipóteses do modelo;
- Simular o consumo das baterias de acordo com o modelo;
- Utilizar as informações para avaliar as hipóteses iniciais de quantidade de bateria e refinar a simulação.

Após a avaliação da eficiência energética, pode ser necessário retornar a modelagem do sistema para garantir que o modelo corresponde ao sistema desejado inicialmente.

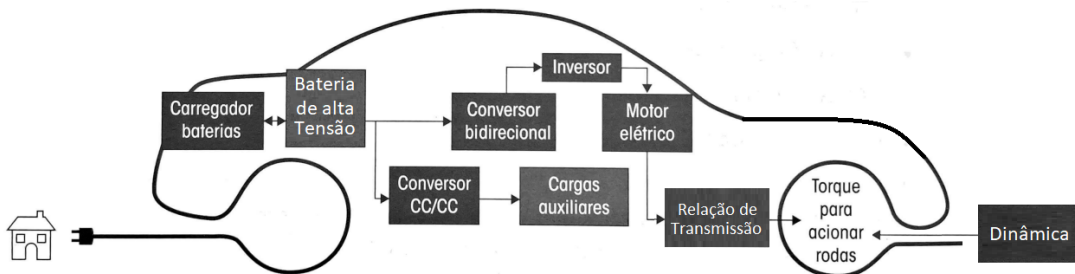
1.3 Organização da Monografia

No Capítulo 2 serão apresentados os tipos de bateria para veículos elétricos, as máquinas elétricas e a dinâmica de veículos em geral. Posteriormente, no Capítulo 3 serão descritas as ferramentas livres, que são bibliotecas de código aberto na linguagem de programação *Python*, utilizadas para simulações. Seguindo para o Capítulo 4, será demonstrada a maneira em que foi obtido o Ciclo de Condução para o estudo de caso. No Capítulo 5, será apresentada a modelagem do kart de estudo de caso, com as hipóteses e simplificações do estudo. Em seguida, no Capítulo 6, os resultados das simulações de controle da máquina elétrica considerando as hipóteses e simplificações aplicadas, além da simulação das baterias e novamente a simulação do modelo de controle da máquina com os novos parâmetros dinâmicos e por fim a última simulação das bateria para o ciclo final de condução. Por fim, o Capítulo 7 para conclusão e considerações finais do projeto.

2 Veículos Elétricos

Um VE é composto por três sistemas principais, o motor elétrico de tração, a eletrônica de potência e o sistema de armazenamento de energia. Essas três áreas podem ser expandidas considerando todos os sub sistemas, entre eles, máquina elétrica, conversores, inversores, baterias e sistema de gerenciamento de bateria (CHAN, 2007). A Figura 4 de Santos (2020) representa uma visão geral de todos os principais sistemas de um VE.

Figura 4 – Diagrama com os principais sistemas de um VE.



Fonte: Adaptado de Santos (2020).

Devido ao foco do estudo de caso ser um kart elétrico, as análises e considerações serão feitas apenas nos sistemas de bateria, conversores CC/CC, inversores, máquina elétrica e relação de transmissão. Ainda nesse capítulo serão discutidos esses sistemas, como as baterias, máquinas elétrica, conversores de potência e a dinâmica de veículos em geral.

2.1 Baterias

O sistema de armazenamento de energia de veículos elétricos é predominante o uso de baterias eletro-químicas. O funcionamento das baterias consiste em um eletrólito e dois eletrodos de materiais diferentes que reagem em uma reação iônica (LUKIC et al., 2008).

A Tabela 1 de Dixon (2010) demonstra um estudo comparativo entre alguns tipos de bateria e algumas características técnicas de cada uma. De acordo com esses dados é possível perceber o porquê do uso das baterias de íons de lítio para os veículos elétricos. Altas capacidade de gerar potência e de armazenar energia são essenciais para a performance dos VE's, mesmo tendo um alto custo.

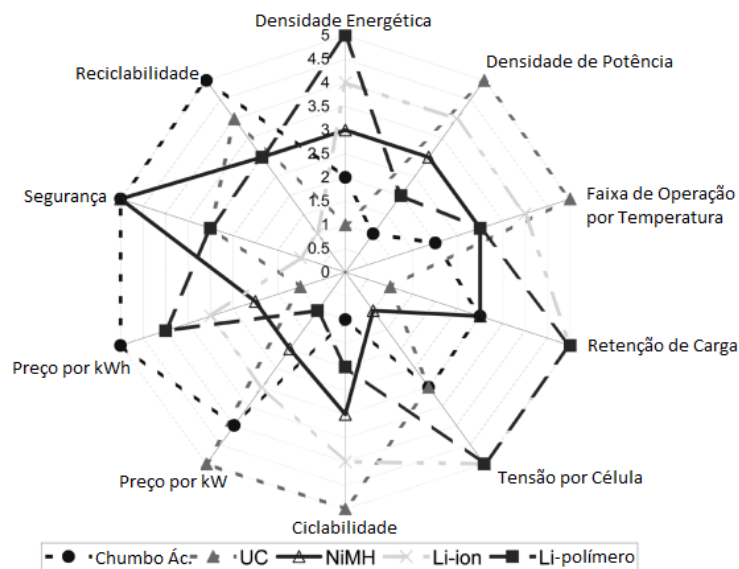
Tabela 1 – Dados quantitativos de um comparativo entre os tipos de bateria em relação a densidade energética e de potência, ciclo de vida e custo.

Tipo de Material	Wh/kg	W/kg	Ciclo de Vida	Custo US\$/kWh
Chumbo-ácido	35	150	700	150
Ni-MH	70	220	1500	1500
Li-ion	130	350	1000	2000
ZEBRA	110	150	1500	700
Super Capacitores	5	2000	500000	25000

Fonte: Adaptado de Dixon (2010).

De acordo com a Figura 5 de Lukic et al. (2008) é possível ver o quanto as baterias de íons de lítio e lítio-polímero são boas opções quanto tensão por célula e a retenção de carga. Porém, apesar disso, ainda as células de íons de lítio apresentam qualidades melhores como o preço por kWh, ou seja, mais armazenamento por menor preço.

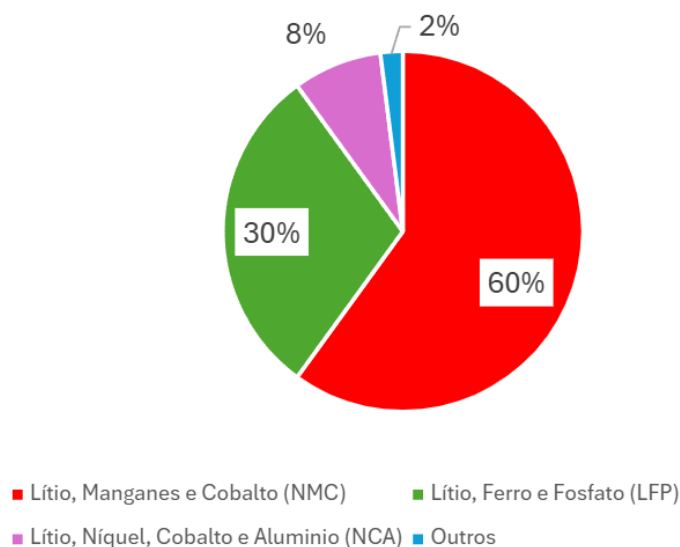
Figura 5 – Comparativo entre tipos de baterias para parâmetros de densidade energética e de potência, faixa de temperatura, retenção de carga, tensão por célula, ciclabilidade, preço e segurança.



Fonte: Adaptado de Lukic et al. (2008).

A Figura 6 adaptada de Sevdari, Marinelli e Pastorelli (2024) demonstra um percentual da participação dos tipos de baterias no mercado de veículos elétricos. A partir dos dados, pode-se concluir que o mercado está dominado pela utilização de íons de lítio, isso porque, as baterias de íons de lítio totalizam 98% do mercado de veículos elétricos.

Figura 6 – Composição dos tipos de baterias presentes nos veículos elétricos disponíveis no mercado automotivo em 2023



Fonte: Adaptado de Sevdari, Marinelli e Pastorelli (2024).

2.1.1 Baterias de Íons de Lítio

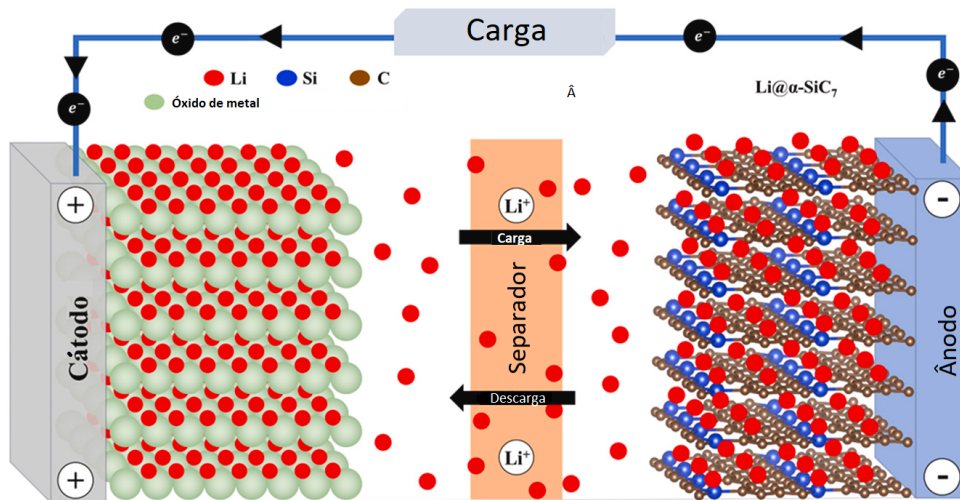
As baterias de íons de lítio são escolhidas para o uso em veículos elétricos devido ao longo ciclo de vida, entre 500 a 1000 ciclos de carga (FULLER; DOYLE; NEWMAN, 1994). Isso se deve ao processo químico que gera o fluxo de elétrons na célula ser reversível, possibilitando os inúmeros ciclos.

A Figura 7 de Fatihi et al. (2024) representa um diagrama do funcionamento de uma célula de lítio. No diagrama é possível observar quais elementos e óxidos compõem cada parte da célula, ou seja, o óxido se localiza no cátodo, o grafite (carbono) no ânodo. Deve-se considerar que algumas das células de íons de lítio existem apenas com a presença do grafite (Carbono) no ânodo, apesar da Figura 7 demonstrar uma formação com Si (silício) que representam outros modelos e linhas de pesquisa atuais.

Existem diversos tipos de baterias de íons de lítio, variando os materiais que compõem a célula. A partir dos anos 1990, com a utilização de óxidos de cobalto começaram diversos estudos para melhorar as características das células (BRUCE et al., 2012).

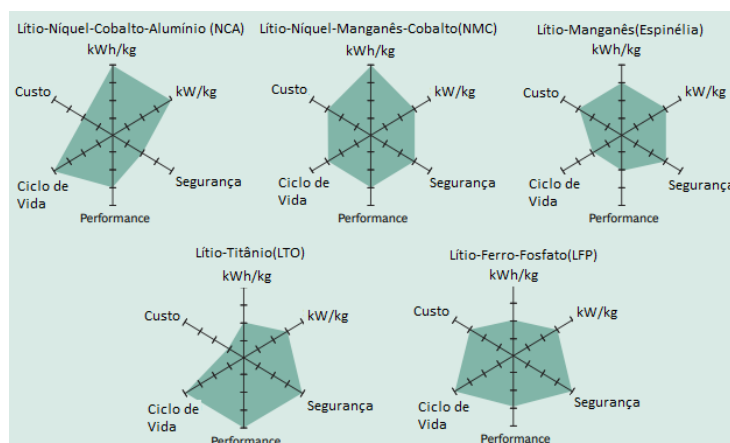
A Figura 8 representa um diagrama para comparar os diferentes tipos de células de íons de lítio. Comparando os tipos, percebe-se que as composições de NCA e NMC, mais utilizadas em veículos elétricos, apresentam grande capacidade de armazenamento de energia e de geração de potência, o que explica o seu grande uso em veículos elétricos que buscam a melhor performance.

Figura 7 – Diagrama da reação na célula de íon de lítio para representação das reações químicas durante os ciclos de carregamento e descarregamento da bateria.



Fonte: Adaptado de Fatihi et al. (2024).

Figura 8 – Comparação de diferentes tipos de composição das células de íons de lítio para parâmetros de densidade de potência e energética, custo, ciclo de vida e segurança.



Fonte: Adaptado de BCG (2016).

Os principais modelos matemáticos para representação de células de íons de lítio são os modelos 1D e 2D de Doyle, Fuller e Newman (1993) e Fuller, Doyle e Newman (1994). O modelo matemático de Doyle, Fuller e Newman (DFN) considera a conservação de carga e massa, além do processo eletroquímico. O modelo DFN leva em consideração muitos parâmetros físicos construtivos da célula para representar o sistema real, sendo o 2D um método mais robusto e custoso computacionalmente para simulações.

Para o cálculo do estado de carga da bateria (*State of Charge* - SoC), é possível aplicar um método básico de acordo com a integral do consumo de corrente e a capacidade total da bateria. A Equação 2.1 representa o método simplificado de calcular o SoC da bateria. Onde i seria a corrente consumida no intervalo de tempo desejado e $SoC(t_0)$ é o estado de carga inicial.

$$SoC = SoC(t_0) - \frac{1}{CapacidadeTotal} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

Porém, como o método de resolução do DFN normalmente é feito de maneira computacional, uma das variáveis que o modelo DFN permite a manipulação durante os cálculos, é a capacidade consumida da bateria de acordo com o consumo de corrente. Dessa maneira, utilizando vetores é possível calcular o SoC pela Equação 2.2.

$$SoC = SoC(t_0) - \frac{CapacidadeConsumida}{CapacidadeTotal} \quad (2.2)$$

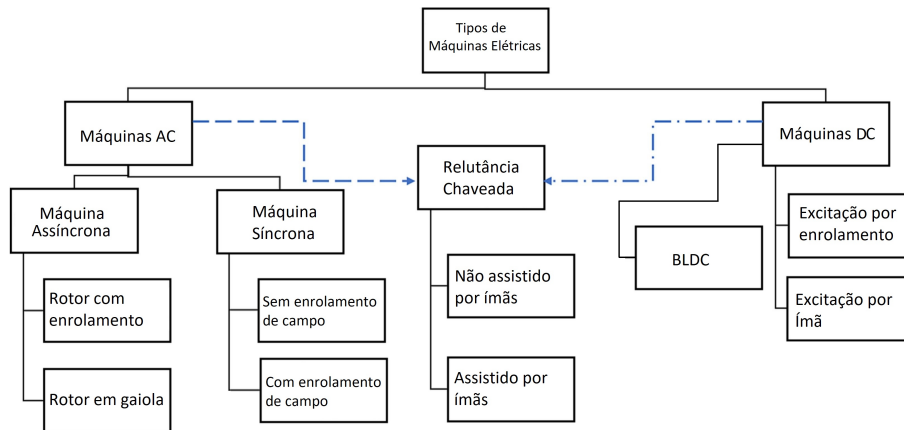
Considerando uma bateria composta por um conjunto de células, a capacidade total é determinada pela quantidade de células em paralelo. Logo, quanto maior a quantidade de ramos em paralelo, maior será a capacidade da bateria. Já a tensão da bateria é determinada pela quantidade de células em série.

2.2 Máquinas Elétricas

As máquinas elétricas existem desde o século XIX com o desenvolvimento das primeiras máquinas (DOPPELBAUER, 2023). Desde então, o desenvolvimento e pesquisas elevaram a complexidade e permitiram a utilização de máquinas elétricas em veículos.

A Figura 9 representa uma classificação de máquinas elétricas quanto ao princípio de funcionamento. De acordo com Gobbi et al. (2024), existem quatro tipos majoritários de classificações de máquinas elétricas, as síncronas, assíncronas, relutância chaveada e de corrente contínua. Existem diversas classificações para máquinas elétricas devido ao compartilhamento de características que permitem classificar de outras maneiras, alguns autores podem considerar motores CC sem escovas (BLDC) e máquinas de relutância chaveada como máquinas síncronas, por exemplo.

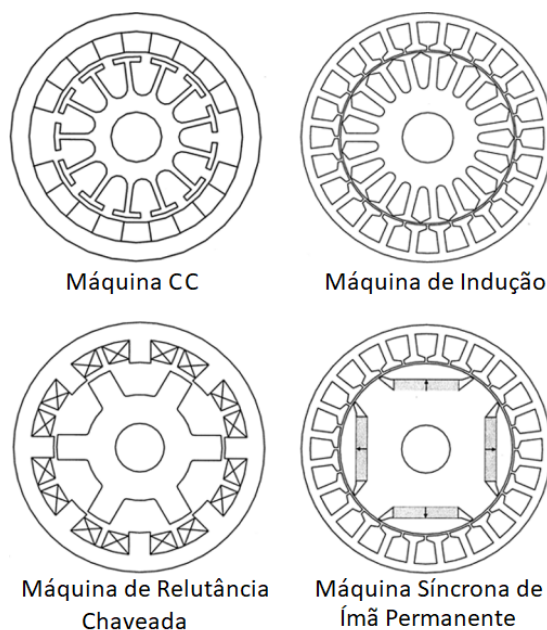
Figura 9 – Classificação de tipos de máquinas elétricas.



Fonte: Adaptado de Gobbi et al. (2024).

A Figura 10 representa uma visão da seção transversal de uma máquina de corrente contínua (CC), de uma máquina de indução, de uma máquina de relutância chaveada e de uma máquina síncrona de ímã permanente. Na maioria das máquinas de corrente alternada (CA) o enrolamento de armadura fica no estator, já em máquinas CC, o enrolamento de armadura fica na parte rotativa, o rotor (UMANS, 2014).

Figura 10 – Seções transversais de máquinas CC, de indução, de relutância chaveada e síncrona de ímã permanente.



Fonte: Adaptado de Chau, Chan e Liu (2008).

A Tabela 2 demonstra um comparativo entre um máquina síncrona de ímã permanente, uma assíncrona de indução e outra de relutância chaveada em relação à eficiência, torque e custo. De acordo com o estudo de Dorrell et al. (2010), a faixa de potência das três máquinas é próxima de 47 kW, sendo assim, é possível perceber o quanto a máquina de ímã permanente se sobressai em relação a um maior torque e maior eficiência, porém, perdendo drasticamente em relação ao custo.

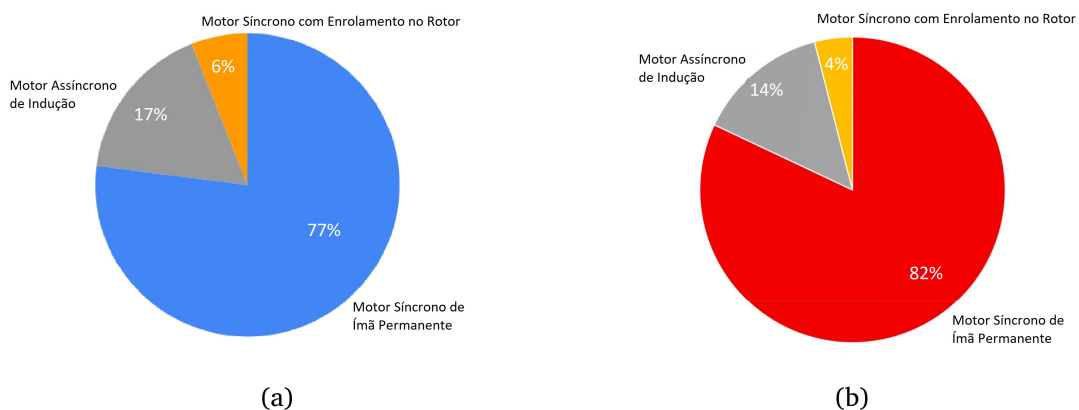
Tabela 2 – Comparação entre máquinas síncronas, assíncronas e de relutância chaveada quanto à eficiência, torque e custo.

	Eficiência a 1500 rpm[%]	Torque[Nm]	Custo US\$
Síncrono de Ímã Permanente	91,3	303	242,17
Assíncrono	83,1	297	143,80
Relutância Chaveada	85,2	294	74,16

Fonte: Adaptado de Dorrell et al. (2010).

A Figura 11 representa a distribuição percentual da utilização dos tipos de máquinas elétricas utilizadas no mercado de veículos puramente elétricos e híbridos. O mercado demonstra a busca pela melhor desempenho e eficiência dos veículos, já que em 2020 77% do mercado automobilístico utilizava motores síncronos com ímãs permanentes e em 2023 o percentual atingiu 82%.

Figura 11 – Distribuição percentual da utilização dos tipos de máquinas elétricas no mercado automobilístico em 2020(a) e 2023(b).



Fonte: Adaptado de Gobbi et al. (2024).

É possível perceber o porquê da indústria automobilística de veículos elétricos preferir os motores síncronos de ímãs permanentes, mesmo que possuam alto custo, o desempenho e a eficiência sobressaem e tem se tornado a escolha majoritária do mercado.

Porém, esses tipos de motores utilizam metais de terras raras, estes materiais em grande parte são encontrados na China, o que tem levado algumas montadoras, como Renault e BMW, a buscar outros tipos de máquinas para diminuir a dependência chinesa (GOBBI et al., 2024). Apesar da dependência dos metais de terras raras os motores síncronos de ímãs permanentes ainda são a melhor tecnologia de máquinas elétricas para aplicações de VE's.

2.2.1 Máquinas Síncronas

Em uma máquina síncrona a velocidade é determinada pela frequência da fonte de tensão que alimenta o motor (UMANS, 2014). O modelo matemático para representação de uma máquina síncrona geral pode ser desenvolvido a partir das Equações 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8 em coordenadas dq0(YADAV; MANISHA, 2022):

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_m L_q i_{qs} \quad (2.3)$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_d i_{ds} + \lambda_m) \quad (2.4)$$

$$\lambda_{ds} = L_d i_{ds} + \lambda_m \quad (2.5)$$

$$\lambda_{qs} = L_q i_{qs} \quad (2.6)$$

$$T_e = 1.5P [\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}] \quad (2.7)$$

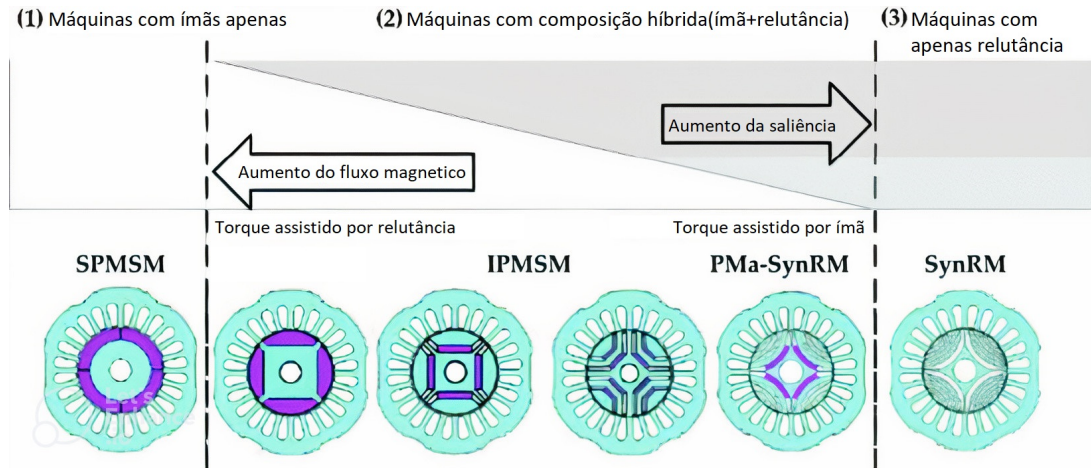
$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - B\omega_r - T_L \quad (2.8)$$

Onde, U_{ds} representa a tensão no estator na coordenada d, U_{qs} representa a tensão no estator na coordenada q, λ_{ds} representa o fluxo no estator na coordenada d, λ_{qs} representa o fluxo no estator na coordenada q, i_{ds} representa a corrente no estator na coordenada d, i_{qs} representa a corrente no estator na coordenada q, ω_r representa a velocidade mecânica do rotor, R_s representa a resistência do estator, L_d representa a indutância na coordenada d, L_q representa a indutância na coordenada q e λ_m representa o fluxo magnético dos ímãs.

A Figura 12 representa um diagrama para classificação das máquinas síncronas de acordo com a influência de fluxo magnético de ímãs e de relutância. Existem diferentes tipos de máquinas síncronas, como os motores síncronos de ímãs permanentes montados na superfície (SPMSM), motores síncronos de ímãs permanentes montados no interior

(IPMSM), motores síncronos de relutância assistidos por ímãs permanentes (PMA-SynRM) e até mesmo motores síncronos de relutância (SynRM). Todos esse modelos podem ser representados pelas equações do modelo matemático anterior, variando os valores de L_d , L_q e λ_m .

Figura 12 – Diagrama de diferentes tipos de máquinas síncronas com classificação da influência de fluxo magnético e relutância.



Fonte: Adaptado de Sriprang et al. (2022).

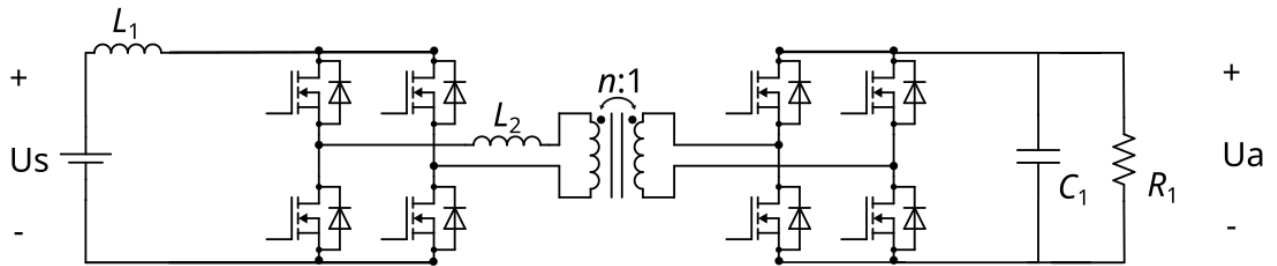
2.3 Conversores de Potência

Os conversores de potência são aplicações de toda tecnologia da eletrônica de potência. A eletrônica de potência pode ser dividida em três ramos, a potência, a eletrônica e o controle (AHMED, 2000).

Existem diversos tipos de conversores de potência, conversores CC-CC (Choppers) para aumentar ou diminuir tensões de corrente contínua (CC), conversores CA-CA, ou até mesmo conversores CC-CA. Para este trabalho, o foco é a modelagem e simulação dos conversores em valor médio.

2.3.1 Conversores CC-CC *Full Bridge* Bidirecional

Um conversor CC-CC é capaz de controlar um nível de tensão CC em uma ordem de grandeza proporcional a uma tensão de entrada (RASHID, 2014). Um conversor CC-CC *Full Bridge* bidirecional é um tipo específico de conversor isolado que permite controlar a tensão de saída e ainda assim regenerar a energia quando a máquina opera como gerador (YAMAMOTO et al., 2006).

Figura 13 – Circuito conversor *Full Bridge* CC-CC Cidirecional.

Fonte: Autoria própria.

A relação entre a tensão de entrada U_s e a tensão de saída U_a esta relacionada com o tempo de chaveamento dos transistores. Para este trabalho, foi considerado o modelo simplificado de conversor *Full Bridge* Bidirecional, considerando o modelo de valores médios, não considerando os efeitos de chaveamento.

De acordo com Wang, Lee e Lai (2000), a relação entre a tensão U_s e U_a é dada pela Equação 2.9, em que n é uma relação de espiras do transformador e D é o ciclo de trabalho do chaveamento dos transistores.

$$\frac{U_a}{U_s} = 2 \cdot n \cdot D \quad (2.9)$$

Porém, para garantir o aumento de tensão, ocorre um aumento da corrente na mesma proporção de maneira inversa, ou seja, a corrente da entrada é superior aquela que chega a carga. De acordo com Rashid (2014) a Equação 2.10 representa a relação entre as correntes, em que η_c representa à eficiência do conversor entre a corrente de entrada e saída.

$$\frac{i_s}{i_a} = 2 \cdot n \cdot D \cdot \eta_c \quad (2.10)$$

Para a aplicação do estudo de caso, será considerado um conversor como o *Full Bridge* Bidirecional que pode ser utilizado para veículos elétricos. Porém, ele não será simulado, somente será utilizada a convenção do aumento da corrente devido ao aumento da tensão.

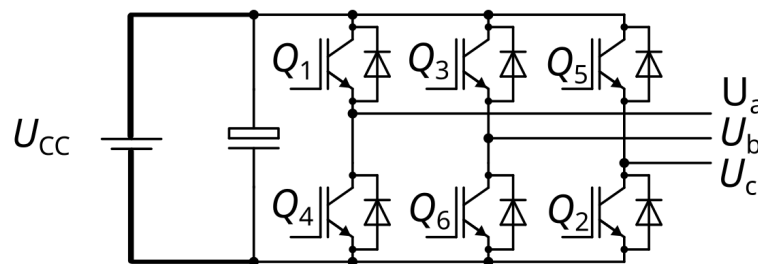
2.3.2 Conversores CC-CA: Inversores

Conversores CC-CA, conhecidos como inversores, convertem uma tensão CC em uma tensão CA com saída variável ou fixa além de possibilitar alteração da frequência do

sinal de saída (RASHID, 2014). Esse tipo de conversor é utilizado para controle de velocidade de máquinas elétricas devido ao controle de frequência que os inversores possibilitam.

A Figura 14 representa um circuito simplificado de um inversor. O circuito é alimentado por uma tensão CC, em seguida existe um capacitor e um conjunto de três pares de transistores e seis diodos. Para que não ocorra um curto-circuito é necessário que nunca o mesmo par de transistores esteja conduzindo, por exemplo Q_1 e Q_4 , Q_3 e Q_6 ou Q_5 e Q_2 .

Figura 14 – Circuito simplificado de inversor.



Fonte: Autoria própria.

Existem diversos efeitos causados pelo chaveamento dos transistores, além de outros diversos métodos de controle para o chaveamento que permitem o controle da frequência e das tensões U_a , U_b e U_c . Para este trabalho foi considerado o modelo de valor médio com a consideração de apenas uma relação de eficiência entre a potência de entrada e saída do sistema.

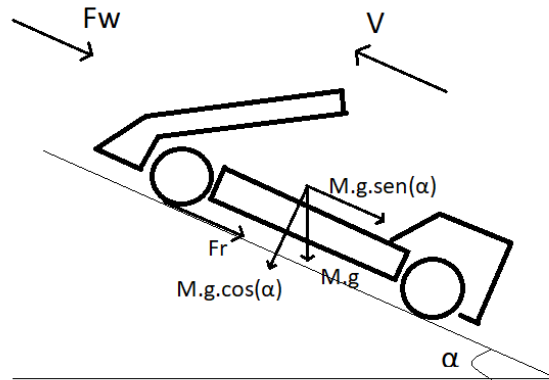
2.4 Dinâmica Veicular Longitudinal

A dinâmica de um veículo pode ser descrita pela segunda Lei de Newton, como descrito na Equação 2.11. Sendo M a massa total do veículo, F_T a força de impulsão do motor e F_R as forças de reação ao movimento.

$$M \cdot \frac{dV}{dt} = F_T - F_R \quad (2.11)$$

A Figura 15 representa um diagrama de forças para um sistema de um kart em movimento. As forças F_w e F_r representam a força aerodinâmica devido ao ar e a força de resistência ao rolamento das rodas. Ainda no diagrama de forças da Figura 15, existe a força de aclave ou declive, dependendo do ângulo α .

Figura 15 – Diagrama de forças de um kart.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com Porru et al. (2016), as forças que descrevem as forças do diagrama da Figura 15 podem ser descritas pelas equações a seguir. A Equação 2.12 representa a força aerodinâmica resultante do movimento do veículo em relação ao ar. Para isso, ρ representa a densidade do ar, A_f representa a área superficial frontal do veículo, c_D representa o coeficiente de arrasto aerodinâmico, V a velocidade do veículo e V_{Vento} a velocidade do vento.

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot c_D \cdot (V - V_{vento})^2 \quad (2.12)$$

A Equação 2.13 representa a força de resistência ao rolamento da roda. Para isso, R_r é o coeficiente de resistência ao rolamento, M é a massa total do veículo, g é a aceleração da gravidade e α é o ângulo de inclinação do local que veículo se movimenta.

$$F_r = R_r \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (2.13)$$

A Equação 2.14 representa a força de resistência ao movimento por inclinação do local que o veículo se movimenta.

$$F_g = M \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.14)$$

Sendo assim, a força F_R pode ser descrita pela Equação 2.15.

$$F_R = F_w + F_r + F_g \quad (2.15)$$

Além das forças que atuam no veículo, existe a atuação da relação de transmissão entre o motor e as rodas. De acordo com Carmona et al. (2023), a relação entre o torque do motor para as rodas é dado pela Equação 2.16, em que I_g é a relação de transmissão, I_0 é a relação final de transmissão e η_t é a eficiência da conversão mecânica e T_r e T_f são o torque da transmissão e o torque da máquina.

$$T_r = I_g \cdot I_0 \cdot \eta_t \cdot T_f \quad (2.16)$$

Já a Equação 2.17 representa a relação entre a velocidade da roda e a velocidade do motor. Em que ω_r é a velocidade de saída da transmissão e ω_m é a velocidade de entrada, ou seja, a velocidade do motor elétrico.

$$\omega_r = \frac{\omega_m}{I_g \cdot I_0} \quad (2.17)$$

Outra relação entre velocidades é da velocidade translacional do centro da roda com a velocidade de rotação da roda. De acordo com Santos (2020) a Equação 2.18 representa essa relação, em que V representa a velocidade do veículo em m/s e ω_m a velocidade do motor em rad/s .

$$V = \omega_r \cdot r_d = \frac{\omega_m \cdot r_d}{I_g \cdot I_0} \quad (2.18)$$

Além disso, outra consideração importante para o estudo da dinâmica de um veículo é a conversão de força para torque, como descrito pela Equação 2.19 de acordo com Santos (2020). Em que T é o torque, F a força e r o raio da roda.

$$T = F \cdot r \quad (2.19)$$

No Capítulo 5, tanto a dinâmica, quanto os outros sistemas que compõe um veículo elétrico serão descritos em valores físicos e as hipóteses para eles serão determinadas para permitir a aplicação de uma carga equivalente ao diagrama na simulação da máquina elétrica.

3 Softwares Livres

A seguir, serão apresentadas as bibliotecas de código aberto utilizadas para realizar as simulações de veículos elétricos, como a biblioteca de simulação de máquinas elétricas, o *Gym Electric Motors* e a biblioteca de simulação de baterias, o *PyBaMM*.

3.1 Biblioteca *Gym Electric Motors* - GEM

Para a simulação do controle de máquinas elétricas e a aplicação de diferentes tipos de cargas para representação do modelo mecânico, será utilizada a biblioteca *Gym Electric Motor* (GEM). A biblioteca GEM permite a simulação precisa de diversos modelos de máquinas e o seu controle para diversas aplicações (HEIDENREICH et al., 2021).

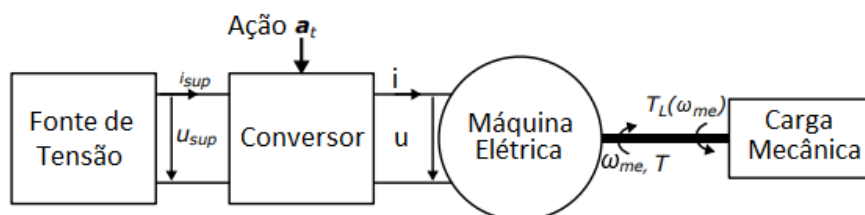
Essa biblioteca foi desenvolvida com inspiração no *Open AI - Gym* de Brockman et al. (2016) para aplicações de *reinforcement-learning-based-control* para máquinas elétricas. Apesar de permitir técnicas mais avançadas de controle, também é possível realizar métodos de controle clássicos.

Inicialmente os desenvolvedores da biblioteca GEM utilizavam outra biblioteca para simulações que envolvessem métodos clássicos de controle. O Book et al. (2023) era utilizado para o controle clássico das máquinas, porém, a maioria das funções de controle foram implementadas na própria biblioteca GEM.

3.1.1 Arquitetura de Simulação

A arquitetura de simulação baseia-se em um sistema composto por quatro subsistemas. A Figura 16 representa o diagrama do ambiente de simulação da biblioteca GEM. Ao criar o ambiente de simulação, devem ser considerados os quatro sistemas, a fonte de tensão, os conversores, a máquina elétrica e a carga mecânica.

Figura 16 – Diagrama do ambiente de simulação de máquinas elétricas da biblioteca GEM.



Fonte: Adaptado de Heidenreich et al. (2021).

A fonte de tensão será responsável por gerar a potência necessária para o sistema. De acordo com LEA Research Group (2024), existem diversos tipos de fontes de alimentação disponíveis do GEM, como:

- Fonte senoidal;
- Degrau;
- Fonte triangular;
- Fonte dente de serra;
- Fonte constante;
- Fonte comutadora;
- Fonte de Wiener.

Os conversores disponíveis são de primeiro, segundo e quarto quadrantes, além de conversores trifásicos e multi conversores, além da opção de não utilizar conversores para aplicações com apenas a fonte de tensão, como para motores ligados diretamente na rede trifásica. Sendo assim, é possível simular utilizando modelos de valor médio e modelos com consideração do PWM.

As máquinas elétricas CC disponíveis para simulação são o motor CC de excitação permanente, excitação externa, série e paralelo. Já as máquinas síncronas são o motor síncrono de ímã permanente, motor síncrono de excitação externa e o motor síncrono de relutância. As máquinas assíncronas são o motor de indução de gaiola de esquilo e o motor de indução com dupla alimentação.

As cargas mecânicas disponíveis no GEM são polinomial estática, em que os parâmetros da carga são dados pela reação com a velocidade da máquina elétrica. Outra carga mecânica é um velocidade constante para a máquina, além de também permitir aplicar um perfil de velocidades para máquina.

A seguir será demonstrada a correlação entre a dinâmica apresentada no Capítulo 2.4 com a aplicação de carga mecânica da biblioteca GEM.

3.1.1.1 Carga Mecânica

A aplicação de cargas mecânicas pela biblioteca GEM pode ocorrer de três maneiras, polinomial estática, velocidade constante e perfil de velocidades. Para representar a dinâmica de um veículo é necessário utilizar o método polinomial estático. Isso porque, assim como determinado pelas Equações 2.12, 2.13 e 2.14, os termos podem ou não ser dependentes da velocidade atual da máquina.

De acordo com LEA Research Group (2024), a equação diferencial que representa a relação mecânica do sistema é representada pela Equação 3.1. Além disso, $T_L(\omega_{mec})$ pode ser definido pela Equação 3.2.

$$\frac{d\omega_{mec}}{dt} = \frac{T - T_L(\omega_{mec})}{J_{Total}} \quad (3.1)$$

$$T_L(\omega_{mec}) = sign(\omega_{mec}) \cdot (c\omega_{mec}^2 + b|\omega_{mec}| + a) \quad (3.2)$$

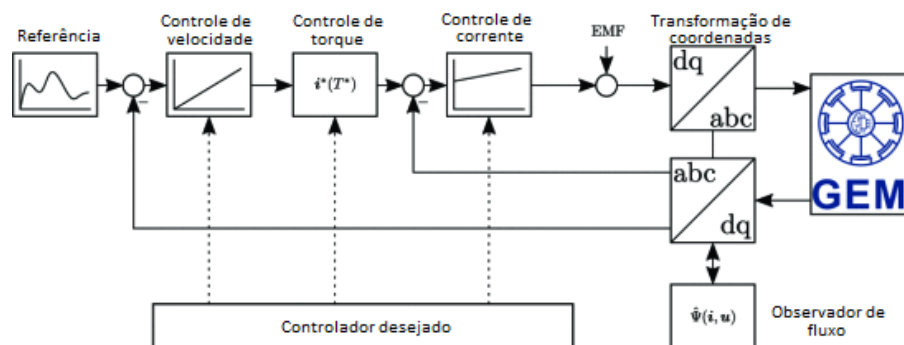
No Capítulo 5.2, a dinâmica do kart demonstrada no Capítulo 2.4 será aplicada ao modelo descrito pela Equação 3.1, permitindo a utilização na biblioteca GEM.

3.1.1.2 Controle das Máquinas

O GEM permite o controle das máquinas em três referências, velocidade, torque e correntes. Principalmente para máquinas trifásicas, os principais métodos de controle são o controle orientado de campo (field oriented control - FOC), máximo torque por ampère (MTPA) e o máximo torque por fluxo (MTPF) (BOOK et al., 2023).

A Figura 17 representa o diagrama de controle genérico do GEM. Apesar de ter incorporado a biblioteca de controle na própria biblioteca GEM, apenas os modelos contínuos de conversores estão disponíveis para os métodos de controle de velocidade, torque e corrente, para os modelos discretos, apenas o controle *on/off* está implementado.

Figura 17 – Diagrama de malha de controle genérica do GEM.

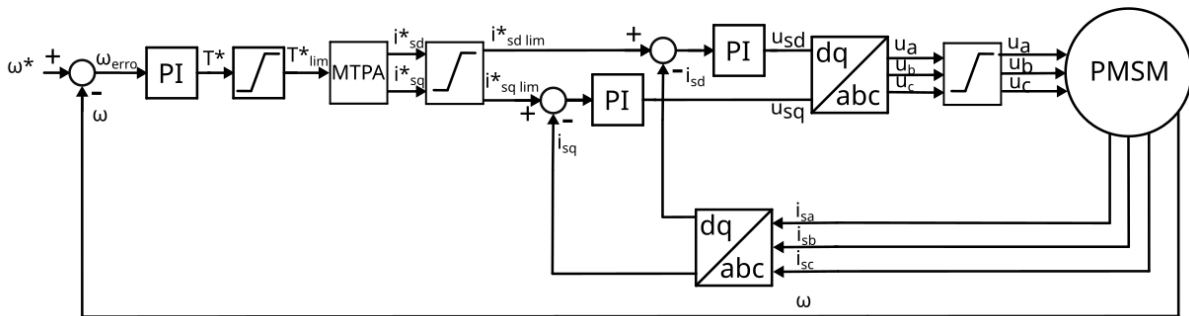


Fonte: Adaptado de Book et al. (2023).

Para máquinas CA, independente da variável desejada de controle, os métodos de FOC, MTPA e MTPF são utilizados de acordo com o necessário. Logo, ao utilizar o controle de velocidade ou de torque, também é necessário utilizar em cascata o controle de correntes d e q. Além disso, ocorre a conversão de coordenadas para realização do controle.

A Figura 18 representa o diagrama da malha de controle de velocidade de máquinas PMSM. O controle de velocidade utiliza um controlador em cascata de velocidade e correntes em coordenadas dq. Ademais, assim como descrito anteriormente, é utilizada também a ferramenta MTPA para extrair o máximo de torque de maneira eficiente.

Figura 18 – Diagrama da malha de controle de velocidade de uma máquina PMSM.

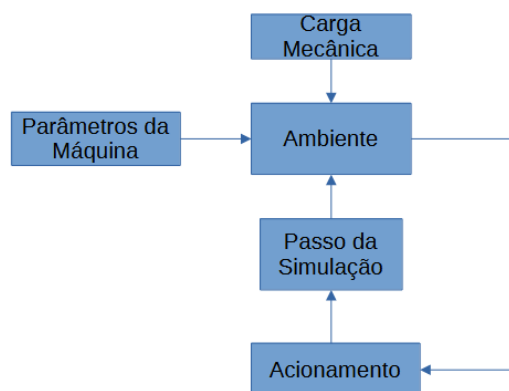


Fonte: Autoria própria.

3.1.1.3 Estrutura de Código

A Figura 19 representa o fluxograma da simulação de uma máquina elétrica no GEM. O processo de simulação se divide entre a criação do ambiente de simulação e a simulação com base no sistema proposto.

Figura 19 – Fluxograma da simulação de uma máquina elétrica no GEM.



Fonte: Autoria própria.

Para a criação de um ambiente, são passadas as informações da máquina elétrica, como tipo e os parâmetros construtivos como resistências, indutâncias e valores nominais e limites de características de torque, corrente, fluxo e tensão. Além disso, é especificado o

tempo de cada passo da simulação que está diretamente relacionado com o tempo total de simulação, já que a arquitetura de simulação se baseia em um loop "for" para resolver as equações diferenciais do modelo de máquina.

O acionamento pode ser representado por alguma das fontes de tensão, para o acionamento sem controle, ou quando utiliza-se controle, de acordo com o método de controle desejado. Logo, ao utilizar algum método de controle, a biblioteca utiliza algum parâmetros passados pela criação do ambiente para controlar a máquina.

Cada passo de simulação aplica a resposta do acionamento desejado no ambiente pelo número de veze desejados e espaçados em um intervalo de tempo definido por tau. Além disso, a biblioteca permite a utilização de limites para as máquinas, de modo que é possível para a simulação caso esses limites sejam ultrapassados após cada passo de simulação.

3.2 Biblioteca Python Battery Mathematical Modelling - PyBaMM

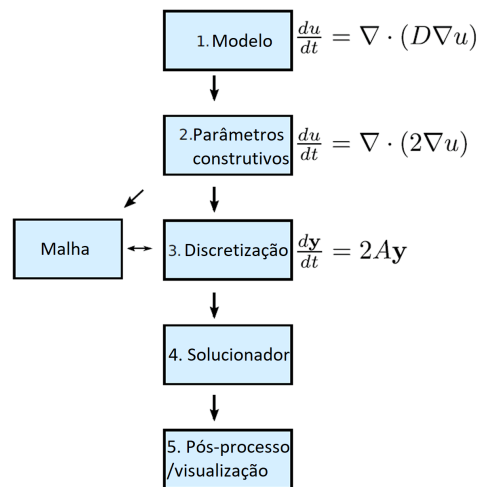
O *PyBaMM* surgiu como uma ferramenta alternativa aos softwares proprietários para o desenvolvimento e estudo de baterias no Reino Unido (SULZER et al., 2021). Diferente dos softwares proprietários, o *PyBaMM* permite maior flexibilidade ao separar a modelagem, discretização e solucionadores nas simulações de baterias.

Sendo assim, o *PyBaMM* possibilita a criação de novos modelos matemáticos para representação de baterias, apesar de possuir modelos clássicos consolidados como os modelo DFN descritos no Capítulo 2.1, quanto outros modelos como o *Single Particle Model* (SPM) ou o *Many Particle Model* (MPM).

Além disso, essa biblioteca permite a simulação de modelos *plug-and-play*, utilizando modelos e parâmetros já desenvolvidos pela equipe de contribuição do projeto para simulações menos complexas, permitindo a utilização dos parâmetros já determinados.

3.2.1 Arquitetura de Simulação

A Figura 20 o diagrama do processo de simulação do *PyBaMM*. Inicialmente deve ser determinado um modelo de representação da bateria. Em seguida, os parâmetros construtivos devem ser colocados para que se transformem em matrizes e vetores na etapa de discretização e criação da malha com condições iniciais e condições de contorno. Após a criação dos vetores e matrizes discretizados, o solucionador resolve o sistema e o processo é concluído com a visualização do resultado da simulação.

Figura 20 – Diagrama de representação do processo de simulação do *PyBaMM*.

Fonte: Adaptado de Sulzer et al. (2021).

Assim como no GEM, o *PyBaMM* também possui sistemas de segurança que impedem o sistema de simular situações impossíveis fisicamente, como por exemplo uma bateria sem carga continuar alimentando o sistema, ou a bateria atingir 0% de estado de carga (*State of Charge (SoC)*) e diferentemente do GEM, a simulação não é reiniciada, mas abortada com o feedback do erro ocorrido.

3.2.2 Estrutura de Código

Com *PyBaMM*, o foco será na utilização de modelos já existentes e consolidados que permitam a visualização de corrente consumida das baterias, tensões e SoC. Logo, a ideia geral da utilização do *PyBaMM* está relacionada com a Figura 20, em que a estrutura do código se assemelha. Inicialmente deve ser escolhido um modelo para representação da bateria, especificamente do tipo de célula de lítio a ser utilizada.

O Código 3.1 representa um programa para simulação de uma célula de lítio para um ciclo de corrente. A simulação consiste na utilização do modelo DFN para simulação, além de utilizar os parâmetros de uma célula de íons de lítio de exemplo da biblioteca. Para simular a célula, foi criado um ciclo de corrente senoidal que é aplicado como um degrau ao experimento. Por fim são selecionadas as variáveis desejadas para visualização e é feito o gráfico dessas variáveis.

Código 3.1 – Simulação de uma célula de íons de lítio

```

1 import pybamm
2 import numpy as np

```

```

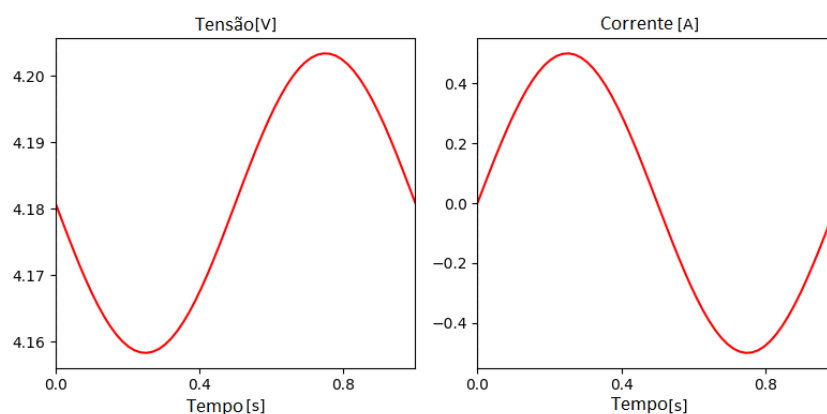
3 # Declara o modelo desejado
4 model = pybamm.lithium_ion.DFN()
5 # Define os parametros da celula com um exemplo da biblioteca
6 parameter_values = pybamm.ParameterValues("Chen2020")
7 # Determina o solucionador CasadiSolver no modo rapido
8 fast_solver = pybamm.CasadiSolver(atol=1e-3, rtol=1e-3, mode="fast")
9 # Cria o ciclo de corrente e um vetor de tempo para o ciclo
10 t = np.linspace(0, 1, 60)
11 sin_t = 0.5 * np.sin(2 * np.pi * t)
12 drive_cycle = np.column_stack([t, sin_t])
13 # Cria o experimento com o ciclo de corrente e a funcao degrau a partir
    do ciclo
14 experiment = pybamm.Experiment([pybamm.step.current(drive_cycle)])
15 # Cria a simulacao
16 sim = pybamm.Simulation(model, parameter_values=parameter_values,
    experiment=experiment, solver=fast_solver)
17 # Realiza a simulacao
18 sim.solve()
19 # Determina quais variaveis deseja analisar
20 output_variables = ["Voltage [V]", "Current [A]"]
21 # Faz o plot das variaveis desejadas
22 sim.plot(output_variables=output_variables)

```

Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 representa o resultado da simulação da célula do Código 3.1. O ciclo de corrente simulado apresenta um período de descarga da bateria, corrente positiva, e um ciclo de recarga da bateria, corrente negativa. É possível verificar a tensão da célula sendo reduzida durante a descarga e a tensão sendo aumentada durante a recarga da célula.

Figura 21 – Tensão e corrente da célula durante o ciclo de corrente criado.



Fonte: Autoria própria.

Os modelos de simulação de células de íons de lítio são extremamente complexos, assim como descritos no Capítulo 2.1.1, o modelo mais clássico de solução como do DFN de 2 dimensões considera diversos parâmetros construtivos da célula que devem ser levantados por meio de ensaios. Portanto, ao utilizar um modelo de célula já implementado na biblioteca, como o modelo Chen et al. (2020) é uma maneira mais simplificada para o estudo de simulações de veículos elétricos.

Além disso, os mesmo desenvolvedores da biblioteca *PyBaMM* desenvolveram o *liionpack*, essa biblioteca utiliza o *PyBaMM* para construir um conjunto da bateria (*Pack* de células). Porém, essa biblioteca não possui uma implementação do manuseio dos resultados da simulações, diferente do *PyBaMM*.

4 Plataforma de Aquisição do Ciclo de Condução

Para determinar um ciclo de condução, foi utilizado um projeto de verão de autoria própria de 2021(SANTI, 2023). O objetivo do projeto era um sistema de aquisição da telemetria de um kart a combustão durante uma seção de corrida e treino no kartódromo de Piracicaba(SP) no Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo(ECPA).

A Figura 22 representa uma visão aérea da pista de kart que foi utilizada para gerar o ciclo de condução. Os traçados da pista podem chegar a ter até 912 m, porém, o traçado utilizado possuía aproximadamente 770 m.

Figura 22 – Visão aérea do kartódromo ECPA.



Fonte: ECPA – Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo (2024).

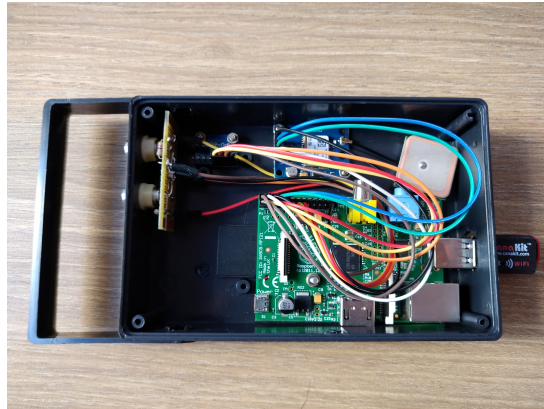
A Figura 23 representa uma visão geral da plataforma de aquisição do ciclo de condução. O sistema é composto por um Raspberry Pi 1, um sensor de posicionamento global(GPS) GY-NEO6MV2 e um acelerômetro MPU6050.

A seguir serão apresentados os principais componentes do sistema, além da estrutura e do código utilizado para aquisição dos dados. O código do programa utilizado para obter e salvar os dados pela plataforma está no Apêndice B.

4.1 *Raspberry Pi*

O *Raspberry Pi model A* é um mini-computador do tipo *Single-board Computer*(SBC, ou computador de placa única. Ele é equipado com uma CPU ARM1176JZF-S, 256 MB

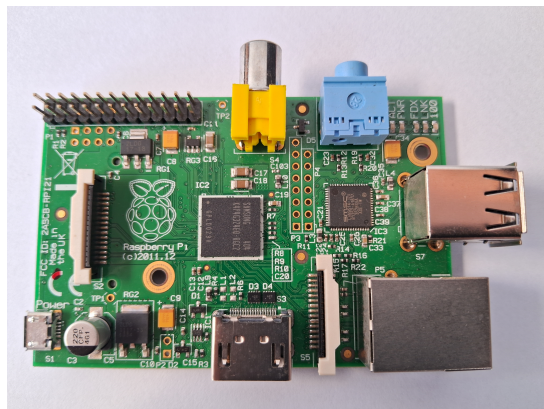
Figura 23 – Visão geral da plataforma de aquisição do ciclo de condução.



Fonte: Autoria Própria.

de memória RAM a 700 MHz (Raspberry Pi Foundation, 2024). A placa possui acesso a 26 *GPIO*' (pinos de entrada e saída de uso geral), comunicação serial, I2C e ethernet. A Figura 24 representa uma visão geral do mini-computador *Raspberry Pi*.

Figura 24 – Visão geral do *Raspberry Pi 1 model A*.



Fonte: Autoria própria.

O *Raspberry Pi* pode ser utilizado com o sistema operacional desenvolvido pela própria fundação Raspberry Pi Foundation (2024), o *Debian*, baseado nos sistemas *Linux* e adaptado para o potencial computacional do sistema. Para utilizar o *Raspberry Pi* é possível programar ele em *Python*, *C* ou *C++*. Para aquisição dos dados foi utilizado apenas a programação em *Python*.

4.2 Módulo GPS GY-NEO6MV2

O GY-NEO6MV2 é um receptor de GPS em único módulo de alto desempenho em geoposicionamento (u-blox, 2011). Esse dispositivo permite a aquisição dos dados enviados por satélite e a transmissão dos dados por meio de comunicação serial. A Figura 25 demonstra o módulo GPS GY-NEO6MV2 da fabricante *u-blox* com antena.

Figura 25 – Módulo GPS GY-NEO6MV2.



Fonte: Eletrodex (2024).

Por se tratar do uso de GPS, ou seja, o sistema americano de obtenção de posicionamento, os dados obtidos pelo dispositivo são padronizados no sistema NMEA, um sistema desenvolvido pela Associação Nacional de Eletrônica Marinha dos Estados Unidos. O GY-NEO6MV2 atualiza os dados com uma frequência de 1 Hz.

4.3 Estrutura dos Dados

Todos os dados de latitude, longitude, velocidade e tempo foram salvos em um arquivo *.csv*, em seguida foram separados os dados de latitude, longitude e velocidade. Para este trabalho, apenas as velocidade em cada instante de aquisição e o tempo são necessários.

A Figura 26 representa o conjunto total de velocidades de acordo com o geoposicionamento de latitude e longitude durante a corrida e treino, ou seja, a velocidade em cada conjunto de latitude e longitude, classificando-as por cores (maiores que 60 km/h , magenta; entre 50 e 60 km/h , azul; entre 40 e 50 km/h , ciano; entre 30 e 40 km/h , verde; entre 20 e 30 km/h , amarelo; menores que 10 km/h , vermelho;).

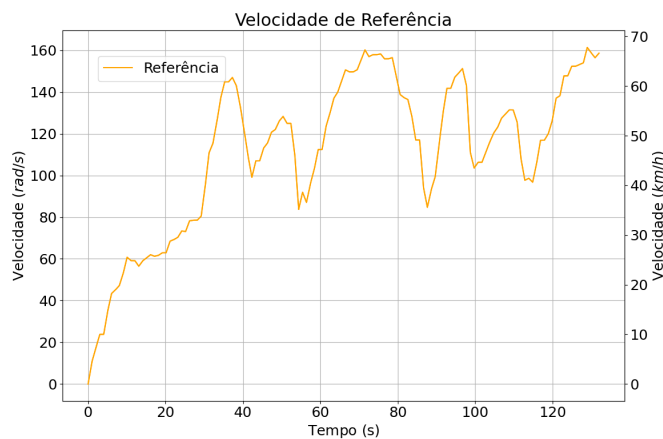
Figura 26 – Dados de velocidade durante todo o evento.



Fonte: Santi (2023).

Para utilização dos dados para o ciclo de condução, foram considerados apenas duas voltas de corrida, a primeira volta de largada e a segunda volta para em seguida janelar a segunda volta e considerar ela pela quantidade de vezes desejada e concatenar os vetores. A Figura 27 representa as velocidades de referência em rad/s e km/h do ciclo de condução.

Figura 27 – Velocidade de referência do kart e da máquina.



Fonte: Autoria própria.

Aplicando a Equação 2.18 adaptada para velocidade em km/h foi possível determinar o ciclo de condução que será a referência de velocidades da máquina elétrica na biblioteca GEM em rad/s . Dessa maneira, as curvas tornam-se sobrepostas devido a relação de proporcionalidade entre elas.

A partir do vetor de velocidades desejadas do motor em rad/s , é possível realizar a simulação do ciclo de condução do kart elétrico aplicando as condições de carga mecânica

possíveis na biblioteca GEM. No Capítulo 6, serão demonstrados os resultados obtidos de acordo com a simulações da máquina elétrica e da célula de lítio.

5 Estudo de Caso do Kart Elétrico

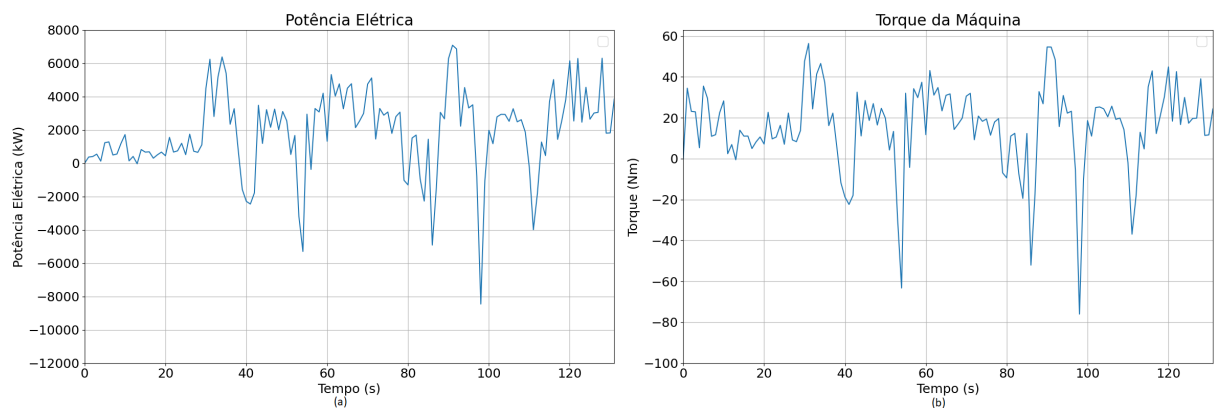
Um kart é um veículo de pequeno porte de quatro rodas e apenas um ocupante, podendo ser movido por motores a combustão ou elétrico (JOHNSON et al., 2017). A seguir, serão demonstradas as hipóteses e considerações tanto elétricas quanto mecânicas do estudo de caso.

5.1 Modelagem Elétrica do Kart

Inicialmente, para modelagem elétrica, foi escolhido um motor elétrico para fornecer potência ao kart. Assim como foi visto no Capítulo 2.2, a máquina síncrona com ímãs permanentes apresenta dados interessantes com relação à eficiência e potência.

Para ser um sistema equivalente ao sistema do kart a combustão utilizado para gerar o ciclo de condução, foi determinada a potência nominal e o torque elétrico necessário para que o kart elétrico correspondesse ao ciclo de condução. A Figura 28 representa potência elétrica (a) e torque elétrico (b) necessários para a máquina elétrica. A potência desejada da máquina para simular o kart elétrico é de 7 kW e o torque necessário deveria ser de 56 Nm.

Figura 28 – Potência elétrica (a) e torque elétrico (b) necessários para a máquina elétrica.



Fonte: Autoria própria.

Para isso, foi utilizada a Equação 2.11, de modo que foi calculada a derivada da velocidade durante o ciclo de condução e as forças de envolvidas, para obter a força de tração do sistema. Ao multiplicar a força de tração pelo perfil do ciclo de condução foi obtida a potência mecânica. Por fim, dividiu-se a potência mecânica pelas eficiências de transmissão, da máquina elétrica e do sistema de controle, ou seja, do inversor.

Os cálculos utilizados foram obtidos a partir do Apêndice A, aplicando os dados apresentados na Tabela 5. A máquina elétrica PMSM determinada a partir da modelagem anterior foi a máquina de Chakkalakkal, Vijayan e Nahid-Mobarakeh (2023). Um motor de 7 kW a uma velocidade nominal de 1500 rpm e com torque nominal de 46 Nm.

A Tabela 3 representa os parâmetros elétricos para modelagem da máquina PMSM. A partir dos é possível passa-los a biblioteca GEM e obter a resposta do que seria a aplicação dessa máquina ao sistema.

Tabela 3 – Parâmetros elétricos da máquina PMSM.

Parâmetro	Unidade	Valor
P_n	kW	7
p_p	-	4
ω	RPM	1500
R_s	Ω	0.05
L_d	mH	3
L_q	mH	3
λ_m	Wb	0,125
J	$kg \cdot m^2$	0,003
T_N	Nm	46
U_{CC}	V	470
$I_n(rms)$	A	60

Fonte: Chakkalakkal, Vijayan e Nahid-Mobarakeh (2023).

Como os valores obtidos pela máquina de Chakkalakkal, Vijayan e Nahid-Mobarakeh (2023) não são exatamente os calculados pelo modelo da Figura 28 ocorrerá uma variação entre a referência e a velocidade do sistema, logo o sistema não corresponderá exatamente a referência. Essa variação entre a referência de velocidade e a velocidade real do sistema pode ser medida com o erro quadrático médio entre o valor do sistema e a referência. Além disso, U_{CC} representa a tensão do barramento CC que alimenta o inversor que irá controlar o motor. Ademais, I_n está representando a corrente nominal do motor.

Para modelar a bateria, foram escolhidas células de íons de lítio do tipo SAMSUNG INR 18650-25R. Essa célula é do tipo LiNiCoMnO2(NMC), que de acordo com a Figura 8, apresenta melhores características entre as células de íons de lítio.

A Tabela 4 representa alguns dos diversos parâmetros elétricos da célula INR 18650-25R. Um outro parâmetro importante é a massa de cada célula, já que essa informação irá influenciar na resposta da dinâmica do kart. De acordo com Samsung SDI (2024), a massa média de uma célula do tipo INR 18650-25R é de 45 g.

De acordo com Iannuzzi et al. (2018), a massa máxima de bateria do tipo de íons de

Tabela 4 – Parâmetros elétricos da célula de lítio SAMSUNG INR 18650-25R.

Parâmetros	Valor
Capacidade nominal	2500 mAh
Tensão nominal	3,6 V
Tensão mínima de corte	2,5 V
Tensão máxima limitada	4,2 V
Corrente máxima de carga	4,0 A
Corrente máxima de descarga	20 A
Resistência interna inicial (mΩ)	~22,15 (CC) ~13,20 (AC)

Fonte: Roy e Khan (2020).

lítio no regulamento da Federação Internacional de Automobilismo (FIA) nas competições de karts elétricos é de 23 kg. Sendo assim, o arranjo total de células não deve passar de 511 células do tipo INR 18650-25R.

Outros sistemas a serem modelados são o conversor CC-CC, da saída da bateria para a alimentação do inversor do motor. Esse processo está relacionado diretamente com a quantidade de células já que o ganho de tensão possibilitaria a menor quantidade de células em série.

De acordo com a Tabela 3, a tensão nominal que deve alimentar o inversor deve ser de 475 V e considerando que a tensão mínima de corte da Tabela 4 é de 2,5 V, foi determinada um ganho de 6,4 para o conversor, permitindo uma configuração de 30 células em série.

Dessa maneira, como o máximo de células deve ser de 511 e são necessárias 30 células em série para alimentar o conversor CC-CC, o arranjo de ramos em paralelo de 30 células em série será de 17, resultando em um sistema 30s17p, totalizando o uso de 510 células de íons de lítio do tipo INR 18650-25R com massa total da bateria de 23 kg.

Além disso, será considerado o efeito de eficiência da conversão do inversor de 95% de acordo com Iannuzzi et al. (2018). Dessa maneira, a potência requerida pela simulação do motor deve ser considerada 5,26% maior do que a necessária.

O objetivo ao simular o kart elétrico é de que durante o evento treino (largada + 8 voltas) e corrida (largada + 14 voltas) a bateria fique entre 30% e 80%. Ou seja, ao iniciar a treino, a bateria deve apresentar estado de carga (SoC) de 80% e ao fim da corrida deve estar com mais de 30%, para garantir a utilização segura e otimizada das células de íons de lítio.

5.2 Modelagem Mecânica do Kart

A modelagem mecânica do kart consiste em levantar os parâmetros das Equações 2.12, 2.13 e 2.14 utilizados em karts por estudos já realizados, além da relação de aplicação entre esses parâmetros e equações com a aplicação de carga mecânica da biblioteca GEM, esse desenvolvimento pode ser visualizado no Apêndice E.

$$a = \frac{r_d \cdot M \cdot g}{I_g \cdot I_0 \cdot \eta} \cdot (R_r \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) \quad (5.1)$$

$$c = \frac{\rho \cdot A_f \cdot c_D \cdot r_d^3}{2 \cdot I_g^3 \cdot I_0^3 \cdot \eta} \quad (5.2)$$

$$J_{Total} = \frac{M \cdot r_d^2}{I_g^2 \cdot I_0^2 \cdot \eta} \quad (5.3)$$

A Tabela 5 representa os parâmetros mecânicos que serão utilizados para calcular os coeficientes das Equações E.5, E.7 e E.9. É importante considerar que a massa do kart de 156 kg inclui o piloto e todos os sistemas mecânicos e elétricos com exceção das baterias modeladas separadamente.

Tabela 5 – Parâmetros mecânicos do kart.

Parâmetro	Unidade	Valor
Massa do Kart	kg	156
Coefficiente de Arrasto(c_D)	-	0,75
Área Frontal(A_f)	m^2	0,65
Densidade do Ar(ρ)	kg/m^3	1,225
Raio da Roda(r_d)	m	0,14
Resistência ao Rolamento(R_r)	—	0,022
Eficiência da Taxa de Transmissão(η)	—	0,98

Fonte: Iannuzzi et al. (2018).

A Tabela 6 representa os resultados das substituições dos parâmetros mecânicos nos coeficientes de aplicação de carga mecânica estática da biblioteca GEM. Além disso, também foi calculada a taxa de transmissão considerando o produto $I_g \cdot I_0$ como sendo uma relação única I_g equivalente a 1,2 devido a velocidade de rotação da máquina e a velocidade máxima do kart elétrico desejada.

Tabela 6 – Resultado das substituições dos parâmetros mecânicos.

Parâmetro	Valor
a	4,58
c	0,00048
J_{Total}	2,48
$I_g \cdot I_0$	1,2

Fonte: Autoria própria.

De acordo com o funcionamento da biblioteca GEM, não é possível alterar os parâmetros dos coeficientes de carga mecânica durante a simulação, portanto seria necessário considerar um aclave constante, representando um gasto demasiado de potência, ou considerar um declive constante, com uma economia de potência constante. Para não diminuir ou aumentar a potência de maneira imprecisa, será considerado um ciclo de condução do ângulo de inclinação constante e igual a 0° , visando não prejudicar o estudo, porém, não simulando todas as possibilidades possíveis.

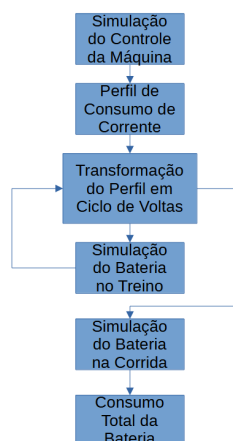
6 Resultados

Para as simulações da máquina PMSM e das células de lítio, foi criado um programa em *Python*. Com o andamento do desenvolvimento da monografia, ocorreram atualizações nas bibliotecas, ocasionando em uma quebra na biblioteca de máquinas elétricas. Apesar disso, foi possível realizar as simulações com a versão 2.0.0 já instalada no início do trabalho.

Além disso, como a simulação da máquina elétrica ocorre por um processo iterativo em um loop *for*, foi utilizada a biblioteca *tqdm*(TQDM, 2024). Essa biblioteca permite a criação de uma barra de progresso instantânea, facilitando a visualização do tempo atual e restante da simulação. Os códigos utilizados para simulação estão disponíveis nos Apêndices D e C, além disso, é possível acessar por Santi (2024) por meio do Github.

A Figura 29 representa um fluxograma do processo de simulação do kart elétrico. Inicialmente foi feita a simulação da máquina elétrica de acordo com a modelagem elétrica e mecânica do Capítulo 5 e o ciclo de condução do Capítulo 4, em seguida, é construído um perfil de consumo de corrente de acordo com o consumo de potência da simulação da máquina elétrica. Em seguida, é realizada a simulação da célula de lítio afim de analisar o SoC. O processo de criação do perfil do consumo de corrente se repete para o treino e para corrida.

Figura 29 – Fluxograma do processo de simulação.



Fonte: Autoria própria.

O processo de simulação pode se tornar um ciclo de simulações, já que ao modelar inicialmente uma quantidade de baterias que levam a uma carga mecânica na dinâmica e

como o objetivo de que o kart elétrico deve terminar o evento treino + corrida com bateria entre 30% e 80% o processo pode se repetir.

Sendo assim, ao simular inicialmente com 500 células de lítio, o resultado do SoC ao final da corrida pode levar a um novo dimensionamento da quantidade de células, podendo diminuir ou aumentar e ser necessário refazer a simulação de controle da máquina.

A seguir, serão demonstrados os resultados do controle da máquina PMSM, a primeira simulação do kart elétrico e a segunda simulação com um novo dimensionamento das células.

6.1 Controle

O controle de velocidade da máquina PMSM pela biblioteca GEM ocorre por meio de um controlador em cascata de velocidade e de correntes nas coordenada dq. Para isso são utilizadas algumas técnicas como MTPA. A Figura 18 representa a malha de controle de uma máquina PMSM na biblioteca GEM.

A Tabela 7 representa os parâmetros dos controladores PI de velocidade ω e correntes i_d e i_q . Esses parâmetros são aplicados aos controladores da Figura 18 permitindo o controle de velocidade necessário para a simulação do ciclo de condução.

Tabela 7 – Resultado das substituições dos parâmetros mecânicos.

Controlador	P	I
Controle de Velocidade	100	4,5
Controle de Corrente d	1,2	0,01
Controle de Corrente q	1,2	0,01

Fonte: Autoria própria.

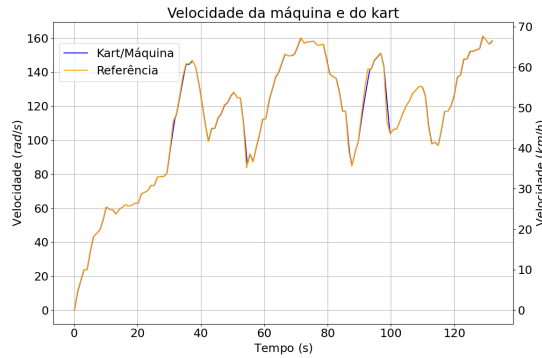
6.2 Primeira Simulação

A primeira simulação considera um conjunto de 510 células de lítio, totalizando uma massa de 23 kg em uma organização 30s17p. A seguir, as simulações para a carga dinâmica apresentada no Capítulo 5.2.

6.2.1 Simulação - Motor

A Figura 30 representa a velocidade da máquina PMSM e do kart elétrico durante o ciclo de condução do kart. Durante o ciclo de condução do kart elétrico, a máquina PMSM varia sua velocidade entre 0 e 1500 rpm, sua velocidade nominal. Mesmo com as condições de carga dinâmica aplicada a resposta da máquina segue a referência.

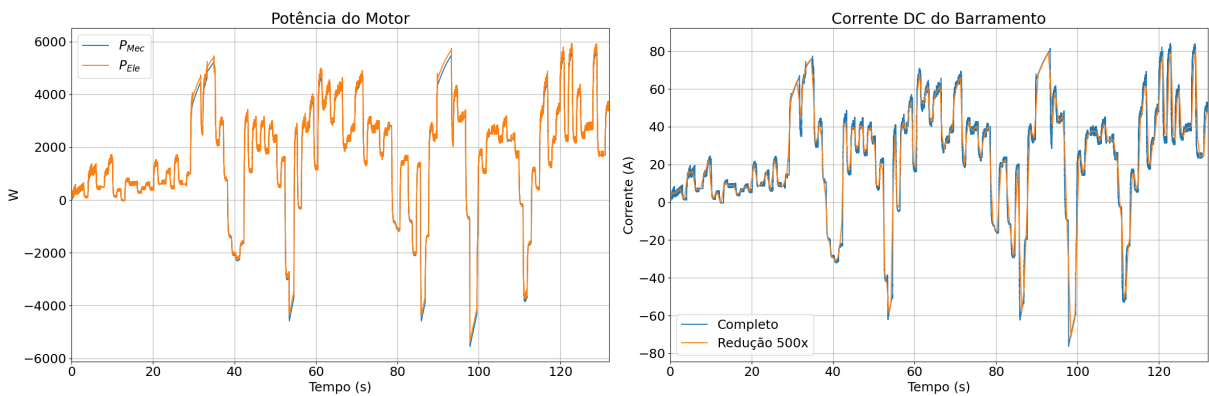
Figura 30 – Velocidade da máquina PMSM e do kart elétrico durante o ciclo de condução.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 31, em (a) representa a potência mecânica obtida pelo produto entre torque e velocidade da máquina e a potência elétrica obtida pela soma dos produtos entre correntes e tensão de cada fase. Em (b), a curva da corrente do barramento CC que foi obtida pela relação entre a potência elétrica e a tensão do barramento, além de considerar o efeito do conversor CC-CC de elevar o consumo de corrente em 6,4.

Figura 31 – Potência elétrica e mecânica da simulação da máquina PMSM durante ciclo de condução (a) e corrente do barramento CC durante ciclo de condução (b).



Fonte: Autoria própria.

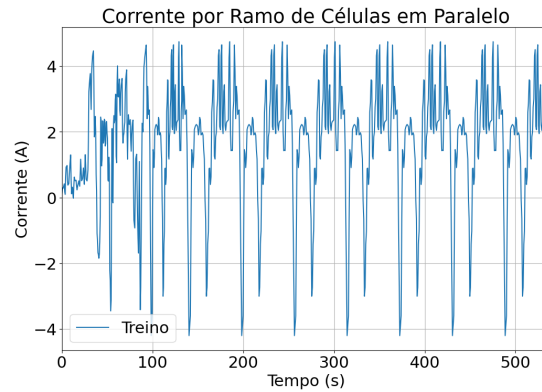
6.2.2 Simulação - Baterias

6.2.2.1 Treino

A Figura 32 representa a corrente por ramo da bateria durante o treino. Essa curva foi obtida a partir da concatenação da segunda volta da simulação da máquina elétrica com mais 8 voltas, criando o vetor de corrente para 9 voltas de treino. Para simular a

bateria foi considerado que a corrente do barramento CC se dividiria igualmente entre cada ramo de células, logo, foi dividida por 17.

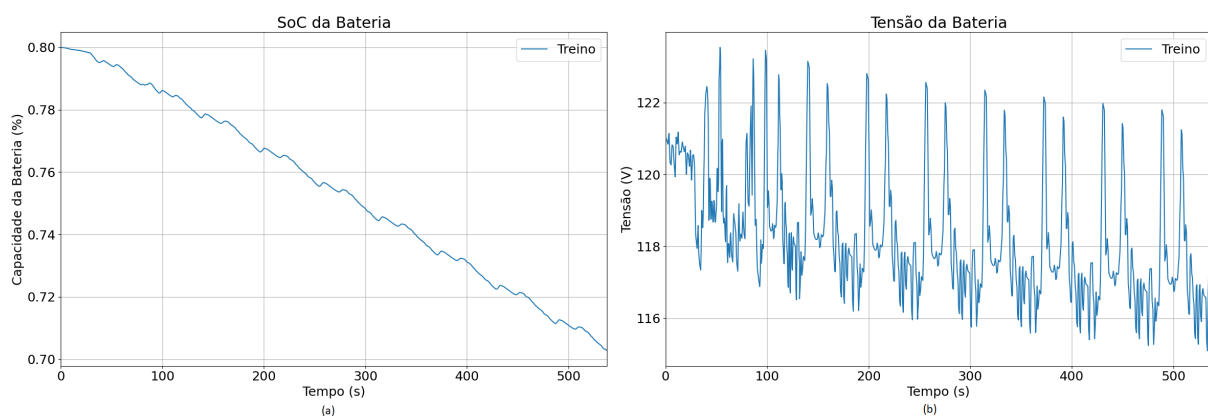
Figura 32 – Corrente por ramo de células da bateria com o total de 9 volts de treino.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 representa o estado de carga (SoC) da bateria ao fim do treino (a) e a tensão nos terminais da bateria durante o treino (b). No final do treino o SoC atingiu 70,4%. O conjunto de células que compõe a bateria possui 30 células em série, logo essa curva foi obtida pela tensão de uma única célula multiplicada por 30.

Figura 33 – Estado de carga (SoC) da bateria ao fim do treino (a) e Tensão da bateria durante as 9 voltas do treino (b).



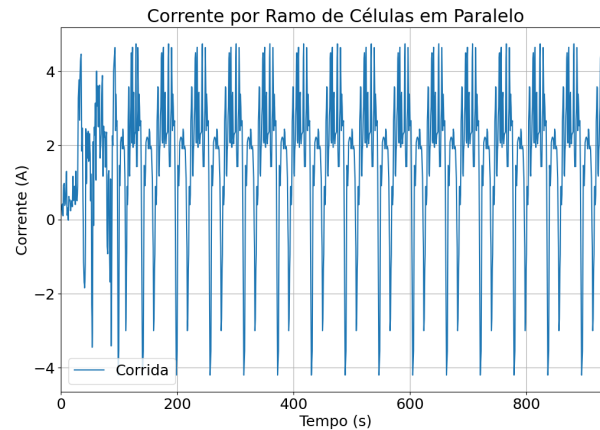
Fonte: Autoria própria.

6.2.2.2 Corrida

Foi repetido o mesmo processo de concatenação da segunda volta da simulação no GEM, porém, agora foram adicionadas 14 voltas rápidas para representação da corrida.

A Figura 34 representa a corrente por ramo de células da bateria para as 16 voltas de corrida.

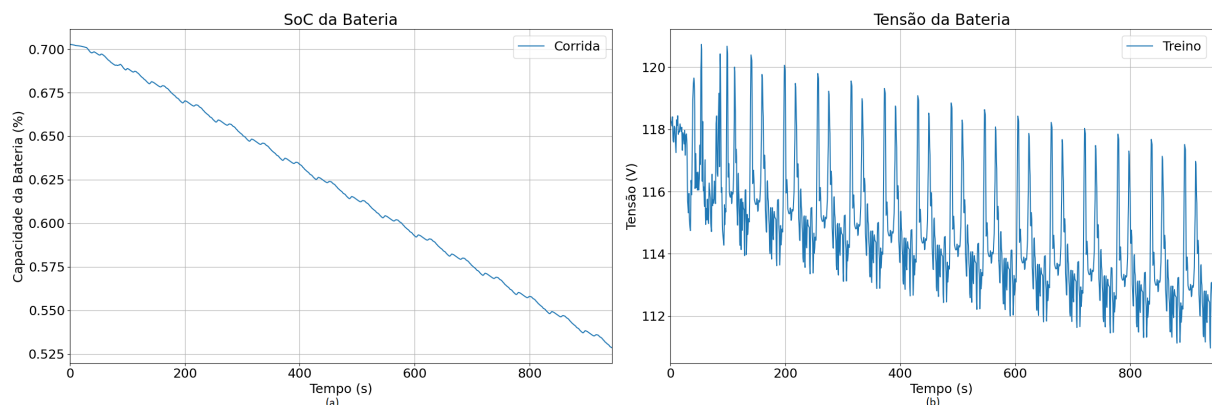
Figura 34 – Corrente por ramo de células da bateria com o total de 16 voltas de corrida.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 35 representa a tensão nos terminais da bateria durante a corrida. O método de obtenção da tensão nos terminais da bateria foi o mesmo do treino, multiplicando a tensão da célula por 30. O processo de treino levou a bateria a 70%, no fim da corrida o SoC da bateria foi de 45%.

Figura 35 – Estado de carga(SoC) da bateria ao fim da corrida (a) e tensão da bateria durante as 14 voltas da corrida (b).



Fonte: Autoria própria.

Como o objetivo era que ao fim do evento, treino e corrida, a bateria estivesse próxima dos 30%, é possível reduzir a quantidade de ramos células em paralelo.

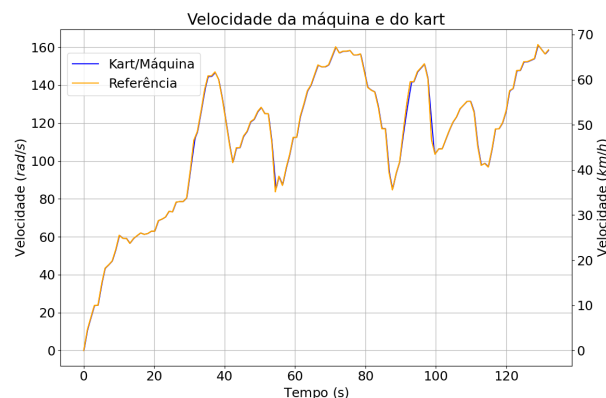
6.3 Segunda Simulação

Para reduzir a quantidade de células foi proposta uma nova composição para bateria com apenas 10 ramos de células em paralelo, alterando o sistema $30s17p$ para $30s10p$. Essa alteração levou a uma redução da massa das baterias de 41%, chegando a um total de 13,5 kg.

6.3.1 Simulação - Motor

A Figura 36 representa a velocidade da máquina PMSM e do kart elétrico durante o ciclo de condução do kart. Com a redução, foi possível aproximar a aceleração do kart elétrico com a referência, apesar de ainda não ser possível atingir exatamente a referência. Antes, o erro quadrático médio era de $2,02 \text{ rad}^2/\text{s}^2$, com o novo sistema é de $1,41 \text{ rad}^2/\text{s}^2$.

Figura 36 – Velocidade da máquina PMSM e do kart elétrico durante o ciclo de condução para nova massa de baterias.



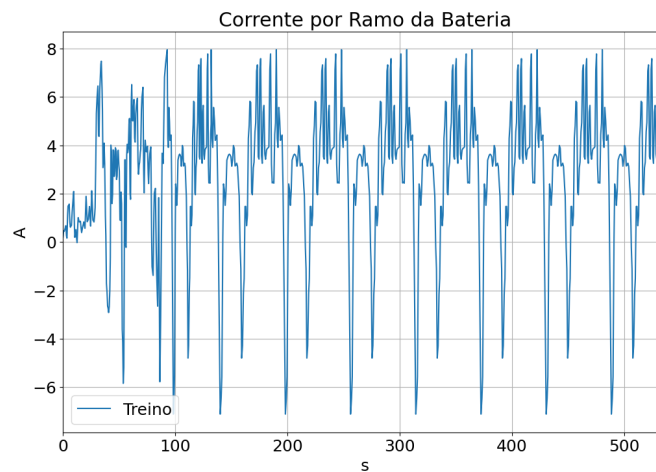
Fonte: Autoria própria.

6.3.2 Simulação - Baterias

6.3.2.1 Treino

Assim como foi feito na primeira simulação, foi feita a separação da segunda volta da simulação da máquina no GEM e a concatenação para representação do treino com mais 7 voltas além das 2 simuladas no GEM. A Figura 37 representa a corrente para cada ramo de células para a nova massa total de bateria durante as 9 voltas de treino. Além de que agora a corrente do barramento se divide entre 10 ramos e não mais em 17, levando a um aumento da corrente por ramo de célula.

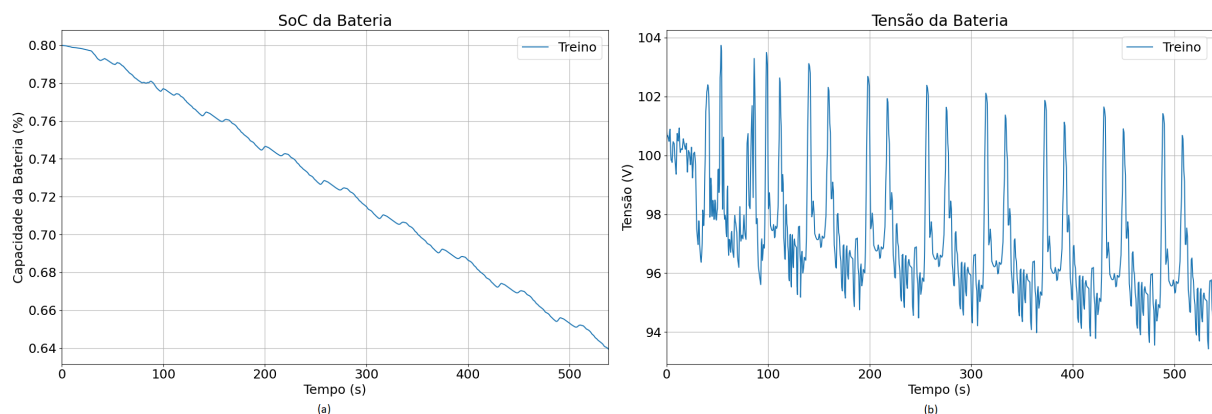
Figura 37 – Corrente por ramo de células da bateria com o total de 9 voltas de treino para nova massa de bateria para nova massa de bateria.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 38 representa a tensão nos terminais da bateria durante o treino. O método de obtenção da tensão nos terminais da bateria foi o mesmo da simulação 1. No final do treino, o SoC foi de 64%.

Figura 38 – Estado de carga da bateria (a) e tensão da bateria durante (b) durante as 9 voltas de treino para nova massa de bateria.

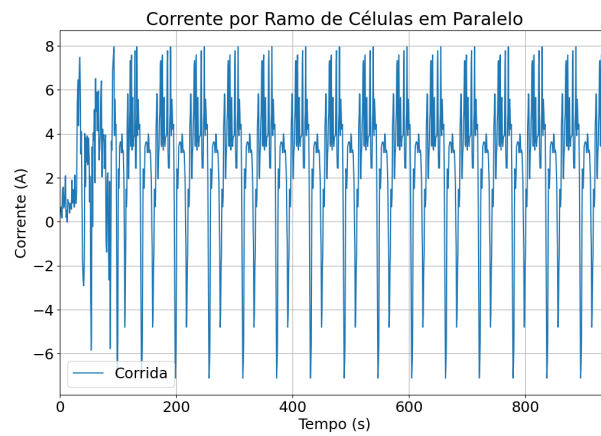


Fonte: Autoria própria.

6.3.2.2 Corrida

Utilizando o mesmo método de concatenação de voltas rápidas de acordo com a resposta da segunda volta da simulação da biblioteca GEM, porém, adicionando 14 voltas rápidas e dividindo a corrente do barramento por 10, é possível obter a Figura 39.

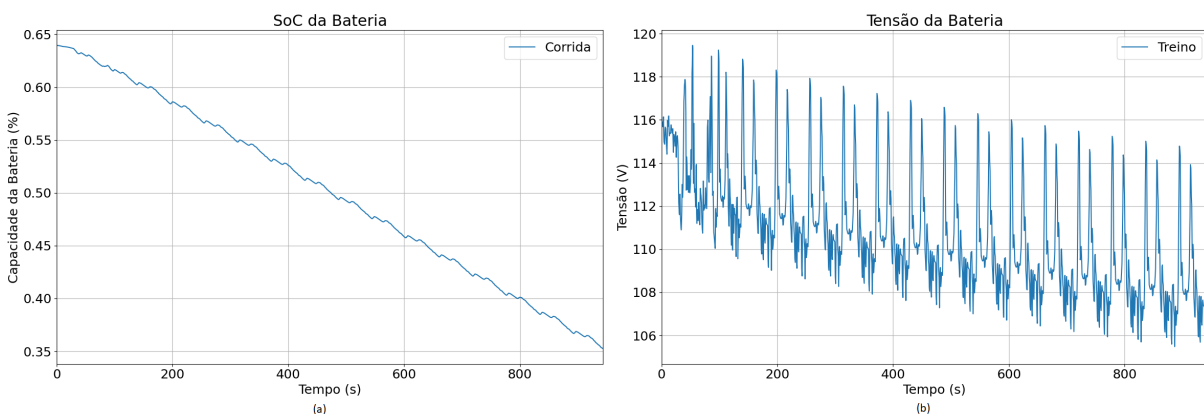
Figura 39 – Corrente por ramo de células da bateria com o total de 16 voltas de corrida para nova massa de bateria.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 40 representa o estado de carga (a) e a tensão dos terminais da bateria (b) durante a corrida. Apesar de alterar a quantidade de células, a relação de células em série não foi alterada, permitindo a utilização da tensão da célula e multiplicando por 25. Utilizando a nova configuração de bateria foi possível atingir o SoC de 35%.

Figura 40 – Estado de carga (a) e tensão da bateria com o total de 16 voltas de corrida para nova massa de bateria.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 8 representa uma visão geral dos resultados das simulações. Após a primeira simulação, o SoC da bateria foi de 52%. Como o objetivo era otimizar o sistema para que o evento treino e corrida ocorresse no intervalo de 30% a 80% foi necessário alterar a composição da bateria reduzindo os ramos de células em paralelo. Com a redução

foi possível reduzir o SoC ao fim da corrida a 35%, além de diminuir o erro quadrático médio entre a referência e a velocidade da máquina de de $2,02 \text{ rad}^2/\text{s}^2$, com o novo sistema é de $1,41 \text{ rad}^2/\text{s}^2$

Tabela 8 – Resultados das simulações.

Simulação	Bateria	Massa das Baterias	Erro Quadrático Médio	SoC ao fim do Treino	SoC ao fim da Corrida
Primeira	30s17p	23 kg	$2,02 \text{ rad}^2/\text{s}^2$	70,4 %	52 %
Segunda	30s10p	13,5 kg	$1,41 \text{ rad}^2/\text{s}^2$	64 %	35 %

Fonte: Autoria própria.

7 Considerações Finais

7.1 Conclusões

Com o estudo de caso de um kart elétrico, foi possível modelar os principais componentes elétricos de um VE e algumas considerações sobre a dinâmica de veículos. Dessa maneira, este trabalho teve sucesso em utilizar um ciclo de condução para simular uma máquina elétrica e uma bateria para alimentar o sistema.

As simulações mostraram o quanto é importante a modelagem do sistema para garantir que o ciclo de condução e as condições desejadas sejam atendidas. Sendo assim, apesar do objetivo ser de a bateria do kart suportar apenas um ciclo de treino e corrida, a modelagem poderia ter sido feita para mais ciclos, porém, a carga dinâmica deveria ser considerada já que a massa da bateria influencia bastante no consumo de energia do sistema.

Durante o desenvolvimento do trabalho, foi possível explorar diversas áreas do conhecimento. Dentre elas, a Engenharia Elétrica principalmente com os sistemas que englobam um VE, mas também a Engenharia Mecânica e a Física com a dinâmica do veículo, além da Química com o estudo dos diferentes tipos de células para baterias.

7.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

Apesar da dinâmica do veículo ter sido utilizada para as simulações da máquina elétrica, algumas hipóteses não foram utilizadas por falta de ferramentas. A dinâmica causada pela inclinação da pista não pode ser utilizada devido à impossibilidade de atualizar os parâmetros do ambiente de simulação durante simulação. Portanto, uma sugestão de trabalho futuro seria a implementação de uma nova função na biblioteca GEM, uma função que possibilite a atualização dos parâmetros com o decorrer da simulação.

Outra sugestão na biblioteca GEM, é a implementação de uma outra função que permita alterar as condições iniciais da máquina elétrica, isso porque, dependendo do tamanho de simulação desejada o tempo para realizar ela pode ser elevado, impossibilitando a utilização da ferramenta.

Já na simulação da bateria, existe outra biblioteca, a *lionpack* que foi desenvolvida pelos mesmos desenvolvedores da *PyBaMM*. No entanto, como não é possível manusear os dados das simulações, a sua utilização pode se tornar menos atrativa. Se for possível manusear os dados após as simulações e a biblioteca GEM permitir alterar as condições iniciais, é possível realizar as simulações sem precisar fazer hipóteses muito abrangentes,

permitindo uma melhor caracterização do sistema.

Referências

- AHMED, A. *Eletrônica de potência*. São Paulo: Pearson, 2000. E-book. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br>>. Citado na página 37.
- ALMATRAFI, L.; BADAAM, S.; QAISAR, S. M. Electric vehicle performance evaluation using udds, nycc and wltп drive cycles. In: *2023 20th Learning and Technology Conference (LT)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 103–108. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. d. V. *Introdução á Engenharia:conceitos, ferramentas e comportamentos*. 2. ed. São Paulo: Editora da UFSC, 2009. Citado na página 25.
- BCG, T. B. C. G. *Batteries for Electric Cars*. 2016. <<http://http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/enright1/docs/file36615.pdf>>. Acessado em: 2024-09-07. Citado na página 32.
- BOOK, F. et al. Gym-electric-motor (gem) control: An automated open-source controller design suite for drives. In: *2023 IEEE International Electric Machines Drives Conference (IEMDC)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.
- BROCKMAN, G. et al. *OpenAI Gym*. 2016. Citado na página 43.
- BRUCE, P. G. et al. Li-o₂ and li-s batteries with high energy storage. *Nature Materials*, v. 11, n. 1, p. 19–29, 2012. ISSN 1476-4660. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/nmat3191>>. Citado na página 31.
- CARMONA, F. P. et al. Simulation of a traction system in an electric vehicle. In: *2023 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. [S.l.: s.n.], 2023. v. 7, p. 1–6. Citado na página 41.
- CHAKKALAKKAL, S.; VIJAYAN, A. K.; NAHID-MOBARAKEH, B. Model predictive-position sensorless control of pmsm with non-sinusoidal back-emf. In: *2023 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–5. Citado na página 58.
- CHAN, C. C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 4, p. 704–718, 2007. Citado na página 29.
- CHAU, K. T.; CHAN, C. C.; LIU, C. *Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles*. 2008. 2246-2257 p. Citado na página 34.
- CHEN, C.-H. et al. Development of experimental techniques for parameterization of multi-scale lithium-ion battery models. *Journal of The Electrochemical Society*, IOP Publishing, v. 167, n. 8, p. 080534, may 2020. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/ab9050>>. Citado na página 50.
- DIXON, J. Energy storage for electric vehicles. In: *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 20–26. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

DOPPELBAUER, M. *The invention of the electric motor 1800-1854*. 2023. Online. Acesso em: 23 de setembro de 2024. Disponível em: <<https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>>. Citado na página 33.

DORRELL, D. G. et al. Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. In: *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 3352–3359. Citado na página 35.

DOYLE, M.; FULLER, T. F.; NEWMAN, J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell. *Journal of The Electrochemical Society*, The Electrochemical Society, Inc., v. 140, n. 6, p. 1526, jun 1993. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1149/1.2221597>>. Citado na página 32.

ECPA – Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo. *Pista de Kart*. 2024. Acesso em: 04 out. 2024. Disponível em: <<https://www.ecpa.com.br/capa.asp?s=servico&idservico=1066#!prettyPhoto>>. Citado na página 51.

ELETRODEX. *GY-NEO6MV2 - Módulo GPS com Antena*. Eletrodex, 2024. Acesso em: 07 out. 2024. Disponível em: <<https://www.eletrodex.net/placasmodulos/modulos/diversos/gy-neo6mv2-modulo-gps-com-antena>>. Citado na página 53.

FATIHI, M. Y. et al. Exploring the potential of 2d -sic7 monolayer as an anode material for li-ion batteries: Ab initio investigation. *Journal of Energy Storage*, v. 99, p. 113236, 2024. ISSN 2352-152X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X24028226>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

FULLER, T. F.; DOYLE, M.; NEWMAN, J. Simulation and optimization of the dual lithium ion insertion cell. *Journal of The Electrochemical Society*, The Electrochemical Society, Inc., v. 141, n. 1, p. 1, jan 1994. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1149/1.2054684>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

GOBBI, M. et al. Traction motors for electric vehicles: Maximization of mechanical efficiency – a review. *Applied Energy*, v. 357, p. 122496, 2024. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923018603>>. Citado 4 vezes nas páginas 33, 34, 35 e 36.

HEIDENREICH, B. et al. gym-electric-motor (gem): A python toolbox for the simulation of electric drive systems. *Journal of Open Source Software*, The Open Journal, v. 6, n. 58, p. 2498, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.21105/joss.02498>>. Citado na página 43.

IANNUZZI, D. et al. Design optimization of electric kart for racing sport application. In: *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 58, 59 e 60.

International Energy Agency. *Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles Roadmap*. 2023. Acesso em: 18 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/electric-and-plug-in-hybrid-electric-vehicles-roadmap>>. Citado na página 25.

- IRIMIA, C. et al. The modeling and simulation of an electric vehicle based on simcenter amesim platform. In: *2019 Electric Vehicles International Conference (EV)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- JBARI, H.; ASKOUR, R.; IDRISSE, B. B. Ev simulation model combining emr control and simscape multibody. In: *2023 IEEE PES/IAS PowerAfrica*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–5. Citado na página 26.
- JOHNSON, J. et al. Design, modeling and development of a go-kart vehicle. In: *2017 International Conference on Advances in Mechanical, Industrial, Automation and Management Systems (AMIAMS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 104–109. Citado na página 57.
- LEA Research Group. *Gym Electric Motor Documentation*. 2024. Acesso em: 01 out. 2024. Disponível em: <<https://upb-lea.github.io/gym-electric-motor/index.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- LI, W.; WANG, W.; QU, F. Study on accuracy improvement method of ev simulation model based on machine learning. In: *2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. [S.l.: s.n.], 2022. v. 10, p. 245–249. Citado na página 27.
- LUKIC, S. M. et al. Energy storage systems for automotive applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 6, p. 2258–2267, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- MALARSELVAM, V.; CARUNAISELVANE, C. Energy efficient analysis of electric vehicle motor under drive cycle influence. In: *2023 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6. Citado na página 25.
- N, S. S. et al. E-vehicle performance analysis using matlab advisor tool. In: *2023 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6. Citado na página 26.
- NAUMOVIC, T. et al. Development of a continuous system simulation engine in python programming language. In: *2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–5. Citado na página 27.
- PORRU, M. et al. Modelling and real-time simulations of electric propulsion systems. In: *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 40.
- RASHID, M. H. *Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações*. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014. E-book. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br>>. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 39.
- Raspberry Pi Foundation. *Raspberry Pi — Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi*. 2024. Acesso em: 07 out. 2024. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/>>. Citado na página 52.
- ROY, S.; KHAN, F. Detection of degraded/aged cell in a li-ion battery pack using spread spectrum time domain reflectometry (sstdr). In: *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1483–1488. Citado na página 59.

- Samsung SDI. *Datasheet - INR18650-25R Lithium-ion Cell*. 2024. Acesso em: 28 set. 2024. Disponível em: <<https://www.tme.com/Document/d5041798b41b6ad5e98cd9d1377d272d/INR18650-25R.pdf>>. Citado na página 58.
- SANTI, M. A. de. *GPSTracker-Accelerometer*. 2023. Acesso em: 04 out. 2024. Disponível em: <<https://github.com/mario-akira/GPSTracker-Accelerometer>>. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 54.
- SANTI, M. A. de. *Alternativa para Simulação de Veículos Elétricos*. 2024. Acesso em: 09 out. 2024. Disponível em: <<https://github.com/mario-akira/AlternativaparaSimulacaodeVeiculosEletricos>>. Citado na página 63.
- SANTOS, M. M. D. *Veículos Elétricos e Híbridos: Fundamentos, Características e Aplicações*. São Paulo: Érica, 2020. 288 p. ISBN 978-85-365-3281-3. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 41.
- SEVDARI, K.; MARINELLI, M.; PASTORELLI, F. Overview of ev battery types and degradation measurement for renault zoe nmc batteries. In: *2024 International Conference on Renewable Energies and Smart Technologies (REST)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- SRIPRANG, S. et al. Model-based and model-free of torque and speed controls for pma-synrm drive system. In: *2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–4. Citado na página 37.
- SULZER, V. et al. Python battery mathematical modelling (pybamm). *Journal of Open Research Software*, Jun 2021. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- TQDM. *tqdm: A Fast, Extensible Progress Bar for Python and CLI*. 2024. Acesso em: 07 out. 2024. Disponível em: <<https://github.com/tqdm/tqdm>>. Citado na página 63.
- u-blox. *NEO-6 series: u-blox 6 GPS modules*. [S.l.], 2011. Acesso em: 07 out. 2024. Disponível em: <https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf>. Citado na página 53.
- UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7^a. ed. [S.l.]: Amgh, 2014. ISBN 9788580553734. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.
- WANG, K.; LEE, F.; LAI, J. Operation principles of bi-directional full-bridge dc/dc converter with unified soft-switching scheme and soft-starting capability. In: *APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.00CH37058)*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 111–118 vol.1. Citado na página 38.
- YADAV, D. S.; MANISHA, M. Electric propulsion motors: A comparative review for electric and hybrid electric vehicles. In: *2022 IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–6. Citado na página 36.
- YAMAMOTO, K. et al. Bidirectional dc-dc converter with full-bridge / push-pull circuit for automobile electric power systems. In: *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–5. Citado na página 37.

Apêndices

APÊNDICE A – Código da Modelagem da Máquina Elétrica

Código A.1 – Código para modelagem da máquina elétrica

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 vetor = [
4     0, 4.524436000000000, 7.285768000000000,
5     9.991540000000000, 9.991540000000000,
6     14.584500000000000, 18.207012000000000, 18.951516000000000,
7     19.799732000000000, 22.249928000000000,
8     25.526116000000000, 24.837172000000000, 24.837172000000000,
9     23.716712000000000, 24.800132000000000,
10    25.424256000000000, 26.037268000000000, 25.716872000000000,
11    25.889108000000000, 26.422484000000000,
12    26.422484000000000, 28.756004000000000, 29.078252000000000,
13    29.528288000000000, 30.824688000000000,
14    30.698752000000000, 32.856332000000000, 32.987824000000000,
15    32.987824000000000, 33.804556000000000,
16    39.632799999999999, 46.531500000000000, 48.418687999999999,
17    52.724588000000000, 57.582384000000000,
18    60.838200000000000, 60.838200000000000, 61.729012000000000,
19    60.125180000000000, 56.074856000000000,
20    51.191131999999999, 45.988864000000000, 41.644072000000000,
21    44.942484000000000, 44.942484000000000,
22    47.501948000000000, 48.513140000000000, 50.692944000000000,
23    51.237432000000000, 52.954236000000000,
24    53.887644000000000, 52.485680000000000, 52.485680000000000,
25    46.253700000000000, 35.158368000000000,
26    38.621608000000000, 36.569592000000000, 40.312484000000000,
27    43.270128000000000, 47.218592000000000,
28    47.218592000000000, 51.837480000000000, 54.474728000000000,
29    57.523120000000000, 58.747292000000000,
30    61.019696000000000, 63.268024000000000, 62.860584000000000,
31    62.860584000000000, 63.284692000000000,
32    65.244108000000000, 67.292420000000000, 65.929347999999999,
33    66.321972000000000
34 ]
35
36 vetor_2 = [
37     66.321972000000000, 66.488652000000000, 65.494128000000000,
38     65.494128000000000,

```

```

23         65.7330360000000, 62.1012639999999, 58.3028120000000,
57.6842440000000,
24         57.2953240000000, 54.0339520000000, 49.1483760000000,
49.1483760000000,
25         39.6235400000000, 35.5750680000000, 39.1383160000000,
41.6922240000000,
26         48.2520080000000, 54.5080640000000, 59.5455040000000,
59.5455040000000,
27         61.7604960000000, 62.5994520000000, 63.5254520000000,
60.2011120000000,
28         46.7037360000000, 43.4868120000000, 44.6498680000000,
44.6498680000000,
29         46.7167000000000, 48.7353800000000, 50.5281160000000,
51.6689480000000,
30         53.5209480000000, 54.3376800000000, 55.2099720000000,
55.2099720000000,
31         52.8283000000000, 45.4073360000000, 41.0273560000000,
41.4422040000000,
32         40.6365840000000, 44.3646600000000, 49.0872600000000,
49.0872600000000,
33         50.3818080000000, 52.9634960000000, 57.5620120000000,
58.0509400000000,
34         62.0475560000000, 62.0568160000000, 63.9921560000000,
63.9921560000000,
35         64.3292200000000, 64.6699880000000, 67.7813480000000,
66.6960760000000,
36         65.7108120000000, 66.6201440000000
37     ]
38
39 # Preparacao dos dados do Ciclo de conducao
40 perfil = vetor + vetor_2
41 perfil = np.array(perfil)/3.6
42 tamanho_teste = len(perfil)
43 tempo = np.linspace(0, tamanho_teste - 1, tamanho_teste)
44
45 # Dados do ve culo
46 M = 156+23 # massa, em kg
47 d = 1.0
48 rd = 0.14# raio da roda, em m
49 alfa = 0# ngulo de inclina o da pista
50
51 # For a de atrito
52 g = 9.81 # accelera o da gravidade, em m/s
53 fr = 0.0022 # Coeficiente de atrito, adimensional
54
55
56 k = 1.2 #Transmiss o

```

```
57 n_trans = 0.98#Efici ncia transmiss o
58 n_motor = 0.95#Efici ncia Maquina
59 n_control = 0.95#Efici ncia Eletrica do sistema do kart
60
61 # For a de arrasto
62 rho = 1.225 # Densidade do ar
63 Af = 0.65 # rea frontal, em m
64 Cd = 0.75 # coeficiente aerodin mico, adimensional
65
66 # C lculo das For as
67 derivada = np.zeros_like(perfil)
68 derivada[1:] = np.diff(perfil) / np.diff(tempo)
69
70 Fa = 0.5 * rho * Af * Cd * perfil**2
71 Fr = M * g * fr * np.cos(alfa)
72 Fg = M * g * np.sin(alfa)
73 Fres = M * d * derivada
74 Ft = Fres + Fr + Fa + Fg
75
76 # C lculo das Pot ncias
77 Pmec = Ft * perfil
78 Pel = Pmec / (n_trans * n_motor * n_control)
79
80 torque = Pel / (perfil* (k/(rd)))
```

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – Código da Plataforma de Aquisição do Ciclo de Condução

Código B.1 – Código para aquisição dos dados de telemetria

```

1 import serial                #importou o pacote serial
2 from time import sleep, strftime
3 import csv
4 from gpiozero import RGBLED
5 from mpu6050 import mpu6050
6
7 # Definiu as portas do LED RGB
8 led = RGBLED(red=22, green=27, blue=17)
9
10 # Definiu a porta do sensor de aceler metro
11 sensor = mpu6050(0x68)
12
13 def GPS_Info():
14     global NMEA_buff
15     global lat_in_degrees
16     global long_in_degrees
17     global vel_in_kmh
18     nmea_time = []
19     nmea_latitude = []
20     nmea_longitude = []
21     nmea_vel = []
22     nmea_time = NMEA_buff[0]                # extraiu o hor rio da
string GPGGA
23     nmea_latitude = NMEA_buff[2]           # extraiu a latitude da
string GPGGA
24     nmea_longitude = NMEA_buff[4]         # extraiu a longitude da
string GPGGA
25     nmea_vel = NMEA_buff[6]               # extraiu a velocidade
da string GPGGA
26
27     # Verificou os sinais N/S e L/O
28     nmea_sinal_lat = NMEA_buff[3]         # extraiu o sinal de
latitude da string GPGGA
29     nmea_sinal_lon = NMEA_buff[5]         # extraiu o sinal de
longitude da string GPGGA
30
31
32     lat = float(nmea_latitude)            # converteu a string de
latitude para float para o c lculo

```

```

33     longi = float(nmea_longitude)           # converteu a string de
longitude para float para o c lculo
34     vel = float(nmea_vel)                 # converteu a string de
velocidade para float para o c lculo
35
36     if (nmea_sinal_lat == "S" or nmea_sinal_lat == "s"):
37         lat = (-1)*lat
38     if (nmea_sinal_lon == "W" or nmea_sinal_lon == "w"):
39         longi = (-1)*longi
40
41     lat_in_degrees = convert_to_degrees(lat) # obteve a latitude no
formato decimal de graus
42     long_in_degrees = convert_to_degrees(longi) # obteve a longitude no
formato decimal de graus
43     vel_in_kmh = 1.852*vel                 # converteu a velocidade
para km/h
44
45
46
47 # Converteu a string NMEA bruta para o formato decimal de graus
48 def convert_to_degrees(raw_value):
49     decimal_value = raw_value/100.00
50     degrees = int(decimal_value)
51     mm_mmmm = (decimal_value - int(decimal_value))/0.6
52     position = degrees + mm_mmmm
53     position = "%.6f" %(position)
54     led.color = (0, 0, 1)                 # ajustou a cor do LED
para azul
55     return position
56
57
58 # Definiu a comunica o com o sensor GPS
59 gpgga_info = "$GPRMC,"
60 ser = serial.Serial ("/dev/ttyAMA0") # abriu a porta com a taxa de
transmiss o
61 GPGGA_buffer = 0
62 NMEA_buff = 0
63 lat_in_degrees = 0
64 long_in_degrees = 0
65 vel_in_kmh = 0
66
67 while True:
68     # GPS
69     received_data = (str)(ser.readline()) # leu a
string NMEA recebida
70     GPGGA_data_available = received_data.find(gpgga_info) # verificou
se h string NMEA GPGGA

```

```
71
72     # Aceler metro
73     ac_data = sensor.get_accel_data(g = True)
74     recieve_ac = (str)(ac_data)
75     recieve_ac = recieve_ac.translate({ord(i): None for i in "'x': yz}"
76     }) # removeu os s mbolos desnecess rios
77     ac_buffer = (recieve_ac.split(',')) # vetoriza a string Gx=[0], Gy
78     =[1], Gz=[2]
79
80     if (GPGGA_data_available > 0):
81         GPGGA_buffer = received_data.split("$GPRMC,",1)[1] # armazenou
82         os dados ap s a string "$GPGGA"
83         NMEA_buff = (GPGGA_buffer.split(',')) # armazenou
84         os dados separados por v rgula no buffer
85         GPS_Info() # obteve o
86         hor rio , latitude , longitude
87
88         # Imprimiu os resultados
89         print("lat in degrees:", lat_in_degrees, " long in degree: ",
90         long_in_degrees, '\n', " velocity in kmh: ", vel_in_kmh, '\n')
91         print ("Gx: ", ac_buffer[0], "Gy: ", ac_buffer[1], "Gz: ",
92         ac_buffer[2], '\n')
93
94         # Abriu o arquivo CSV para gravar os dados
95         f = open('Data_Race.csv', 'a', newline='')
96         thewriter = csv.writer(f, delimiter = '\t')
97         led.color = (0, 1, 0) # ajustou a cor do LED para verde
98         thewriter.writerow([lat_in_degrees, long_in_degrees, vel_in_kmh,
99         strftime("%H:%M:%S"), ac_buffer[0],
100         ac_buffer[1], ac_buffer[2]])
```

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – Código de Simulação da Bateria

Código C.1 – Código de simulação da bateria do kart elétrico

```

1 import liionpack as lp
2 import pybamm
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy as np
5
6 model = pybamm.lithium_ion.DFN()
7
8 parameter_values = pybamm.ParameterValues("Chen2020")
9
10 parameter_values.update(
11     {"Number of cells connected in series to make a battery": 1})# 25
12 parameter_values.update(
13     {"Number of electrodes connected in parallel to make a cell": 1})#
14     30
15 parameter_values.update(
16     {"Open-circuit voltage at 0% SOC [V]": 2.5})
17 parameter_values.update(
18     {"Open-circuit voltage at 100% SOC [V]": 4.2})
19 parameter_values.update(
20     {"Nominal cell capacity [A.h]": 2.5})
21 parameter_values.update(
22     {"Current function [A]": Total_Corrida/12})# 20 ou 12
23 # drive_cycle_power = np.column_stack([reduced_timer, reduced_vector])
24 # drive_cycle_power = np.column_stack([tempo_corrida, Corrida])
25 drive_cycle_power = np.column_stack([Total_tempo, Total_Corrida_R])
26 experiment = pybamm.Experiment([pybamm.step.current(drive_cycle_power)],
27     period="0.5 second")# Para 100x 0.1     para 1000x 1     para 500x 0.5
28
29 fast_solver = pybamm.CasadiSolver(atol=1e-4, rtol=1e-5, mode="fast")
30
31 sim = pybamm.Simulation(model, experiment=experiment, parameter_values=
32     parameter_values, solver = fast_solver)#, output_variables=
33     output_variables)
34
35 sim.solve(initial_soc=SoC_final_Treino)#SoC_final)
36
37 solution = sim.solution

```

```
37 Corrente_Celula_Treino = solution['Current [A]'].entries
38 Capacidade_Treino = solution['Discharge capacity [A.h]'].entries
39 Tensao_Celula_Treino = solution['Voltage [V]'].entries
40 t_Treino = solution["Time [s]"].entries
```

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE D – Código de Simulação da Máquina PMSM do Kart Elétrico

Código D.1 – Código de Simulação da Máquina PMSM do Kart Elétrico

```

1 from classic_controllers import Controller
2 from externally_referenced_state_plot import
   ExternallyReferencedStatePlot
3 import gym_electric_motor as gem
4 from gym_electric_motor.visualization import MotorDashboard
5 from gym_electric_motor.physical_systems import ContB6BridgeConverter
6 from gym_electric_motor.physical_systems import ScipyOdeSolver
7
8 import numpy as np
9 import matplotlib.pyplot as plt
10 import time
11 from tqdm import tqdm
12
13 if __name__ == '__main__':
14
15     motor_type = 'PMSM'
16     control_type = 'SC'
17     action_type = 'Cont'
18
19     env_id = action_type + '-' + control_type + '-' + motor_type + '-v0'
20
21     # Parametros da Maquina PMSM
22     omega_limit = 1.5e3
23     torque_limite = 46
24     corrente_limite = 85
25     tensao_barramento = 470
26     limit_values = dict(omega=omega_limit * np.pi / 30, torque=
torque_limite, i=corrente_limite, u=tensao_barramento)
27     nominal_values = dict(omega=omega_limit * np.pi / 30, torque=
torque_limite, i=corrente_limite, epsilon=np.pi, u=tensao_barramento)
28     motor_parameter = dict(p=4, l_d=3e-3, l_q=3e-3, j_rotor=0.003, r_s
=0.05, psi_p=0.125)
29
30     # Definicao dos parametro para plot automatico
31     states = ['omega', 'torque', 'i_a', 'i_b', 'i_c', 'u_b', 'u_a', 'u_c
']
32     external_ref_plots = [ExternallyReferencedStatePlot(state) for state
in ['omega']]
33

```

```

34 # Parametros Dinamicos do Kart
35 M = 156+13.5# Massa do sistema kart+piloto 22.5kg de inicio
posteriormente 13.5kg
36 g = 9.81# Aceleracao da Gravidade
37 fr = 2.2e-2# Coeficiente de Resistencia do Rolamento
38 angulo_alpha = np.radians(0)# Angulo de acliave
39 eta_t = 0.98# Rendimento Transmissao
40
41 ro = 1.225#Densidade do Ar
42 A_f = 0.65#Area frontal
43 c_D = 0.75#Coeficiente de arrasto
44 r_d = 0.14#Raio das rodas
45
46 # Calculo da Relacao de Velocidade de acordo com os 62km/h ou 17.4
m/s
47 i_g = (omega_limit * np.pi * r_d) / (30 * 18.9)
48 i_g = round(i_g, 1)
49
50 # Com Carga na Simulacao - Dinamica do Kart
51 a_torque = r_d*M * g * (fr * np.cos(angulo_alpha) + np.sin(
angulo_alpha))/(i_g * eta_t)
52 b_torque = 0
53 c_torque = (0.5 * ro * A_f * c_D * (r_d**3))/(eta_t * i_g**3)
54 j_torque = (M*r_d**2)/(eta_t * i_g**2)
55
56 # Inicializacao e criacao do ambiente de simulacao
57 env = gem.make(env_id, visualization=MotorDashboard(additional_plots
=external_ref_plots),
58             motor=dict(limit_values=limit_values,
59                       nominal_values=nominal_values,
60                       motor_parameter=motor_parameter
61             ),
62             render_mode = 'figure_once',
63             load=gem.physical_systems.PolynomialStaticLoad(dict(a
= a_torque, b = b_torque, c = c_torque, j_load=j_torque)),
64             supply = dict(u_nominal=tensao_barramento),
65             converter = ContB6BridgeConverter(),
66             tau=10e-4)
67
68 tau = env.physical_system.tau
69 limits = env.physical_system.limits
70
71 # Parametros do Controlador em Cascata de Velocidade e Corrente dq
72 current_d_controller = {'controller_type': 'pi_controller', 'p_gain'
: 1.2, 'i_gain': 0.01}
73 current_q_controller = {'controller_type': 'pi_controller', 'p_gain'
: 1.2, 'i_gain': 0.01}

```

```
74     speed_controller = {'controller_type': 'pi_controller', 'p_gain':  
100, 'i_gain': 4.5}  
75  
76     current_controller = [current_d_controller, current_q_controller]  
77     overlaid_controller = [speed_controller]  
78  
79     stages = [current_controller, overlaid_controller]  
80  
81     # Criacao do controlador  
82     controller = Controller.make(env, stages=stages, external_ref_plots=  
external_ref_plots, torque_control='analytical')  
83  
84     (state, reference), _ = env.reset()  
85  
86     # Prepara o da Referencia de Velocidade  
87     vetor = [  
88         0, 4.524436000000000, 7.285768000000000,  
9.991540000000000, 9.991540000000000,  
89         14.584500000000000, 18.207012000000000, 18.951516000000000,  
19.799732000000000, 22.249928000000000,  
90         25.526116000000000, 24.837172000000000, 24.837172000000000,  
23.716712000000000, 24.800132000000000,  
91         25.424256000000000, 26.037268000000000, 25.716872000000000,  
25.889108000000000, 26.422484000000000,  
92         26.422484000000000, 28.756004000000000, 29.078252000000000,  
29.528288000000000, 30.824688000000000,  
93         30.698752000000000, 32.856332000000000, 32.987824000000000,  
32.987824000000000, 33.804556000000000,  
94         39.632799999999999, 46.531500000000000, 48.418687999999999,  
52.724588000000000, 57.582384000000000,  
95         60.838200000000000, 60.838200000000000, 61.729012000000000,  
60.125180000000000, 56.074856000000000,  
96         51.191131999999999, 45.988864000000000, 41.644072000000000,  
44.942484000000000, 44.942484000000000,  
97         47.501948000000000, 48.513140000000000, 50.692944000000000,  
51.237432000000000, 52.954236000000000,  
98         53.887644000000000, 52.485680000000000, 52.485680000000000,  
46.253700000000000, 35.158368000000000,  
99         38.621608000000000, 36.569592000000000, 40.312484000000000,  
43.270128000000000, 47.218592000000000,  
100         47.218592000000000, 51.837480000000000, 54.474728000000000,  
57.523120000000000, 58.747292000000000,  
101         61.019696000000000, 63.268024000000000, 62.860584000000000,  
62.860584000000000, 63.284692000000000,  
102         65.244108000000000, 67.292420000000000, 65.929347999999999,  
66.321972000000000  
103     ]
```

```

104
105     vetor_2 = [
106         66.3219720000000, 66.4886520000000, 65.4941280000000,
107         65.4941280000000,
108         65.7330360000000, 62.1012639999999, 58.3028120000000,
109         57.6842440000000,
110         57.2953240000000, 54.0339520000000, 49.1483760000000,
111         49.1483760000000,
112         39.6235400000000, 35.5750680000000, 39.1383160000000,
113         41.6922240000000,
114         48.2520080000000, 54.5080640000000, 59.5455040000000,
115         59.5455040000000,
116         61.7604960000000, 62.5994520000000, 63.5254520000000,
117         60.2011120000000,
118         46.7037360000000, 43.4868120000000, 44.6498680000000,
119         44.6498680000000,
120         46.7167000000000, 48.7353800000000, 50.5281160000000,
121         51.6689480000000,
122         53.5209480000000, 54.3376800000000, 55.2099720000000,
123         55.2099720000000,
124         52.8283000000000, 45.4073360000000, 41.0273560000000,
125         41.4422040000000,
126         40.6365840000000, 44.3646600000000, 49.0872600000000,
127         49.0872600000000,
128         50.3818080000000, 52.9634960000000, 57.5620120000000,
129         58.0509400000000,
130         62.0475560000000, 62.0568160000000, 63.9921560000000,
131         63.9921560000000,
132         64.3292200000000, 64.6699880000000, 67.7813480000000,
133         66.6960760000000,
134         65.7108120000000, 66.6201440000000
135     ]
136
137     # Preparacao dos dados do Ciclo de conducao
138     teste = vetor + vetor_2
139     time_horizon = len(teste)
140     vetor = teste[:time_horizon+1]
141     vetor_arredondado = [round(num, 2) for num in vetor]
142     t = np.linspace(0, time_horizon, time_horizon)
143     t_maior = np.linspace(0, time_horizon, time_horizon*1000+1)
144     velocidade_nova = np.interp(t_maior, t, vetor_arredondado)
145
146     # Definicao do Tempo Total de Simulacao
147     step_horizon = int(time_horizon / tau)
148
149     STATE = np.transpose(np.array([state[0]*limits]))
150     TIME = np.array([0])

```

```

137
138     # Preparacao de Variaveis de Referencia
139     referencia = np.zeros(step_horizon + 1)
140     referencia = velocidade_nova
141     referencia = referencia * (i_g/(3.6*r_d))
142     referencia = referencia / (omega_limit * np.pi / 30)
143
144     # Criando um vetor para corrente de barramento CC
145     i_sup = np.zeros(step_horizon + 1)
146
147     with tqdm(total=step_horizon, desc="Processo da Simula o", unit="
it", ncols=100, bar_format="{l_bar}{bar}| {n_fmt}/{total_fmt} [{
elapsed}<{remaining}, {rate_fmt}]") as pbar:
148         for i in range(step_horizon):
149             time = i * tau
150             reference = referencia[i]
151
152             action = controller.control(state, [reference])
153             (state, reference), reward, terminated, truncated, _ = env.
step(action)
154
155             STATE = np.append(STATE, np.transpose([state * limits]),
axis=1)
156             TIME = np.append(TIME, time)
157             pbar.update(1)
158
159             i_a_teste = np.array(STATE[2,i])
160             i_b_teste = np.array(STATE[3,i])
161             i_c_teste = np.array(STATE[4,i])
162             i_sup[i] = env.physical_system.converter.i_sup([i_a_teste,
i_b_teste,i_c_teste])
163
164             if terminated:
165                 env.reset()
166                 controller.reset()
167                 break
168         env.close()
169 # STATE[0]: omega (Velocidade Angular Mecanica)
170 # STATE[1]: T (Torque)
171 # STATE[2] - STATE[4]: i_sa, i_sb, i_sc (Correntes de Fase do Estator)
172 # STATE[5] - STATE[6]: i_sd, i_sq (Correntes de Estator em dq)
173 # STATE[7] - STATE[9]: u_sa, u_sb, u_sc (Tensoes de Fase do Estator)
174 # STATE[10] - STATE[11]: u_sd, u_sq (Tensoes de Fase do Estator em dq)
175 # STATE[12]: epsilon (Posicao Angular do Rotor)
176 # STATE[13]: u_sup (Tensao do Barramento CC)

```


APÊNDICE E – Desenvolvimento de Equações Dinâmicas

Para aplicar a dinâmica do kart a biblioteca GEM é necessário retornar a Equação 2.15 e substituindo as Equações 2.12, 2.13 e 2.14, é possível determinar a Equação E.1 considerando a velocidade do vento nula em condição ideal.

$$F_R = \left[R_r \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) + M \cdot g \cdot \sin(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot c_D \cdot (V_{kart})^2 \right] \quad (E.1)$$

Substituindo a Equação E.1 na Equação 2.11 e aplicando a regra de conversão de força em torque da Equação 2.19 é obtida a Equação E.2.

$$M \cdot \frac{dV_{kart}}{dt} \cdot r_d = T_T - \left[M \cdot g \cdot (R_r \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot c_D \cdot (V_{kart})^2 \right] \cdot r_d \quad (E.2)$$

Utilizando a Equação 2.16 para converter o torque das rodas da Equação E.2 no torque do motor pela relação de transmissão da Equação E.3.

$$\frac{M \cdot r_d}{I_g \cdot I_0 \cdot \eta} \cdot \frac{dV_{kart}}{dt} = T_M - \frac{r_d}{I_g \cdot I_0 \cdot \eta} \cdot \left[M \cdot g \cdot (R_r \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot c_D \cdot (V_{kart})^2 \right] \quad (E.3)$$

A partir da Equação 2.18, é possível substituir a velocidade do kart da Equação E.3 e transforma-la na velocidade da máquina, de acordo com a Equação E.4.

$$\frac{M \cdot r_d^2}{I_g^2 \cdot I_0^2 \cdot \eta} \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_M - \left[\frac{r_d \cdot M \cdot g}{I_g \cdot I_0 \cdot \eta} \cdot (R_r \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) + \frac{\rho \cdot A_f \cdot c_D \cdot r_d^3}{2 \cdot I_g^3 \cdot I_0^3 \cdot \eta} \cdot (\omega_m)^2 \right] \quad (E.4)$$

Comparando a Equação E.4 com a Equação 3.1, é possível fazer a correlação entre o modelo dinâmico e o método de aplicação de carga estática da biblioteca GEM. O momento de inércia total será representado pela Equação E.5.

$$J_{Total} = \frac{M \cdot r_d^2}{I_g^2 \cdot I_0^2 \cdot \eta} \quad (E.5)$$

O torque da carga (T_L) mecânica resultante da dinâmica do kart é dado pela Equação E.6.

$$T_L = \left[\frac{r_d \cdot M \cdot g}{I_g \cdot I_0 \cdot \eta} \cdot (R_r \cdot \cos(\alpha) + \text{sen}(\alpha)) + \frac{\rho \cdot A_f \cdot c_D \cdot r_d^3}{2 \cdot I_g^3 \cdot I_0^3 \cdot \eta} \cdot (\omega_m)^2 \right] \quad (\text{E.6})$$

Comparando a Equação E.6 com a Equação 3.2 é possível determinar os parâmetros a, b e c. A Equação E.7 representa o parâmetro a que é independente da velocidade do motor.

$$a = \frac{r_d \cdot M \cdot g}{I_g \cdot I_0 \cdot \eta} \cdot (R_r \cdot \cos(\alpha) + \text{sen}(\alpha)) \quad (\text{E.7})$$

Como nessa modelagem não existe nenhum parâmetro dependente da velocidade do motor em grau 1, o valor do parâmetro b equivale a Equação E.8.

$$b = 0 \quad (\text{E.8})$$

Por fim o parâmetro c, dependente da velocidade do motor em grau 2, é dado pela Equação E.2.

$$c = \frac{\rho \cdot A_f \cdot c_D \cdot r_d^3}{2 \cdot I_g^3 \cdot I_0^3 \cdot \eta} \quad (\text{E.9})$$