

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LUIZ ANTÔNIO PERUCHI GUIDARINI**

**ANÁLISE COMPARATIVA COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL ENTRE  
SISTEMAS POWERTRAIN CC E CA DE UM KART ELÉTRICO**

**JOINVILLE**

**2025**

**LUIZ ANTÔNIO PERUCHI GUIDARINI**

**ANÁLISE COMPARATIVA COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL ENTRE  
SISTEMAS POWERTRAIN CC E CA DE UM KART ELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao  
Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro  
de Ciências Tecnológicas da Universidade do  
Estado de Santa Catarina, para a obtenção do  
Grau de Engenheiro Eletricista

Orientador: Joselito Anastácio Heerd

**JOINVILLE**

**2025**

**LUIZ ANTÔNIO PERUCHI GUIDARINI**

**ANÁLISE COMPARATIVA COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL ENTRE  
SISTEMAS POWERTRAIN CC E CA DE UM KART ELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao  
Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro  
de Ciências Tecnológicas da Universidade do  
Estado de Santa Catarina, para a obtenção do  
Grau de Engenheiro Eletricista

Orientador: Joselito Anastácio Heerd

**BANCA EXAMINADORA:**

**Presidente:**

Prof. Dr. Joselito Anastácio Heerd  
UDESC

**Membros:**

Prof. Dr. Sergio Vidal Garcia Oliveira  
UDESC

Prof. Dr. Felipe Joel Zimann  
UDESC

Joinville, 10 de dezembro de 2025

Dedico à minha mãe, Daniela, que sempre me mostrou a importância da educação e me apoiou com amor e força em todos os momentos, independentemente das circunstâncias.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu professor orientador, Joselito, pelos ensinamentos transmitidos ao longo do trabalho e pelo aprendizado proporcionado durante todo o processo, que foram fundamentais para minha formação acadêmica.

À minha namorada, Dellayne, pela compreensão nos momentos difíceis e pelo apoio constante, mesmo nos períodos de maior dedicação ao projeto.

À minha família, especialmente à minha mãe, Daniela, pelo apoio incondicional e por sempre acreditar em mim, mesmo nos momentos de incerteza. E ao meu irmão, Christopher, que sempre foi um combustível para que eu continuasse seguindo em frente.

Sou também grato ao projetos de ensino VELLEVA, e em especial aos membros Pedro e Marcos que auxiliaram na conclusão deste trabalho. Agradeço também aos projetos de extensão GERM e EFORCE, este último pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho, e ao outro por agregar muito à minha formação técnica e pessoal, proporcionando experiências enriquecedoras fora da sala de aula.

Por fim, agradeço aos amigos que fiz ao longo da graduação, pelos momentos compartilhados, pelo companheirismo e pelas ajudas valiosas em diversas fases dessa jornada.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta o estudo e a comparação entre dois sistemas *powertrain* aplicados a um veículo elétrico leve do tipo kart, desenvolvido pelo projeto universitário VELLEVE da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). O estudo envolveu a modelagem matemática, simulação computacional no software PSIM e a validação experimental com dados obtidos em pista. O sistema original, baseado em motor de corrente contínua (CC) de ímãs permanentes e conversor CC-CC bidirecional, foi comparado a uma proposta nacional composta por motor de indução trifásico (CA) e inversor de frequência variável do fabricante WEG. As simulações foram conduzidas utilizando sinais de referência derivados de trajetórias reais, representando o comportamento dinâmico do veículo. Observou-se que o sistema CA apresentou desempenho superior em termos de potência disponível, evidenciando maior capacidade de resposta. Por outro lado, o *powertrain* CC apresentou menor consumo energético e maior simplicidade de montagem, além de apresentar um desempenho condizente as faixas de operação típicas do kart. De forma qualitativa, conclui-se que o sistema CA oferece melhor capacidade de entrega de potência, enquanto o sistema CC se mostra mais eficiente e energeticamente econômico. O estudo fornece subsídios técnicos para futuras atualizações do veículo, indicando caminhos para a nacionalização e aprimoramento dos sistemas de tração elétrica leve.

**Palavras-chave:** Kart Elétrico. Tração elétrica. Simulação de tração elétrica. WEG WTE300.

## ABSTRACT

This study presents the analysis and comparison between two powertrain systems applied to a light electric vehicle, a kart, developed by the VELLEVA university project at the State University of Santa Catarina (UDESC). The study involved mathematical modeling, computer simulation using the PSIM software, and experimental validation with data obtained on the track. The original system, based on a permanent magnet direct current (DC) motor and a bidirectional converter, was compared to a national proposal consisting of a three-phase induction motor (AC) and a frequency inverter from the manufacturer WEG. The simulations were conducted using reference signals derived from real trajectories, representing the dynamic behavior of the vehicle. It was observed that the AC system showed superior performance in terms of available power, demonstrating greater responsiveness. On the other hand, the DC powertrain exhibited lower energy consumption and greater assembly simplicity, in addition to presenting satisfactory efficiency in the kart's typical operating ranges. Qualitatively, it is concluded that the AC system offers a better power delivery capability, while the DC system proves to be more efficient and energetically economical. The study provides technical support for future vehicle upgrades, indicating pathways for the nationalization and improvement of light electric traction systems.

**Keywords:** Electric Kart. Electric traction. Electric traction simulation. WEG WTE300.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Atual kart elétrico da equipe VELLEVA. . . . .	21
Figura 2 – Diagrama de blocos de um veículo elétrico. . . . .	22
Figura 3 – Diagrama das forças atuantes em um veículo em movimento. . . . .	23
Figura 4 – Arrasto aerodinâmico em veículos. . . . .	25
Figura 5 – Resistência a rolamento dos pneus. . . . .	26
Figura 6 – Modelo de transmissão e acoplamento do Kart. . . . .	29
Figura 7 – Modelo de transmissão do Kart. . . . .	30
Figura 8 – Bloco <i>PSIM</i> <sup>®</sup> de torque controlado externamente. . . . .	33
Figura 9 – Sinal de torque externo para o carga. . . . .	33
Figura 10 – Representação da força de arrasto aerodinâmico no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	34
Figura 11 – Representação da força de resistência a aceleração no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	34
Figura 12 – Representação da força de resistência a rolamento no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	34
Figura 13 – Introdução dos parâmetros do Kart no <i>OptimumLap</i> , aba <i>Vehicle Setup</i> . . . . .	35
Figura 14 – Exemplo da tela <i>Engine Data</i> durante a simulação do <i>powertrain CC</i> . . . . .	35
Figura 15 – Exemplo de sinal de velocidade do motor no <i>OptimumLap</i> . . . . .	36
Figura 16 – Motor CC de Imãs Permanentes (PMDC). . . . .	37
Figura 17 – Motor PMDC <i>ME0909</i> . . . . .	37
Figura 18 – Curvas de desempenho do motor <i>ME0909</i> fornecidas pelo fabricante Motor Energy. . . . .	38
Figura 19 – Resistência média medida a 4 Fios. . . . .	39
Figura 20 – Esquemático elaborado para ensaio da indutância de armadura do motor. . . . .	40
Figura 21 – Queda da corrente com a desenergização do motor travado. . . . .	41
Figura 22 – Bloco do motor de corrente contínua no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	42
Figura 23 – Parâmetros da máquina de corrente contínua no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	42
Figura 24 – Circuito de potência do conversor bidirecional em corrente. . . . .	43
Figura 25 – Diagrama $V \times I$ das regiões de operação. . . . .	43
Figura 26 – Fluxo bidirecional de energia entre fonte e motor. . . . .	44
Figura 27 – Conversor eletrônico <i>Kelly 48401</i> . . . . .	45
Figura 28 – Circuito de potência do conversor no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	46
Figura 29 – Circuito de comando do conversor no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	46
Figura 30 – Sinal da portadora na porta inversora e sinal resultante do modulador por largura de pulso ( <i>PWM</i> ). . . . .	47
Figura 31 – Baterias <i>Moura</i> de chumbo-ácido do e-Kart. . . . .	48
Figura 32 – Circuito equivalente das baterias de Chumbo. . . . .	48
Figura 33 – Simulação da bateria de chumbo. . . . .	49
Figura 34 – Modelo de resistência $r_1$ baseado na Equação 39. . . . .	50
Figura 35 – Modelo de resistência $r_2$ baseado na Equação 40. . . . .	50

Figura 36 – Placa de desenvolvimento <i>Arduino Uno</i> . . . . .	51
Figura 37 – Sensor hall LA 200P da <i>LEM</i> . . . . .	52
Figura 38 – Circuito <i>buffer</i> para condicionamento de sinal de corrente. . . . .	53
Figura 39 – Circuito subtrator para condicionamento de sinal de corrente. . . . .	53
Figura 40 – Interpretação da leitura de corrente no conversor analógico digital. . . . .	54
Figura 41 – Circuito subtrator para condicionamento de sinal de tensão. . . . .	54
Figura 42 – Esquemático do projeto da placa eletrônica. . . . .	55
Figura 43 – <i>Layout</i> do projeto da placa eletrônica. . . . .	55
Figura 44 – Visualização 3D do projeto da placa eletrônica. . . . .	56
Figura 45 – Módulo de gravação em cartão de memória. . . . .	56
Figura 46 – Placa de medição desenvolvida embarcada no kart. . . . .	57
Figura 47 – Trajeto executado na pista do Kartódromo. . . . .	57
Figura 48 – Aba de inserção dos dados de distância da pista no <i>OptimumLap</i> . . . . .	58
Figura 49 – Dados coletados na planilha do <i>Google Sheets</i> . . . . .	59
Figura 50 – Sinal de referência obtido por meio da medição. . . . .	60
Figura 51 – Sinal de referência adicionado no bloco <i>lookup table</i> . . . . .	60
Figura 52 – Modelo de simulação do <i>powertrain CC</i> no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	61
Figura 53 – Corrente do motor no tempo. . . . .	61
Figura 54 – Tensão média do motor no tempo. . . . .	62
Figura 55 – Variação da potência instantânea do motor em relação ao tempo. . . . .	62
Figura 56 – Variação do torque instantâneo do motor em relação ao tempo. . . . .	63
Figura 57 – Variação de rotação do motor em relação ao tempo. . . . .	63
Figura 58 – Comparação dos resultados simulados e medidos de corrente no motor na primeira volta. . . . .	64
Figura 59 – Comparação dos resultados simulados e medidos de tensão no motor na primeira volta. . . . .	64
Figura 60 – Resultados simulados e medidos de potência na primeira volta. . . . .	65
Figura 61 – Resultados simulados e medidos de torque no motor na primeira volta. . . . .	65
Figura 62 – Resultados simulados e calculados de rotação no motor na primeira volta. . . . .	66
Figura 63 – Velocidade do Kart simulada e calculada em função de corrente na primeira volta. . . . .	66
Figura 64 – Motor CA de indução magnética. . . . .	68
Figura 65 – Circuito equivalente 'T' de motor de indução para regime permanente. . . . .	69
Figura 66 – Separação da resistência rotórica. . . . .	69
Figura 67 – Motor Indução para Tração Elétrica WEG WTE300 . . . . .	70
Figura 68 – Bloco motor de indução com rotor em gaiola de esquilo no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	71
Figura 69 – Parâmetros do bloco de motor de indução com rotor em gaiola de esquilo no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	71
Figura 70 – Inversor <i>CVW300</i> do conjunto de tração elétrica <i>WEG</i> . . . . .	73

Figura 71 – Modo de operação do Inversor. . . . .	73
Figura 72 – Modulação por largura de pulso senoidal no comando do inversor. . . . .	74
Figura 73 – Agrupamento dos <i>subcircuits</i> que controlam a saída do inversor. . . . .	74
Figura 74 – Bloco de tratamento do sinal de entrada. . . . .	75
Figura 75 – Bloco comparador para comando. . . . .	76
Figura 76 – Bloco do sistema do inversor. . . . .	76
Figura 77 – Dados do sistema CC e CA inseridos na aba <i>vehicle setup</i> . . . . .	78
Figura 78 – Sinal de velocidade com desempenho otimizado simulado no <i>software</i> . . . . .	78
Figura 79 – Referência de velocidade para o <i>powertrain</i> CA. . . . .	79
Figura 80 – Referência de velocidade para o <i>powertrain</i> CC. . . . .	79
Figura 81 – Simulação do <i>powertrain</i> CA. . . . .	80
Figura 82 – Corrente na fonte de entrada do sistema CA. . . . .	80
Figura 83 – Corrente instantânea máxima em uma fase atingida pelo motor na partida. . . . .	81
Figura 84 – Corrente instantânea em uma fase durante todo o percurso. . . . .	81
Figura 85 – Potência instantânea do motor durante todo o percurso. . . . .	82
Figura 86 – Torque instantâneo do motor durante todo o percurso. . . . .	82
Figura 87 – Rotação instantânea do motor durante todo o percurso. . . . .	83
Figura 88 – Velocidade em km/h do kart durante o percurso. . . . .	83
Figura 89 – Desempenho de tempo de cada sistema ao longo do percurso na pista do KIJ. . . . .	84
Figura 90 – Potência nos sistemas CC e CA durante o percurso. . . . .	84
Figura 91 – Torque nos sistemas CC e CA durante o percurso. . . . .	85
Figura 92 – Comparação entre as correntes no motor de cada <i>powertrain</i> . . . . .	85
Figura 93 – Comparação da rotação em cada um dos motores. . . . .	86
Figura 94 – Velocidade do kart em cada <i>powertrain</i> . . . . .	86
Figura 95 – Aceleração realizada por cada <i>powertrain</i> . . . . .	87
Figura 96 – Distância percorrida por cada <i>powertrain</i> . . . . .	87
Figura 97 – Bloco <i>lookup table</i> usado para simular a corrente do sistema. . . . .	88
Figura 98 – Corrente drenada da bateria de chumbo vista no bloco <i>lookup table</i> . . . . .	89
Figura 99 – Tensão e estado de carga da bateria para o sistema CA. . . . .	89
Figura 100 – Tensão e estado de carga da bateria para o sistema CC. . . . .	90

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de eficiência no sistema. . . . .	30
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de dados construtivos do veículo e-Kart com o powertrain atual. . . .	22
Tabela 2 – Estimativa das condições ambientes no KIJ. . . . .	23
Tabela 3 – Tabela de dados do motor ME0909. . . . .	38
Tabela 4 – Valores de resistência por posição do rotor. . . . .	39
Tabela 5 – Tabela de dados do motor ME0909. . . . .	41
Tabela 6 – Tabela de dados do conversor. . . . .	45
Tabela 7 – Comparação da constante de torque do motor CC. . . . .	63
Tabela 8 – Comparação das grandezas medidas e simulada. . . . .	67
Tabela 9 – Tabela de dados do motor WTE300. . . . .	70
Tabela 10 – Valores das variáveis de placa ou normalizadas do motor. . . . .	72
Tabela 11 – Parâmetros estimados pelo algoritmo de estimação. . . . .	72
Tabela 12 – Tabela de dados construtivos do veículo e-Kart com o powertrain CA. . . .	77
Tabela 13 – Resumo dos aspectos de autonomia de cada um dos sistemas de <i>powertrain</i> . . . .	90
Tabela 14 – Comparação de desempenho entre os sistemas de <i>powertrain</i> . . . . .	91

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital ( <i>Analog-to-Digital Converter</i> )
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor ( <i>Metal Oxide Field Effect Transistor</i> )
PSIM	Software de simulação eletrônica
PWM	Modulação por Largura de Pulso ( <i>Pulse Width Modulation</i> )
RPM	Rotações por Minuto
SOC	Estado de Carga ( <i>State of Charge</i> )
SPWM	Modulação por Largura de Pulso Senoidal ( <i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i> )
THD	Taxa de Distorção Harmônica
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
VELLEV	Veículos Elétricos Leves

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{max}$	Área frontal máxima do veículo
$a_{kart}$	Aceleração do kart
$C_{af}$	Coefficiente de área frontal
$C_a$	Coefficiente de arrasto do ar
$C_d$	Coefficiente de downforce
$C_1$	Capacitância do Ramo Principal da Bateria
$C_r$	Coefficiente de rolamento
$D_1$	Diodo Bypass da Bateria
$E$	Energia gasta pelo sistema
$E_m$	Tensão de Circuito Aberto da Bateria
$F_d$	Força de arrasto aerodinâmico
$F_f$	Força de resistência à rolamento
$F_s$	Força de inclinação
$F_{it}$	Força de resistência à aceleração linear
$f_s$	Frequência de Chaveamento do Conversor
$g$	Aceleração da gravidade
$h_k$	Altura do kart
$I_{conv}$	Corrente de Operação do Conversor
$I_{nom}$	Corrente nominal do motor
$i_g$	Relação de transmissão
$i_o$	Relação do diferencial
$J_m$	Momento de Inércia do Motor
$k_t$	Constante de Torque do Motor
$L_a$	Indutância de armadura do motor
$l_k$	Largura do kart
$m_k$	Massa total kart
$m_r$	Massa das rodas
$m_{bat}$	Massa das baterias
$m_{mot}$	Massa do motor
$m_{pil}$	Massa do piloto

$P$	Potência ativa
$P_{3\phi}$	Potência trifásica do motor
$R$	Raio das rodas
$R_a$	Resistência de armadura do motor
$R_o$	Resistência dos terminais da Bateria
$r_1$	Resistência do Ramo Principal da Bateria
$r_2$	Resistência Interna da Bateria
$r_{maior}$	Raio da engrenagem maior
$r_{menor}$	Raio da engrenagem menor
$S$	Potência aparente do sistema
$s$	Escorregamento do motor
$T_m$	Torque do motor
$V_{conv}$	Tensão de Operação do Conversor
$V_l$	Tensão de linha do motor
$v_k$	Velocidade do veículo
$v_w$	Velocidade do vento
$X_1/X_2$	Relação de reatância
$\alpha$	Inclinação da pista
$\delta$	Coefficiente que representa as massas em rotação no domínio da translação
$\delta_1$	Coefficiente do momento de inércia da transmissão para as rodas
$\delta_2$	Coefficiente referente ao momento de inércia do motor referido nas rodas
$\eta$	Eficiência geral do sistema
$\eta_{acop}$	Eficiência da Transmissão
$\eta_{bat}$	Eficiência da Bateria
$\eta_{conv}$	Eficiência do Conversor
$\eta_{mot}$	Eficiência do Motor
$\rho$	Densidade relativa do ar
$\tau_e$	Constante de tempo elétrica
$\omega_{eixo}$	Velocidade angular do eixo
$\omega_m$	Velocidade angular do motor
$\omega_n$	Rotação nominal do motor

$\omega_r$	Velocidade do rotor
$\omega_s$	Velocidade síncrona

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	A IMPORTÂNCIA HISTÓRICA E CULTURAL DOS KARTS	18
1.2	MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES	19
1.3	OBJETIVOS GERAIS	19
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
<b>2</b>	<b>DESEMPENHO E MODELAGEM DE CARGA DO E-KART</b>	<b>21</b>
2.1	ASPECTOS GERAIS DE CONSTRUÇÃO	21
2.2	CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS E DE AMBIENTE	22
2.3	DINÂMICA VEÍCULAR DO E-KART	23
2.3.1	FORÇA DE RESISTÊNCIA A ACELERAÇÃO	24
2.3.2	FORÇA DE ARRASTO AERODINÂMICO	25
2.3.3	FORÇA DE INCLINAÇÃO	26
2.3.4	FORÇA DE RESISTÊNCIA A ROLAMENTO	26
2.3.5	CONSIDERAÇÕES DA CARGA	27
2.3.6	POTÊNCIA, TORQUE E VELOCIDADE	27
2.3.7	EFICIÊNCIA, ENERGIA E FATOR DE POTÊNCIA	30
2.3.8	AUTONOMIA E ESTADO DE CARGA	32
2.3.9	MODELO DE CARGA - <i>PSIM</i> <sup>®</sup>	33
2.3.10	OPTIMUM LAP	35
<b>3</b>	<b>SISTEMA <i>POWERTRAIN</i> CC DO E-KART VELLEV</b>	<b>37</b>
3.1	MOTOR ELÉTRICO: ME0909 PMDC	37
3.1.1	ENSAIOS REALIZADOS NO MOTOR CC	39
3.1.2	SIMULAÇÃO DO MOTOR <i>ME0909</i>	42
3.2	CONVERSOR <i>BUCK</i> BIDIRECIONAL EM CORRENTE	43
3.2.1	SIMULAÇÃO DO <i>KELLY KDZ CONVERTER</i>	46
3.3	FONTE DE ENERGIA: BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO	48
3.3.1	MODELO DE SIMULAÇÃO - BATERIA 12V	49
<b>4</b>	<b>VALIDAÇÃO DA CARGA SIMULADA</b>	<b>51</b>
4.1	SISTEMA DE SENSORIAMENTO	51
4.1.1	SENSORES UTILIZADOS	52
4.1.2	CONDICIONAMENTO DOS SINAIS	52
4.1.3	INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	56
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS	57
4.2.1	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	58
4.2.2	DEFINIÇÃO DO SINAL DE ROTAÇÃO COMO REFERÊNCIA	59
4.2.3	SIMULAÇÃO DO KART NO <i>PSIM</i> <sup>®</sup>	61

4.2.4	COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS . . . . .	64
4.3	OBSERVAÇÕES GERAIS DO POWERTRAIN EXISTENTE . . . . .	67
5	SISTEMA <i>POWERTRAIN</i> NACIONAL WEG . . . . .	68
5.1	MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO TRIFÁSICO . . . . .	68
5.1.1	SIMULAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO WTE300 . . . . .	71
5.2	INVERSOR TRIFÁSICO COM MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO	73
5.2.1	MODELO DE SIMULAÇÃO - INVERSOR CVW300 . . . . .	74
5.3	CONSIDERAÇÕES GERAIS DO SISTEMA CA . . . . .	77
5.4	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS <i>POWERTRAINS</i> CC E CA . . . . .	78
5.4.1	SIMULAÇÃO DO KART COM <i>POWERTRAIN</i> CA . . . . .	80
5.4.2	COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO COM O <i>POWERTRAIN</i> CC . . . . .	84
5.4.3	DESEMPENHO EM AUTONOMIA DOS SISTEMAS CC E CA . . . . .	88
6	AVALIAÇÃO GERAL DOS SISTEMAS . . . . .	91
6.1	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	92
	REFERÊNCIAS . . . . .	93
	APÊNDICE A – CÓDIGO EM C++ PARA LEITURA E GRAVAÇÃO DA PLACA DE MEDIÇÃO . . . . .	96
	APÊNDICE B – <i>SCRIPT</i> DO ALGORITMO PARA ESTIMAR PARÂ- METROS INTERNOS DO MOTOR DE INDUÇÃO NO MATLAB . . . . .	99

# 1 INTRODUÇÃO

Nesta seção são apresentados o contexto, as motivações e objetivos deste trabalho, além de apresentar de forma clara a estrutura geral e escopo de cada capítulo.

## 1.1 A IMPORTÂNCIA HISTÓRICA E CULTURAL DOS KARTS

A importância histórica dos karts dentro do contexto mundial está relacionado a atividades de lazer de militares americanos após o conflito da segunda guerra. No Brasil, o nome kart ganhou popularidade em meados da década de 70, apesar da primeira corrida oficial ter sido 10 anos antes. Ainda que marginalizado, pela baixa complexidade dos modelos, e sendo inclusive visto como atividade perturbadora devido ao barulho feito pelos motores, as pistas de corrida surgiram e passaram a investir na atividade visto o sucesso que fez em outros países, pois era um investimento barato e de manutenção pouco dispendiosa (Barreto, 2006).

Foi então em 1990 que houve a popularização dos karts *Indoor* na região de São Paulo, espalhando-se rapidamente para todo o Brasil. A potência era reduzida, mas ainda permitia uma diversão e o sentimento de corrida para o público. Desde então muitos locais passaram a recepcionar pistas, como shoppings e estacionamento, divulgando amplamente a modalidade. Assim como a moda *Indoor* durou por anos, atualmente há em praticamente toda região do Brasil uma pista *Outdoor* próximo a centros urbanos, demonstrando a popularidade e o reconhecimento dessa categoria (Black, 2021).

Quanto a relevância cultural, pode-se dizer que o kart é o jardim da infância dos pilotos. Os primeiros passos na carreira de um piloto profissional, muitas vezes acontecem nos karts, exemplos famosos como Ayrton Senna e Nelson Piquet fazem parte dessa estatística. O piloto ainda que criança está exposto a um baixo risco em relação a sua segurança e isso permite a imersão neste universo já pequeno e graças à influência desses grandes nomes, o automobilismo se consolidou como um dos esportes mais admirados no Brasil. Para muitos deles, o ponto de partida na trajetória de um piloto está justamente nos autódromos de kart, onde se dá o primeiro contato prático com a velocidade e a competição, sendo um elemento fundamental na formação de um piloto completo e competitivo (Black, 2021).

No contexto acadêmico, grupos universitários têm se destacado com propostas inovadoras de eletrificação que contribuem para o avanço científico no desenvolvimento de karts e veículos semelhantes, oferecendo uma excelente oportunidade para divulgar as vantagens dos veículos elétricos frente aos modelos movidos a combustíveis fósseis.

O objeto de estudo deste trabalho, um kart elétrico desenvolvido pelo projeto de ensino *Veículos Elétricos Leves* (VELLEV) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), torna mais acessível a compreensão dos benefícios associados à mobilidade elétrica, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, maior eficiência energética, menor custo operacional e menor nível de ruído. Essa visibilidade prática pode influenciar positivamente a percepção sobre o uso de tecnologias sustentáveis, além de fomentar o interesse de futuros

profissionais pela área de eletrificação veicular.

## 1.2 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÕES

Considerando a relevância cultural e econômica do kart para a sociedade, aliada ao crescente interesse acadêmico e pessoal por veículos elétricos, este trabalho tem como principal motivação contribuir com o desenvolvimento do projeto de e-kart do grupo universitário VELLEVO. A proposta consiste em realizar um estudo comparativo entre o sistema atualmente disponível, composto por um trem de força, comumente chamado pelo termo em inglês *powertrain*, de origem estrangeira, em relação a um sistema comercializado no Brasil, atualmente o único disponível no mercado nacional.

As contribuições desse estudo visam fomentar o desenvolvimento acadêmico e tecnológico dentro do ambiente universitário, por meio da aplicação prática de ferramentas de engenharia, sendo possível citar, entre elas:

- A apresentação de uma metodologia de comparação entre dois *powertrains* aplicados a um mesmo modelo de kart;
- A identificação das vantagens e limitações de cada sistema, considerando critérios como eficiência, desempenho, disponibilidade e adequação ao contexto do projeto;
- O fornecimento de subsídios técnicos para futuras atualizações do veículo, favorecendo a tomada de decisão quanto à adoção de novas tecnologias;
- Disponibilizar uma ferramenta e metodologia para estimação do desempenho do e-Kart na pista, tais como capacidade de aceleração, velocidade final e autonomia;

## 1.3 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver a modelagem do sistema eletromecânico do kart existente utilizando o software *PSIM*<sup>®</sup> e validar o modelo com medições práticas realizadas durante um percurso proposto para o veículo. Estando o modelo validado, analisar e comparar diretamente os diferentes sistemas de *powertrain* e propor as devidas adequações ou melhorias para cada sistema.

## 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver o modelo de simulação do veículo no software *PSIM*<sup>®</sup> com base em modelos matemáticos da literatura consultada.
- Desenvolver o sistema de medição e coleta de dados integrado do veículo para obtenção das grandezas elétricas primárias do sistema.

- Validar o comportamento dinâmico do sistema simulado comparando-o com os dados práticos coletados durante um percurso;
- Analisar a viabilidade técnica e comparativa entre o *powertrain* de origem estrangeira e o sistema nacional proposto, considerando critérios de desempenho, disponibilidade e aplicabilidade ao projeto do e-kart.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é organizado em seis capítulos, os quais estão estruturados de acordo com a descrição abaixo:

- **Capítulo 1:** Contextualização histórica, motivações e objetivos;
- **Capítulo 2:** Apresenta os fundamentos teóricos dos conceitos abordados ao longo do trabalho, incluindo princípios de tração elétrica e dinâmica veicular;
- **Capítulo 3:** Descreve o sistema atual do kart elétrico, a obtenção das características dos seus componentes, as curvas de desempenho e o modelo de simulação;
- **Capítulo 4:** Apresenta o projeto do sistema de medição utilizado, os resultados coletados e a análise de validação da simulação;
- **Capítulo 5:** Descreve o sistema nacional proposto para o kart elétrico e apresenta a simulação do sistema novo;
- **Capítulo 6:** Análise comparativa dos *powertrains*, considerações finais e sugestões para trabalhos futuros;

## 2 DESEMPENHO E MODELAGEM DE CARGA DO E-KART

Os principais fundamentos e equações de representação de um veículo elétrico, utilizados neste trabalho, para fundamentar o projeto existente do e-kart do projeto VELLEV e a proposta do novo sistema são vistas principalmente em Ehsani et al. (2004) e Gillespie (1992).

A mesma abordagem também é seguida em Ferronato (2019), Rodrigues (2017), que seguem como referência o trabalho realizado por Tanaka (2013).

### 2.1 ASPECTOS GERAIS DE CONSTRUÇÃO

O sistema elétrico principal do e-kart é formado pelo conjunto de quatro baterias chumbo-ácidas, conversor de acionamento bidirecional CC-CC e motor elétrico. O conversor é controlado por um acelerador eletrônico e o conjunto é interligado por chaves, botoeiras e relés, além disso possui um sistema de interface para o piloto com LEDs e display e sensores espalhados no veículo. O sistema mecânico, conforme mostrado na Figura 1, é composto por: um chassi, um jogo de quatro pneus de kart, um assento para piloto, eixo rígido traseiro, transmissão por corrente, freio a disco e volante de direção.

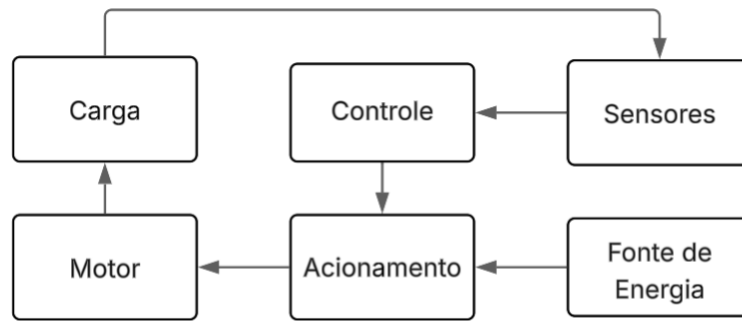
Figura 1 – Atual kart elétrico da equipe VELLEV.



Fonte: Acervo digital VELLEV, 2019

Para facilitar o entendimento do sistema elétrico existente, elaborou-se um diagrama de blocos apresentado na Figura 2, o qual é semelhante a abordagem didática feita em Chau (2015). O diagrama representa uma estrutura de organização interna do sistema elétrico de um veículo, dividida em seções diferentes:

Figura 2 – Diagrama de blocos de um veículo elétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A nova proposta tem como objetivo a alteração do acionamento e motor do veículo, não se preocupando diretamente com as outras subdivisões, focando a comparação somente entre o motor e conversor estrangeiro com os fornecidos nacionalmente.

## 2.2 CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS E DE AMBIENTE

Conhecer os aspectos mecânicos é fundamental para a avaliação e dimensionamento do *powertrain*. O comportamento dinâmico de um veículo é ligeiramente complexo e extenso, sendo apresentado aqui de maneira detalhada (Ehsani et al., 2004). Para o dimensionamento de um veículo é importante levantar as informações de construção que refletem na escolha da fonte de energia, do acionamento e do motor associado. Sendo assim, as informações pertinentes que envolvem os aspectos construtivos são listadas a Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de dados construtivos do veículo e-Kart com o powertrain atual.

<b>Dados construtivos do veículo</b>	
Massa do piloto ( $m_{pil}$ )	75 kg
Massa do motor e conversor ( $m_{mot}$ )	12 kg
Massa das rodas ( $m_r$ )	3 Kg
Massa das baterias ( $m_{bat}$ )	64 kg
Massa total c/ restante ( $m_k$ )	202 kg
Altura do kart ( $h_k$ )	0,8 m
Largura do kart ( $l_k$ )	0,7 m
Coeficiente de área frontal ( $C_{af}$ )	0,9
Relação de transmissão ( $i_g$ )	11:53
Raio das rodas (R)	0,125m
Coeficiente de rolamento ( $C_r$ )	0,0131
Coeficiente de <i>downforce</i> ( $C_d$ )	0,13

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além da definição dos requisitos de projeto citados anteriormente, alguns parâmetros do ambiente precisam ser definidos e considerados, conforme apresentado na Tabela 2, refletindo o ambiente de interesse, o **Kartódromo Internacional de Joinville (KIJ)**.

Tabela 2 – Estimativa das condições ambientes no KIJ.

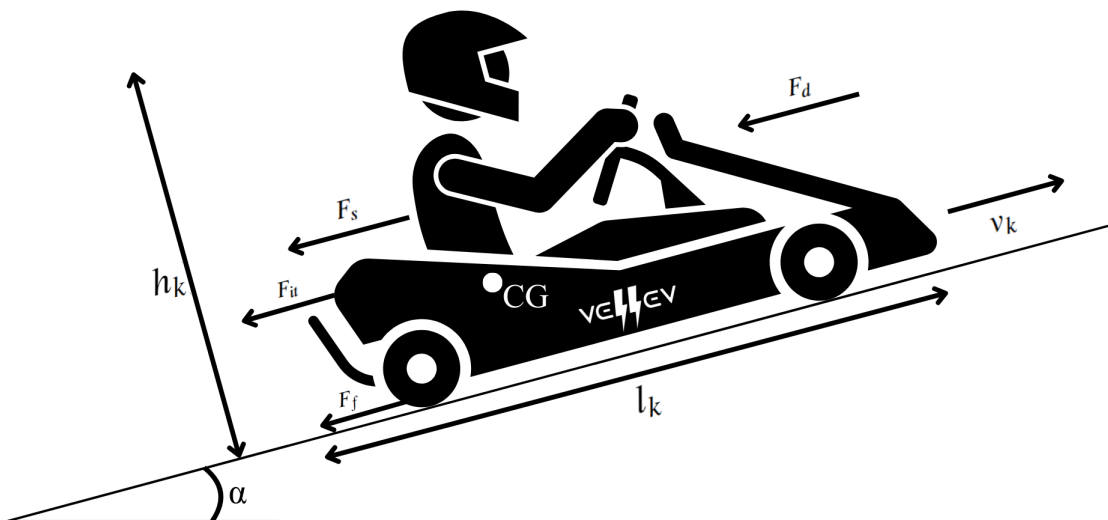
Valores de contorno do ambiente	
Densidade relativa do ar ( $\rho$ )	1,202 kg/m <sup>3</sup>
Aceleração da gravidade ( $g$ )	9,81 m/s <sup>2</sup>
Inclinação da pista ( $\alpha$ )	0 °
Coefficiente de arrasto do ar ( $C_a$ )	0,57
Velocidade do vento ( $v_w$ )	0 m/s

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 2.3 DINÂMICA VEÍCULAR DO E-KART

A dinâmica longitudinal de um veículo, representada na Figura 3, possui diversas forças dissipativas atuantes, convertendo a energia mecânica em outras formas de energia, principalmente térmica, e influenciando o desempenho e a eficiência do veículo.

Figura 3 – Diagrama das forças atuantes em um veículo em movimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 2.3.1 FORÇA DE RESISTÊNCIA A ACELERAÇÃO

A força de resistência a aceleração é relativa a resistência que o veículo oferece à mudança de seu estado de movimento. De acordo com a segunda lei de Newton, a inércia é proporcional à massa do veículo. Quanto maior a massa, maior a força necessária para acelerar ou desacelerar. Pode-se simplificar subdividindo essa força em duas parcelas: **massas rotacionais** e **massas translacionais** (Gillespie, 1992). As massas em translação possuem uma ideia simples de movimento, uma carga de massa  $m$  com uma aceleração  $|\vec{a}|$ , representada pela equação a seguir:

$$F_{it} = m_k \cdot |\vec{a}_k|$$

$$F_{it} = m_k \cdot \frac{dv_k}{dt} = m_k \cdot \frac{\Delta v_k}{\Delta t}$$

Em que:

- $F_{it}$  - Força de resistência a aceleração linear em N.
- $a_{kart}$  - aceleração do kart em  $m/s^2$ .

No entanto, graças à parcela das massas em rotação do veículo, há um coeficiente  $\delta$  que representa essa parcela no domínio da translação. Em (Ehsani et al., 2004), uma medida experimental para veículos de porte menor, utiliza-se da equação empírica para chegar no valor do fator  $\delta$ :

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 \cdot i_o \cdot i_g \quad (1)$$

Em que:

- $\delta_1$  - Coeficiente do momento de inércia da transmissão para as rodas.
- $\delta_2$  - Coeficiente referente ao momento de inércia do motor referido nas rodas.
- $i_o$  - Relação do diferencial - não há no kart, então é 1.
- $i_g$  - Relação de transmissão

De acordo com a literatura referenciada, em Gillespie (1992) e Ehsani et al. (2004), os valores de  $\delta_1$  e  $\delta_2$  já possuem valores empiricamente determinado considerando o porte do kart. Portanto, chega-se à equação de interesse para este trabalho:

$$\delta(i_g) = 1 + 0,04 + 0,0025 \cdot i_g \quad (2)$$

Para o cálculo da força inercial  $F_i$  no domínio totalmente translacional, com um fator de correção  $\delta$  em função de  $i_g$ , para as massas rotativas, chega-se na equação 3:

$$F_{it} = \delta(i_g) \cdot m_k \cdot \frac{dv_k}{dt} \quad (3)$$

### 2.3.2 FORÇA DE ARRASTO AERODINÂMICO

A força de arrasto aerodinâmico é causada pela resistência de arrasto do ar durante o movimento do veículo, com a formação de áreas de alta pressão no frontal do veículo e áreas de baixa pressão na sua traseira, conforme mostrado na Figura 4. Esta força depende da área frontal efetiva, do coeficiente de arrasto e da velocidade ao quadrado. À medida que a velocidade aumenta, a força de arrasto cresce significativamente, exigindo mais potência do motor para manter ou aumentar a velocidade (Gillespie, 1992). Essa força é descrita de acordo com a Equação 4:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_a \cdot \rho \cdot A_{max} \cdot (v_k - v_w)^2 \quad (4)$$

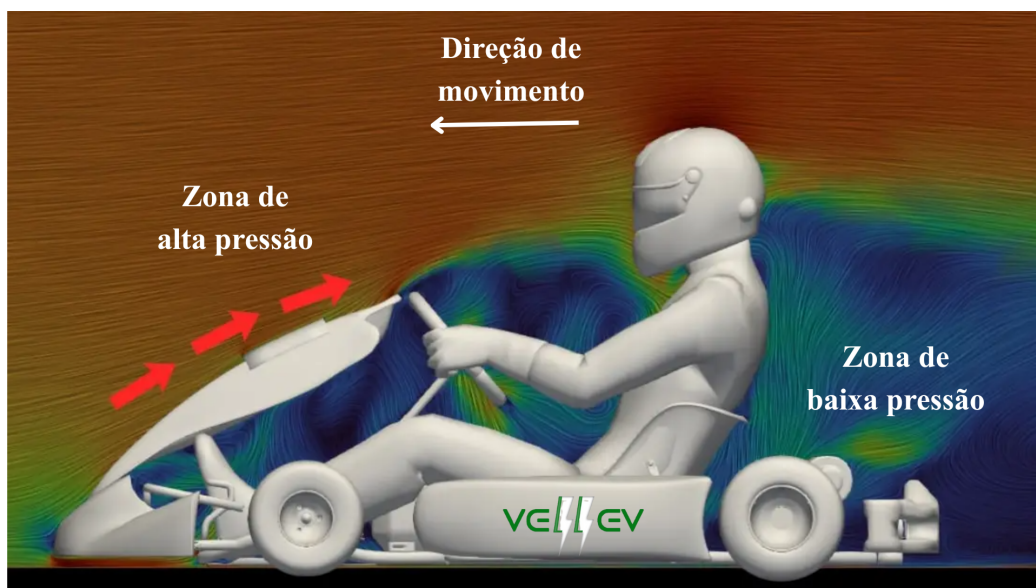
Em que:

- $\rho$  - Densidade relativa do ar em  $kg/m^3$
- $C_a$  - Coeficiente de arrasto aerodinâmico.
- $A_{max}$  - Área frontal máxima do veículo em  $m^2$ .
- $v_k$  - Velocidade do veículo em  $m/s$ .
- $v_w$  - Velocidade do vento em  $m/s$ ; Sempre contra o sentido de direção do veículo.

Os fatores  $\rho$ ,  $C_a$  e  $v_w$  foram apresentados na Tabela 2, mas o fator  $A_{max}$  deve ser obtido com a Equação 5 utilizando-se dos dados da Tabela 1:

$$A_{max} = h_k \cdot l_k \cdot C_{af} \quad (5)$$

Figura 4 – Arrasto aerodinâmico em veículos.



Fonte: Adaptado de (Savicki, 2025)

### 2.3.3 FORÇA DE INCLINAÇÃO

Quando o veículo se desloca em uma pista inclinada, a componente da força peso atua ao longo da direção da pista, influenciando o movimento. Descreve-se a força  $F_s$  de acordo com a Equação 6:

$$F_s = m_k \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (6)$$

Em que:

- $\alpha$  - Angulo de inclinação da pista em graus.

### 2.3.4 FORÇA DE RESISTÊNCIA A ROLAMENTO

A força de resistência de rolamento resulta da deformação dos pneus e do atrito à rotação nos rolamentos das rodas e diferencial (se existisse), indicado na Figura 5. Embora seja geralmente menor que a força de arrasto, sua influência é constante, especialmente em baixas velocidades (Gillespie, 1992). Pode ser descrita de acordo com a Equação 7:

$$F_f = m_k \cdot g \cdot C_r \cdot \cos(\alpha) \quad (7)$$

Em que:

- $C_r$  - Coeficiente de resistência a rolamento.

O  $C_r$  adotado na Tabela 2 refere-se a uma velocidade de até 128 km/h no asfalto, considerando que possui um comportamento não linear, serão considerados os valores adotados em (Ehsani et al., 2004).

Figura 5 – Resistência a rolamento dos pneus.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 2.3.5 CONSIDERAÇÕES DA CARGA

No modelo desenvolvido, as principais forças dissipativas consideradas são o **arrasto aerodinâmico**, a **resistência ao rolamento** e a **resistência a aceleração**. A força de inclinação é nula, considerando uma inclinação insignificante ou praticamente inexistente na pista. Calculam-se as forças dissipativas  $F_{it}$ ,  $F_d$  e  $F_f$  com base na Tabela 2 e obtém-se uma única expressão geral. Para o dimensionamento e análise, o somatório das forças será importante para os cálculos visto nas próximas seções:

$$\sum |\vec{F}_{peak}| = F_{it} + F_d + F_f \quad (8)$$

$$\sum |\vec{F}_{peak}(v_k, t_{max}, i_g)| = (208 + 0,5 \cdot i_g) \cdot \frac{v_k}{t_{max}} + 0,202 \cdot v_k^2 + 25,506 \quad (9)$$

É importante salientar que esse somatório de forças engloba a resistência a aceleração do veículo, mas em regime permanente de velocidade esse fator tem baixa influência no somatório de forças, afinal há pouca variação de velocidade. Logo, pode-se obter por meio das equações 8 e 9, removendo a componente de aceleração, as seguintes expressões:

$$\sum |\vec{F}_{nom}(v_k)| = F_d + F_f \quad (10)$$

$$\sum |\vec{F}_{nom}(v_k)| = 0,202 \cdot v_{kart}^2 + 25,506 \quad (11)$$

### 2.3.6 POTÊNCIA, TORQUE E VELOCIDADE

Com base nas relações descritas pelas Equações 9 e 11, há quatro informações essenciais que nos permitem tanto verificar o motor do *powertrain* atual quanto dimensionar adequadamente o motor para o novo *powertrain*. São elas:

- Potência de Pico ( $P_{peak}$ ) - dada em W
- Potência Nominal ( $P_{nom}$ ) - dada em W
- Torque de Pico ( $T_{peak}$ ) - dada em Nm
- Torque Nominal ( $T_{nom}$ ) - dada em Nm

No contexto dos motores elétricos, a potência influencia diretamente o desempenho do veículo, determinando sua aceleração e a capacidade de resposta, tornando a pilotagem mais dinâmica e competitiva. A potência é a grandeza física que mede a quantidade de energia transferida ou convertida por unidade de tempo, pode-se obtê-la pela seguinte expressão:

$$P = \int_{t_0}^{t_f} W(t) dt \quad (12)$$

Podemos simplificar considerando o trabalho constante para colocar o valor em função da velocidade desejada, de modo que:

$$P(v) = |\vec{F}| \cdot v \quad (13)$$

Ao representar as forças em cenários diferentes, pode-se também classificar a potência em potência de pico  $P_{peak}$  e a potência nominal  $P_{nom}$ , assim indicado nas seguintes expressões:

$$P_{peak}(v_k, t_{max}, i_g) = \sum |\vec{F}_{peak}(v_k, t_{max}, i_g)| \cdot v_k \quad (14)$$

$$P_{peak}(v_k, t_{max}, i_g) = (208 + 0,5 \cdot i_g) \cdot \frac{v_k^2}{t_{max}} + 0,202 \cdot v_k^3 + 25,506 \cdot v_k \quad (15)$$

A partir do momento em que o motor está próximo de atingir a sua velocidade máxima, a aceleração passa a ocorrer de maneira discreta com módulo praticamente nulo. Para isso, determina-se o que se conhece como potência nominal ou contínua:

$$P_{nom}(v_k) = \sum |\vec{F}_{nom}(v_k)| \cdot v_k \quad (16)$$

$$P_{nom}(v_k) = 0,202 \cdot v_k^3 + 25,506 \cdot v_k \quad (17)$$

A outra grandeza para dimensionar um motor é o torque. O torque é essencial no desempenho, pois determina a força de rotação aplicada às rodas, influenciando diretamente na aceleração (Gillespie, 1992). Obtém-se o torque a partir de:

$$T_m = \frac{P_{peak/nom}}{\omega_m} \quad (18)$$

- $T_m$  - Torque do motor dado em Nm
- $P_{peak/cont}$  - Potência dada em Watts [W]
- $\omega_m$  - Velocidade angular do motor em rad/s

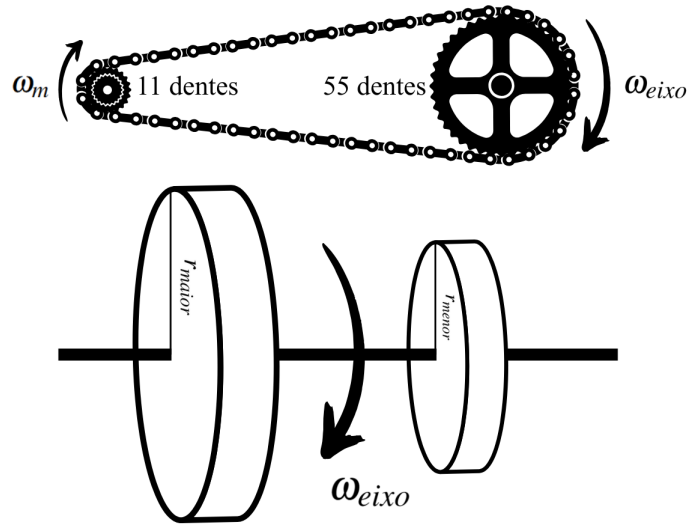
Da mesma forma que a potência pode ser classificada em pico e contínua, o torque pode se apresentar da mesma forma (Ehsani et al., 2004). Normalmente, fabricantes costumam indicar o torque de pico, mas há fabricantes que podem trazer ambos. A partir da Equação 18 e substituindo a potência pelas de interesse, obtém-se as expressões 19 e 20:

$$T_{peak}(v_k, t_{max}, i_g) = \frac{(208 + 0,5 \cdot i_g) \frac{v_k^2}{t_{max}} + 0,202 \cdot v_k^3 + 25,506 \cdot v_k}{\omega_m} \quad (19)$$

$$T_{nom}(v_k) = \frac{0,202 \cdot v_k^3 + 25,506 \cdot v_k}{\omega_m} \quad (20)$$

As Equações 19 e 20 possuem duas referências de velocidade. No caso de  $\omega_m$  trata-se da velocidade vista no eixo do motor, já  $v_k$  se refere à velocidade do linear das rodas (Mohan, 2014). Para relacionar as velocidades, considera-se a relação de transmissão  $i_g$  e o comportamento da transmissão e acoplamento do veículo conforme a Figura 6.

Figura 6 – Modelo de transmissão e acoplamento do Kart.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No kart, a transmissão do movimento circular é feita por meio das duas relações indicadas. A velocidade angular do motor ( $\omega_m$ ) para a velocidade da engrenagem acoplada a ele é igual. Diferencia-se, porém, a velocidade angular entre as engrenagens de raios diferentes, dada pela seguinte equação:

$$\omega_{eixo} = \omega_m \times \frac{r_{menor}}{r_{maior}} \quad (21)$$

Como a roda e a coroa estão no mesmo eixo, sua velocidade angular é a mesma; no entanto, a velocidade linear da roda depende do raio  $R$  conforme indicado na Tabela 1. Por isso, tem-se:

$$v_k = \omega_{eixo} \times R = \omega_m \times \frac{r_{menor}}{r_{maior}} \times R \quad (22)$$

Pode-se ajustar a relação para descrever o torque em função de uma única velocidade, adaptando conforme o sistema de acoplamento mecânico existente. Considerando a relação  $i_g$  da Tabela 1 e colocando em evidência o raio  $R$ , chega-se finalmente às equações 23 e 24.

$$T_{peak}(v_k, t_{max}, i_g) = \frac{((208 + 0,5 \cdot i_g) \cdot \frac{v_k}{t_{max}} + 0,202 \cdot v_k^2 + 25,5) \cdot R}{i_g} \quad (23)$$

$$T_{nom}(v_k) = \frac{(0,202 \cdot v_k^2 + 25,5) \cdot R}{i_g} \quad (24)$$

Essas expressões representam e descrevem a relação de transmissão do kart e podem ser observadas aplicadas na prática na Figura 7:

Figura 7 – Modelo de transmissão do Kart.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 7 explica o valor da relação de transmissão  $i_g$  listado na Tabela 1, tendo em vista que a engrenagem menor possui 11 dentes e a engrenagem maior possui 53 dentes.

### 2.3.7 EFICIÊNCIA, ENERGIA E FATOR DE POTÊNCIA

A eficiência geral do sistema determina quanto da energia fornecida ao motor é efetivamente convertida em trabalho útil, quanto mais eficiente menos energia é consumida para realizar a mesma tarefa, reduzindo-se perdas por calor, vibração, etc. Para ambas propostas, assume-se os valores de eficiência de todos os principais estágios indicados no Quadro 1:

Quadro 1 – Tipos de eficiência no sistema.

<b>Eficiência da Transmissão - <math>\eta_{acop}</math></b>	<b>Eficiência do Motor - <math>\eta_{motor}</math></b>
Perdas ocorrem por atrito e folgas mecânicas, reduzindo a transferência de torque entre motor e carga.	Parte da energia é dissipada em forma de calor devido à resistência dos enrolamentos e perdas de magnetização
<b>Eficiência do Conversor - <math>\eta_{conv}</math></b>	<b>Eficiência das Baterias - <math>\eta_{bat}</math></b>
Há perdas durante a condução e comutação, principalmente no aquecimento em componentes eletrônicos.	Perdas acontecem pela resistência interna, limitações na taxa de descarga.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Fica evidente que outros fatores construtivos afetam a transferência de energia, causando perdas produtivas ao sistema. A eficiência pode ser descrita de acordo com a Equação 25:

$$\eta = \frac{P_{saida}}{P_{entrada}} \quad (25)$$

Em (Chau, 2015), pode-se destacar para o dimensionamento de torque e potência as eficiências do acoplamento e do motor, deste modo adiciona-se mais um termo para a equação de potência e torque:

$$P_{real} = \frac{P_{peak,nom}}{\eta_{acop} \times \eta_{mot}} \quad (26)$$

$$T_{real} = \frac{T_{peak,nom}}{\eta_{acop} \times \eta_{mot}} \quad (27)$$

Conforme adiciona-se elementos, a eficiência total do sistema passa a ser um produto de todas as eficiências relatadas:

$$\eta_{tot} = \eta_{bat} \times \eta_{conv} \times \eta_{mot} \times \eta_{acop} \quad (28)$$

Descrito a eficiência do sistema e suas perdas, podemos definir a energia gasta por um sistema como a integral da potência fornecida ao longo do tempo:

$$E = \int_{t_0}^{t_f} P_{real}(t) dt \quad (29)$$

A dependência do fornecimento de energia é exclusiva da fonte escolhida, no caso de um *powertrain* elétrico, são as baterias. Essas devem ser tão capazes de fornecer a potência instantânea requerida quanto ter a autonomia desejada. No Kart da equipe VELLEVA a energia pode variar tanto em direção a alimentação da carga motora, quanto em direção à fonte, devolvendo energia. Essa bidirecionalidade permite melhoras na autonomia do veículo.

Por último, o fator de potência em motores ocorre devido a presença de indutância no circuito, produzindo uma defasagem entre a corrente e a tensão de alimentação, significando que nem toda potência é de fato transformada em trabalho mecânico. Para sistemas lineares a expressão mais genérica que descreve fator de potência é descrita pela Equação 30:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (30)$$

Em que:

- P - Potência Ativa em kW.
- S - Potência aparente do sistema em kVA.

No entanto, o conversor é um sistema chaveado, logo a distorção da corrente gerada pelo chaveamento, influencia no fator de potência do sistema, conforme mostra a Equação 31:

$$FP = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (31)$$

Em que:

- THD - do inglês Total Harmonic Distortion, ou Taxa de distorção harmônica.

### 2.3.8 AUTONOMIA E ESTADO DE CARGA

A autonomia indica o tempo ou a distância que o veículo pode operar com uma carga completa da bateria, sendo um dos principais critérios de desempenho em treinos e competições. Ela depende da eficiência do sistema, das condições da pista e da capacidade energética das baterias, por isso avaliar a autonomia permite otimizar o projeto do *powertrain*. Para uma estimativa aproximada da autonomia em relação a distância, tem-se:

$$Auton = \int_0^t v_k(t) dt \quad (32)$$

Em que:

- $Auton$  - Autonomia em metros [m]
- $v_k(t)$ : Velocidade do kart no tempo em  $m/s$

Para facilitar a interface entre os resultados, pode-se substituir o sinal  $v_k(t)$  pela rotação do motor usando a relação de transmissão conhecida e a conversão de rotações por minuto (RPM) para metros por segundo:

$$Auton = \frac{0,1047 \cdot R}{i_g} \int_0^t RPM_{motor}(t) dt \quad (33)$$

Em que:

- $i_g$  - relação de transmissão
- $R$  - raio dos pneus
- $RPM_{motor}(t)$ : sinal de rotação do motor no tempo em  $RPM$

O estado de carga (*State of Charge – SOC*) indica a energia restante em relação à capacidade total da bateria (Hongwen; Xiong; Fan, 2011), descrito pela Equação 34:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q} \int_0^t i_{bat}(t) dt \quad (34)$$

Em que:

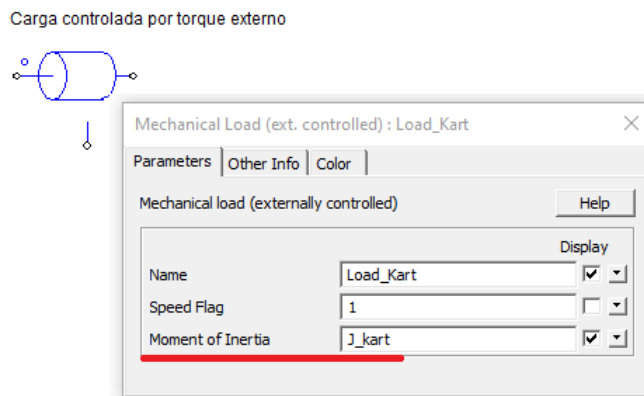
- $SOC_0$ : Estado de carga inicial
- $Q$ : Capacidade de descarga nominal da bateria
- $i_{bat}(t)$ : Corrente na bateria

Monitorar o SOC é essencial para evitar a descarga completa da bateria, o que pode comprometer o desempenho do kart e causar danos ao sistema. Além disso, ele auxilia no planejamento de estratégias de corrida e no gerenciamento energético em tempo real.

### 2.3.9 MODELO DE CARGA - *PSIM*<sup>®</sup>

A carga aplicada no sistema de tração veicular, foi elaborada e analisada representando um kart elétrico simulado no ambiente *PSIM*<sup>®</sup>. Para isso utilizou-se no *software*, o bloco de carga controlada por torque externo, representado na Figura 8. Neste bloco, o único parâmetro possível de informar é o valor do momento de inércia da carga, isso dispensa a necessidade de adicionar o coeficiente  $\delta$  no sinal externo, se conhecido o valor do parâmetro.

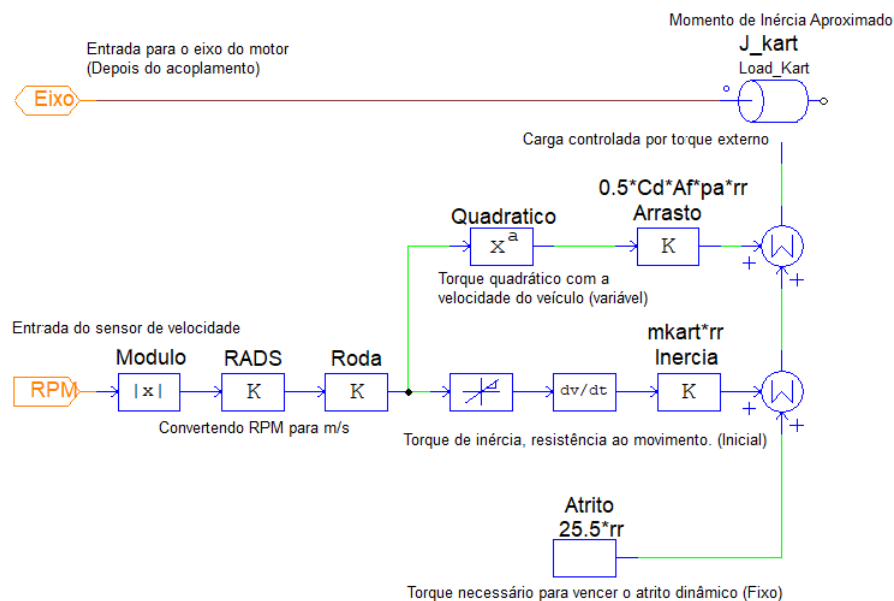
Figura 8 – Bloco *PSIM*<sup>®</sup> de torque controlado externamente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As principais forças resistivas: torque de inércia, resistência de rolamento e o arrasto aerodinâmico, foram adicionadas como sinal de controle externo, de acordo com a Figura 9.

Figura 9 – Sinal de torque externo para o carga.

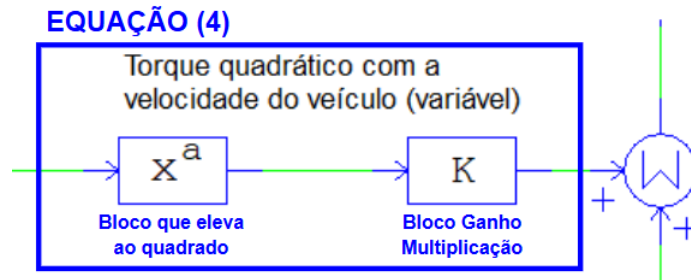


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O sinal de velocidade do motor entra como o parâmetro de duas das principais forças resistivas, após a conversão do sinal para de *RPM* para metros por segundo (*m/s*).

As forças listadas são dinâmicas e variam conforme a velocidade do veículo que é convertida e se torna um sinal de entrada para os blocos que representam elas. A força de arrasto aerodinâmico ( $F_d$ ), representada pela Equação 4, se encontra na região superior da modelagem da carga e é formado por um bloco que eleva o sinal de velocidade ao quadrado e depois multiplica pelas demais variáveis contidas no bloco de ganho, conforme ilustra a Figura 11.

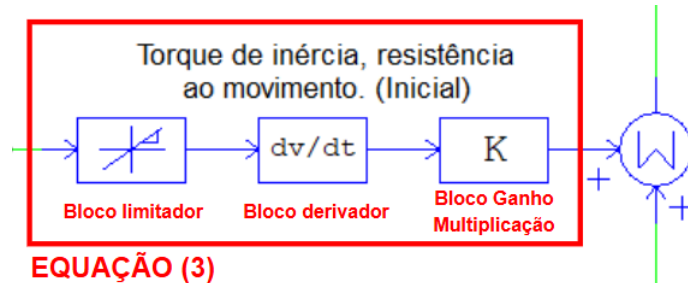
Figura 10 – Representação da força de arrasto aerodinâmico no *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A força de resistência a aceleração ( $F_{it}$ ), representada pela Equação 3, é a região intermediária formada pelo limitador, o bloco de derivação e o bloco de ganho.

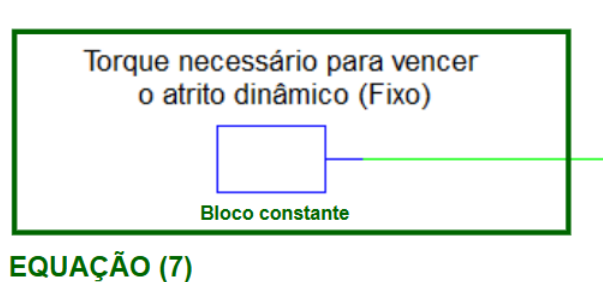
Figura 11 – Representação da força de resistência a aceleração no *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A força de resistência a rolamento ( $F_f$ ), representada pela Equação 7, é o bloco constante que se encontra na região inferior da modelagem da carga.

Figura 12 – Representação da força de resistência a rolamento no *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 2.3.10 OPTIMUM LAP

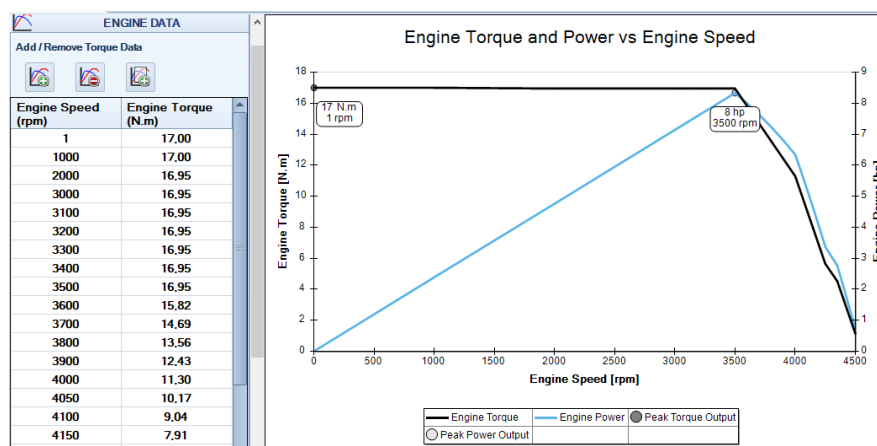
Em (Ferronato, 2019), o software *OptimumLap* foi utilizado para criar virtualmente uma pista de corrida para obter o comportamento do veículo dentro do melhor cenário que o *powertrain* pode fornecer durante uma volta. Neste trabalho, a pista modelada foi a do Kartódromo Internacional de Joinville. Para simular o desempenho ideal dos sistemas de *powertrain* com esta ferramenta de software, na aba de *Vehicle Setup*, inserem-se os dados construtivos do veículo, que neste caso estão informados na Tabela 1 e as variáveis de ambiente da Tabela 2, de acordo com a Figura 13.

Figura 13 – Introdução dos parâmetros do Kart no *OptimumLap*, aba *Vehicle Setup*.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na tela de *Engine Data*, os dados nominais do motor escolhido devem ser carregados. Para exemplificar, a Figura 14 demonstra essa execução durante a simulação do *powertrain* de corrente contínua (CC).

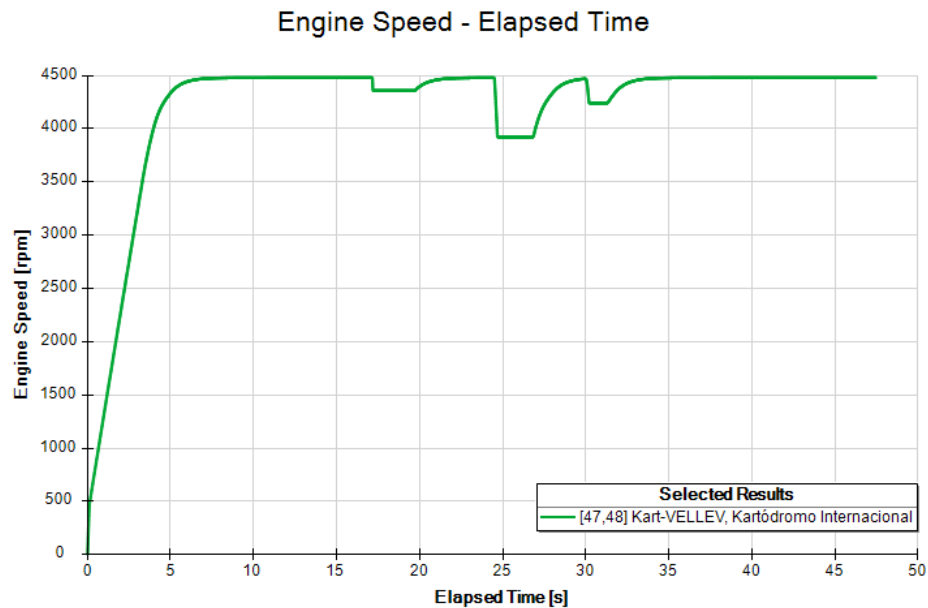
Figura 14 – Exemplo da tela *Engine Data* durante a simulação do *powertrain* CC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Inserido todos os dados necessários para a simulação no *OptimumLap*, o software retorna o tempo da melhor volta possível com base nas informações fornecidas. Com o tempo da melhor volta e a distância percorrida, ele estima a melhor velocidade em cada ponto do trajeto. O gráfico de velocidade apresentado na Figura 15 pode servir como o sinal de referência representando o comportamento do veículo dirigido por um piloto.

Figura 15 – Exemplo de sinal de velocidade do motor no *OptimumLap*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O sinal de referência da Figura 15, embora seja o sinal utilizado nas simulações para uma volta completa, nesta seção tem como função somente exemplificar a utilização do software.

Portanto, com o *OptimumLap* torna-se possível desenvolver uma simulação em pista do veículo elétrico e realizar estudos do comportamento de diferentes tipos de sistema *powertrain* para comparação.

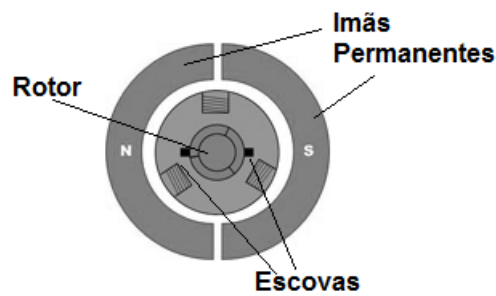
### 3 SISTEMA *POWERTRAIN* CC DO E-KART VELLEV

Um sistema *powertrain* elétrico baseado em corrente contínua (CC) é composto pelo próprio motor CC, responsável pela conversão eletromecânica de energia acionado pelo conversor CC-CC bidirecional, que realiza o controle da potência e do sentido de fluxo de energia vinda do banco de baterias, que atua como fonte primária, armazenando e fornecendo energia (Mohan; Undeland; Robbins, 2014).

#### 3.1 MOTOR ELÉTRICO: ME0909 PMDC

O motor à disposição da equipe VELLEV, é um motor de corrente contínua de ímãs permanentes (PMDC), ou seja, possui ímãs ao longo do estator, eliminando a necessidade de bobinas no estator para geração do campo magnético (Passarelli, 2023), mantendo bobinas somente no rotor. A Figura 16 ilustra essa topologia.

Figura 16 – Motor CC de Ímãs Permanentes (PMDC).



Fonte: (Braga, 2025)

Conforme a Figura 17 o modelo do motor é o ME0909, fabricado pela MOTOR ENERGY, empresa americana focada em aplicações elétricas com alta eficiência energética.

Figura 17 – Motor PMDC *ME0909*.



Fonte: (Motenergy, 2025)

A vantagem de usar os motores PMDC está na ausência das bobinas de campo, evitando perdas resistivas no enrolamento e aumentando a eficiência da máquina elétrica. De acordo com os dados fornecidos pela MOTOR ENERGY, na rotação nominal o motor atinge sua eficiência máxima, capaz de chegar até de 90% de eficiência. Para avaliação das características de desempenho desejadas para o e-kart, a partir dos dados do motor apresentados na Figura 18, permite elaborar a Tabela 3.

Figura 18 – Curvas de desempenho do motor ME0909 fornecidas pelo fabricante Motor Energy.

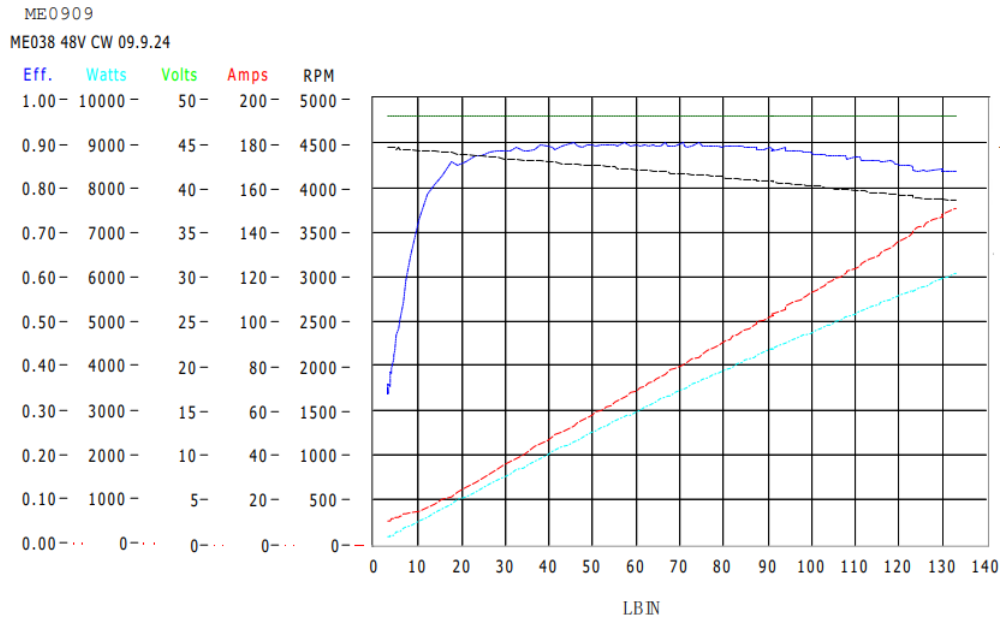


Tabela 3 – Tabela de dados do motor ME0909.

<b>DADOS PLACA MOTOR CC VELLEV - ME0909</b>	
Potência Nominal	4,8 kW
Potência Pico	12 kW
Torque Nominal	16,95 N·m
Torque Pico	30,61 N·m
Rotação Nominal	4500 RPM
Faixa de tensão	24V-48V
Corrente Nominal	100A
Corrente Máxima	300A

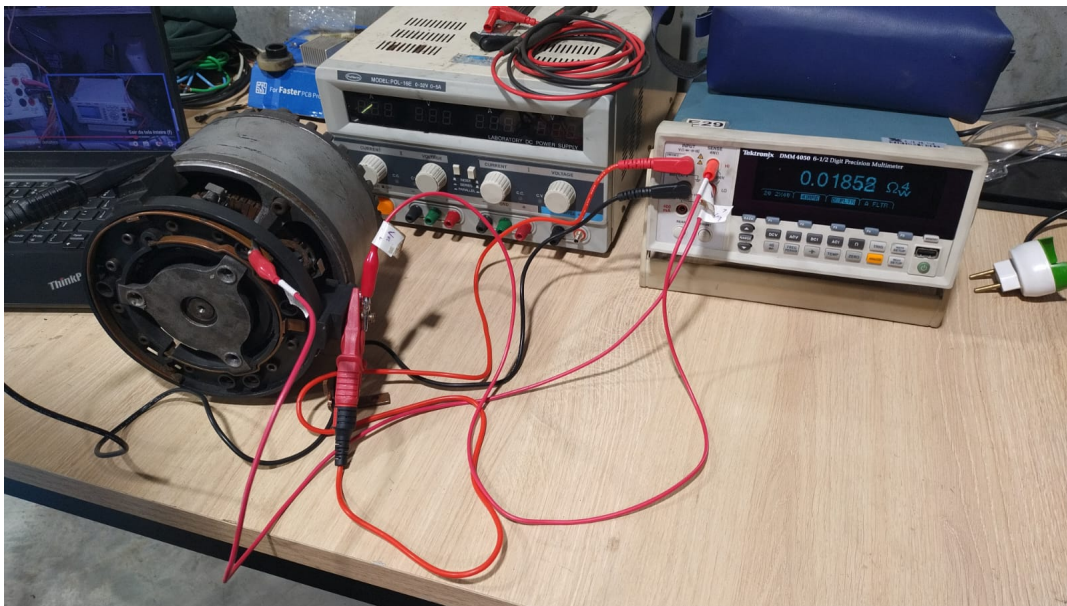
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além dos dados tabelados pelo fabricante, é importante também obter os valores intrínsecos da máquina para desenvolver simulações mais realistas e condizentes com o sistema analisado. Para isso, foram realizados ensaios de medição de resistência e indutância de armadura no motor vistos na próxima seção.

### 3.1.1 ENSAIOS REALIZADOS NO MOTOR CC

Os parâmetros internos da máquina normalmente não são informados pelos fabricantes, pois para medi-los são necessários realizar ensaios práticos no motor. A medida da resistência pode ser obtida colocando-se as ponteiros de um multímetro de precisão nos terminais do motor e em diversas posições diferentes do rotor, para garantir uma medição precisa e identificar possíveis variações de resistência de bobina e de contato das escovas no comutador. É obtido o valor médio destes valores de resistência, com um multímetro à 4 fios, como apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Resistência média medida a 4 Fios.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Foi feita uma medição a cada 60°, aproximadamente, completando uma volta completa no eixo e os valores obtidos são apresentados na Tabela 4, resultando numa média de 18,07  $m\Omega$ .

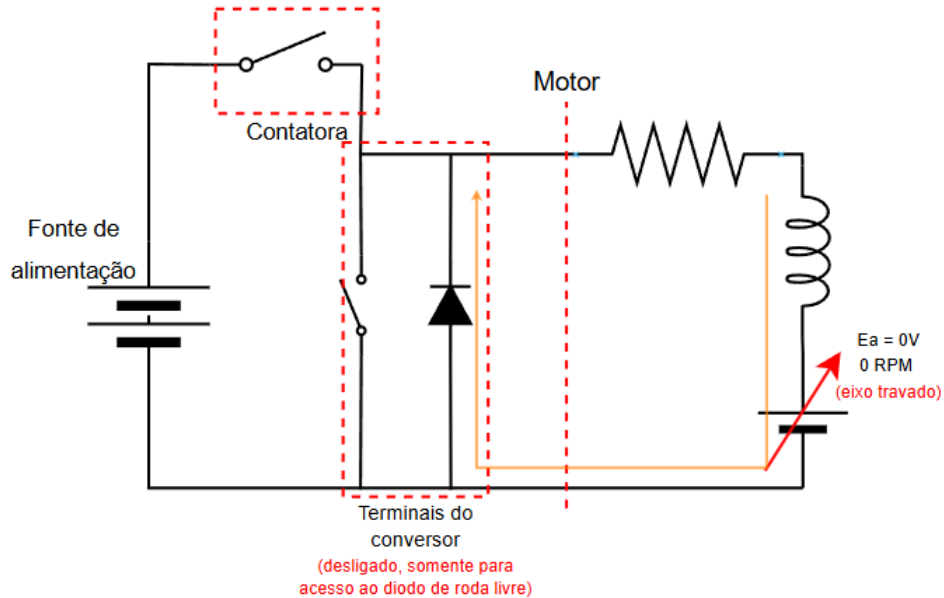
Tabela 4 – Valores de resistência por posição do rotor.

Posição em graus	Resistência $R_a$ [ $m\Omega$ ]
Posição 1 - 0°	23,39
Posição 2 - 60°	15,05
Posição 3 - 120°	14,96
Posição 4 - 180°	17,46
Posição 5 - 240°	19,0
Posição 6 - 300°	18,58
Média obtida	18,07

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para a indutância, o motor foi alimentado com o rotor bloqueado, de modo que o sistema responda como um circuito resistivo-indutivo (RL) puro, como representado no esquemático mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Esquemático elaborado para ensaio da indutância de armadura do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como ilustrado na Figura 20, o motor de corrente contínua pode ser representado por uma indutância em série com uma resistência e uma fonte de tensão que representa a força contra-eletromotriz do motor gerada a partir do giro do rotor, por isso ele é bloqueado. Saindo do terminais do motor, colocou-se em paralelo os terminais do conversor, para ter acesso a um diodo que será usado para criar uma etapa de roda livre, momento em que a contatora é desligada, o indutor produz uma tensão suficiente para manter a corrente circulando até que sua energia acabe. Esse tempo de decaimento é a constante de tempo elétrica  $\tau_e$  obtida pela Equação 35.

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (35)$$

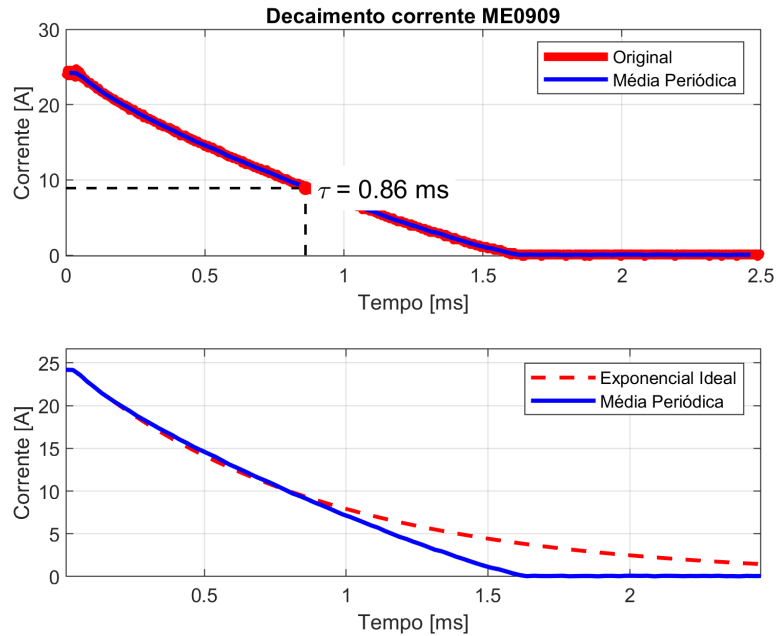
Em que:

- $L_a$  é a indutância de armadura do motor em H.
- $R_a$  é a resistência de armadura do motor em  $\Omega$ .

Assim, colocando-se a ponteira de corrente do osciloscópio na conexão entre motor e conversor, é possível visualizar a etapa de roda livre completa, onde o decaimento da corrente está em função da constante elétrica  $\tau_e$ .

O primeiro gráfico mostrado na Figura 21 refere-se ao valor prático obtido durante o ensaio e o segundo mostra a proximidade da resposta ensaiada com o valor de uma resposta exponencial ideal de um circuito RL.

Figura 21 – Queda da corrente com a desenergização do motor travado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Pela equação de constante elétrica e o valor da resistência medida do rotor, obteve-se a indutância de armadura do motor:

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} = 0,86ms \quad (36)$$

$$L_a = \tau_e \cdot R_a = 15,92\mu H \quad (37)$$

Os demais parâmetros não foram ensaiados, devido dificuldades de obtenção em laboratório, porém são fornecidos pelo fabricante do produto ou em outros trabalhos acadêmicos. Em Correa (2021), o momento de inércia do motor é descrito, já parâmetros como a constante de torque, são encontrados no site do fabricante e os seus valores encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Tabela de dados do motor ME0909.

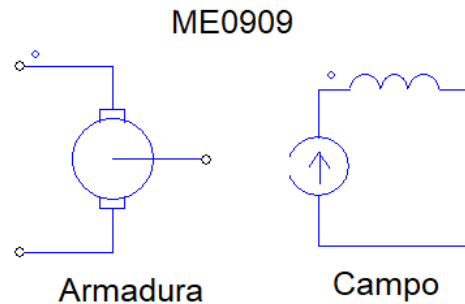
Parâmetro	Ensaiado	Valores externos
Res. de Armadura ( $R_a$ )	0,01858Ω	0,0216Ω
Ind. da Armadura ( $L_a$ )	15,92 μH	80 μH
Inércia do rotor ( $J_m$ )	//	0,0122 kg · m <sup>2</sup>
Cte. de Torque ( $k_t$ )	//	0.101 N · m · A <sup>-1</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 3.1.2 SIMULAÇÃO DO MOTOR ME0909

No ambiente de simulação do *PSIM*<sup>®</sup>, o bloco que representa um motor elétrico de corrente contínua está demonstrado na Figura 22. Com este bloco, podemos simular um motor PMDC considerando a excitação do campo e da armadura de forma independente.

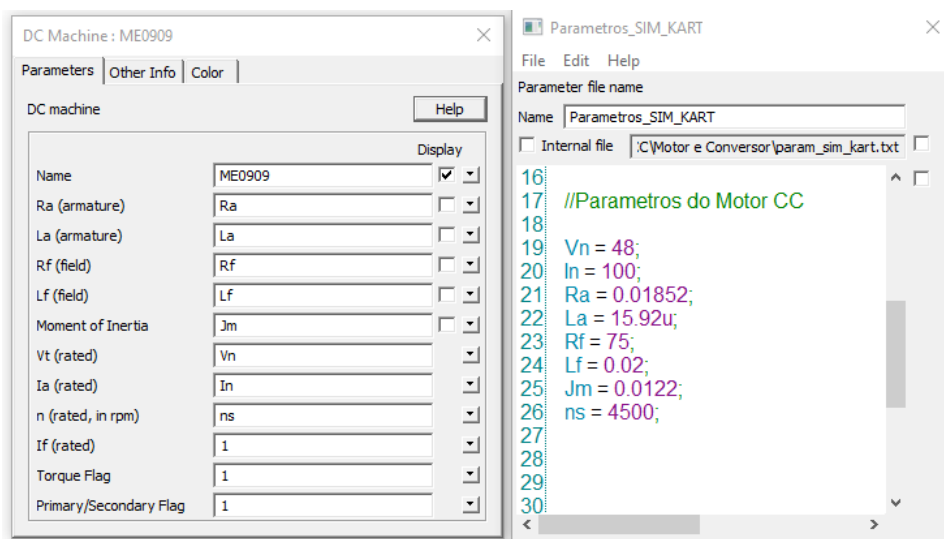
Figura 22 – Bloco do motor de corrente contínua no *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os parâmetros a serem introduzidos neste bloco de motor estão indicados na Figura 23 e todos os valores inseridos correspondem aos dados de placa ou aos ensaios realizados contidos na Tabela 3 e na Tabela 5, exceto as informações do enrolamento de campo. Optou-se por manter os valores padrão do software, pois não temos como relacionar um motor PMDC (ME0909) com o modelo de motor CC com enrolamento de campo do *PSIM*<sup>®</sup>. Porém, com os valores nominais de tensão de armadura e carga nominal de torque inseridos, o motor apresenta a corrente e a potência nominal.

Figura 23 – Parâmetros da máquina de corrente contínua no *PSIM*<sup>®</sup>.



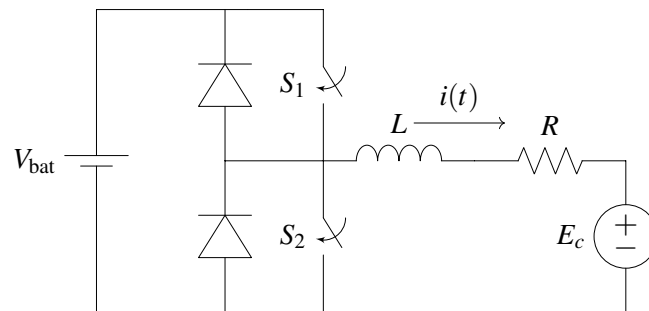
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com os parâmetros elétricos e mecânicos do motor obtidos, torna-se possível modelar o circuito de acionamento responsável pelo sistema de controle de tração.

### 3.2 CONVERSOR *BUCK* BIDIRECIONAL EM CORRENTE

O conversor *buck* bidirecional em corrente é uma topologia comum em aplicações de tração elétrica, onde se exige tanto tração, quanto frenagem regenerativa. A versão não isolada utiliza um braço de transistores com os elementos "R", "L" e " $E_c$ " da Figura 24 representando o motor CC. Caso a indutância própria do motor não apresente condução contínua, insere-se um indutor em série adicional, evitando torque pulsado (condução descontínua) para manter a corrente constante.

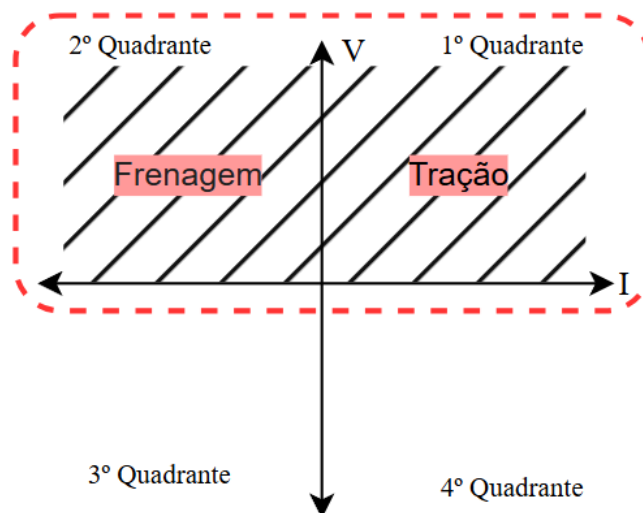
Figura 24 – Circuito de potência do conversor bidirecional em corrente.



Fonte: Adaptado de (Barbi, 2010), 2025

O aspecto de reversibilidade de corrente, caracterizando-o como bidirecional, permite a regeneração de energia para a carga, partindo do princípio básico de conservação de energia (Baldassi, 2015), sendo ilustrado de acordo com o diagrama tensão ( $V$ ) versus corrente ( $I$ ) apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Diagrama  $V \times I$  das regiões de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nota-se que a operação está somente no primeiro e segundo quadrante, não se estendendo para o terceiro e quarto quadrante, pois isso significaria reversão de tensão.

Operando no primeiro quadrante, com a tensão e a corrente positivas, o motor estará no modo de tração, com a corrente fluindo da fonte de energia para a carga ativa (motor). O conversor atua no modo abaixador (conversor tipo *Buck*), regulando a corrente de saída através da modulação por largura de pulso, mais conhecido pela nomenclatura na língua inglesa *Pulse Width Modulation (PWM)*, aplicada ao braço de transistores de maneira complementar (Barbi, 2010). Seguindo o diagrama mostrado na Figura 25 temos que:

- Tensão na carga:  $V_{carga} > 0$
- Corrente na carga:  $I_{carga} > 0$
- Potência na carga:  $P_{carga} = V_{carga} \cdot I_{carga} > 0$  (Fornece energia ao motor)

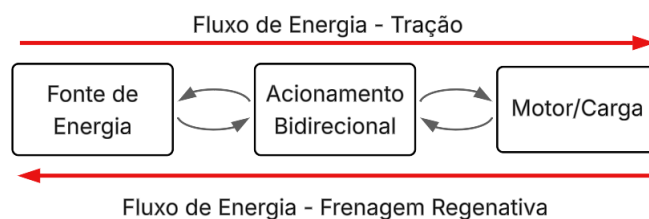
A razão cíclica nessa operação, como descrito anteriormente, é a mesma do conversor *Buck* (abaixador), portanto podemos definir como:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (38)$$

Operando no segundo quadrante, com a tensão positiva e a corrente negativa, o motor estará no modo de frenagem, o motor opera como gerador, e o conversor permite que a energia seja devolvida para a fonte. A medida que a razão cíclica é diminuída ao ponto de a tensão nos terminais do motor se tornar menor do que a tensão contra-eletromotriz interna  $E_c$ , a corrente de armadura mudará o seu sentido de circulação, retornando para a fonte de alimentação, caracterizando regeneração de energia e operação no 2º *Quadrante Tensão-Corrente*, fazendo com que o sentido da corrente se inverta como descrito na Figura 26, o que caracteriza operação no segundo quadrante (Barbi, 2010).

- Tensão na carga:  $V_{carga} > 0$
- Corrente na carga:  $I_{carga} < 0$
- Potência na Fonte:  $P_{carga} = V_{carga} \cdot I_{carga} < 0$  (Motor devolve energia para a fonte)

Figura 26 – Fluxo bidirecional de energia entre fonte e motor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O conversor usado pelo projeto VELLEVA, especialmente fabricado para motores CC de ímãs permanentes, é um *Kelly KDZ* do fabricante *Kelly Controllers*, uma empresa chinesa de controladores eletrônicos, mostrado na Figura 27. A versão utilizada pelo grupo é a *KDZ48401* com uma capacidade de corrente de 400A, tensão de alimentação de 48V e frequência de comutação de 16,6 kHz, conforme apresentado na Tabela 6.

Figura 27 – Conversor eletrônico *Kelly 48401*.



Fonte: Kelly Controllers, 2025.

Tabela 6 – Tabela de dados do conversor.

<b>CARACTERISTICAS KELLY KDZ</b>	
Tensão de Operação ( $V_{conv}$ )	24-48V
Frequência de Chaveamento ( $f_s$ )	16.6 kHz
Corrente de Operação ( $I_{conv}$ )	100-400 A

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O conversor apresenta características especiais, tais como:

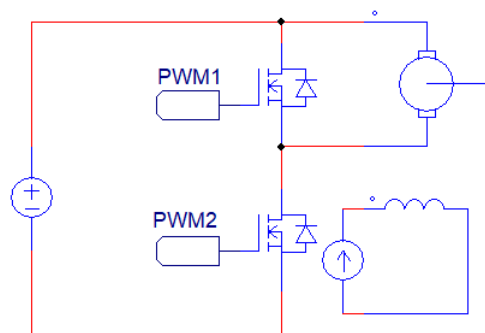
1. Os parâmetros de desempenho podem ser ajustados via software, como os tempos de aceleração e desaceleração (rampas), limitações de tensão, torque e corrente máximos do motor;
2. O conversor possui vários transistores em paralelo, representados por S1 e S2 na Figura 24, para que o conversor suporte elevadas correntes de motor (400 A), atribuindo robustez e confiabilidade;
3. O conversor possui um banco de capacitores internos, instalados muito próximo dos transistores, para que as indutâncias dos cabos de alimentação não resultem em sobretensões nas chaves, podendo levar a sua queima.

No *Kelly KDZ 48401*, a conexão com o motor é feita através da chave superior do braço ativo, em contraste com a configuração mais comum descrita na literatura, representado anteriormente na Figura 24, onde a carga geralmente se conecta à chave inferior. Isso tem o efeito prático de que o motor possui um dos seus terminais ligados ao positivo do banco de bateria e não ao negativo, e a razão cíclica é estabelecida para a chave conectada ao negativo do barramento, com a chave oposta operada complementarmente. Porém esta forma de operação não altera as demais características, sendo imperceptível ao usuário.

### 3.2.1 SIMULAÇÃO DO *KELLY KDZ CONVERTER*

No *PSIM*<sup>®</sup>, montou-se o circuito equivalente do conversor bidirecional utilizando os modelos ideais das chaves da topologia, como mostrado na Figura 28. As chaves utilizadas são transistores de efeito de campo conhecido na literatura como *Metal Oxide Field Effect Transistor* (MOSFET). Os *MOSFETs* foram escolhidos para a simulação pela característica do diodo anti-paralelo à chave, capaz de proporcionar a função de bidirecionalidade.

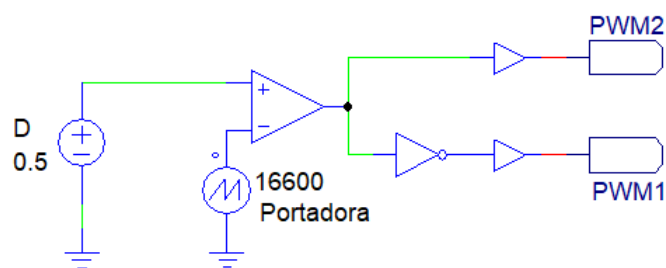
Figura 28 – Circuito de potência do conversor no *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O circuito de comando PWM, utilizado para fazer o acionamento dos *MOSFETs*, apresentado na Figura 29, é projetado usando o bloco comparador do *PSIM*<sup>®</sup> que faz a comparação entre dois sinais de entrada, conhecido como portadora e modulante ou sinal de referência.

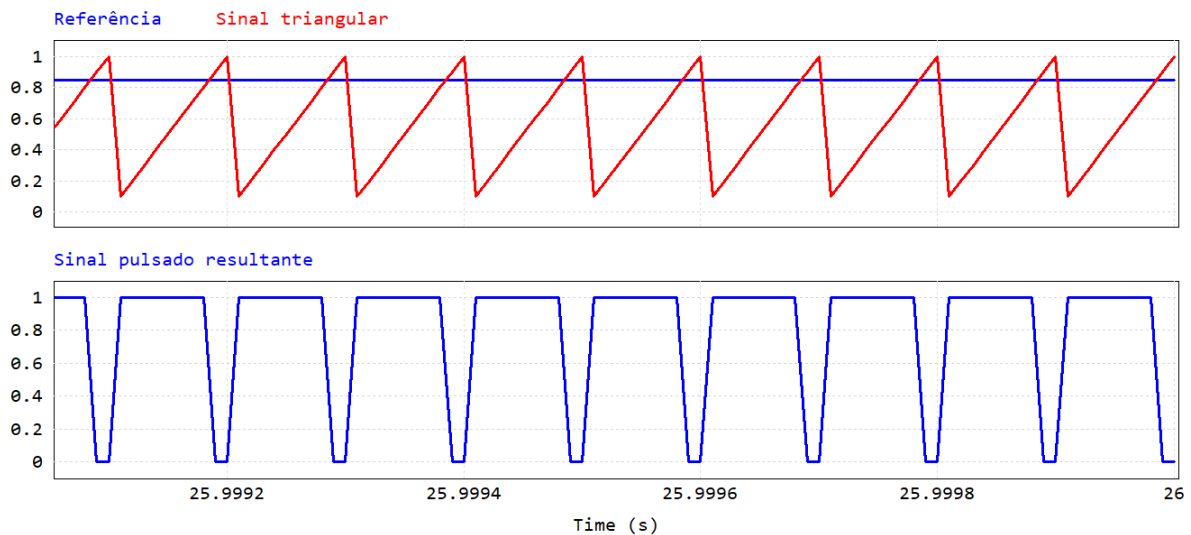
Figura 29 – Circuito de comando do conversor no *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O sinal modulante é o próprio sinal de referência, visto no acelerador eletrônico do veículo, proporcional à rotação do motor, que varia de 0 até 1 sendo conectado a porta não inversora do comparador. A portadora é o sinal triangular que varia de 0 até 1 e possui a frequência  $f_s$  de chaveamento do conversor listada na Tabela 6, podendo ser vista na Figura 30.

Figura 30 – Sinal da portadora na porta inversora e sinal resultante do modulador por largura de pulso (PWM).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O sinal resultante obtido na saída do comparador é uma onda quadrada de amplitude limitada a 0 ou 1, ilustrado na Figura 30. Esse sinal de alta frequência é o comando das chaves do conversor eletrônico, gerando um nível médio de saída capaz de controlar a velocidade de rotação do motor.

Na prática, este sinal de saída por si só não possui capacidade de acionar os *MOSFETs* do circuito de potência, necessitando de um circuito intermediário para acionamento, conhecido na literatura como *driver* (Barbi, 2010). O software *PSIM*<sup>®</sup> facilita essa interface utilizando o bloco "*On-off Controller*", conectado em série com a saída do bloco comparador, conforme mostrado na Figura 29. Uma vez caracterizado o conversor, é necessário compreender a fonte de energia que o alimenta.

### 3.3 FONTE DE ENERGIA: BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO

Por fim, a fonte de energia do e-Kart são quatro baterias de chumbo-ácido da marca *Moura*, conforme mostra a Figura 31. Cada bateria possui tensão nominal de 12V e capacidade de fornecimento de energia de 60 Ah em modo de descarga e estão associadas em série, totalizando 48V nominais no sistema.

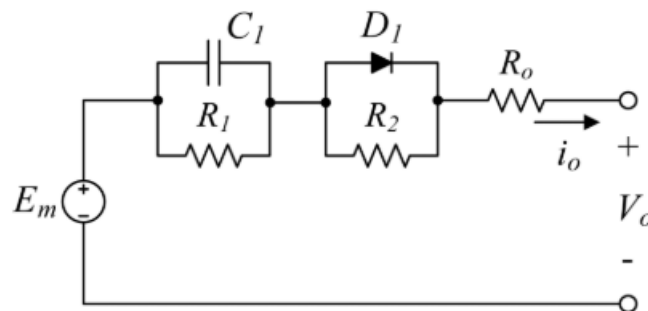
Figura 31 – Baterias *Moura* de chumbo-ácido do e-Kart.



Fonte: Catálogo Moura, 2024.

As baterias de chumbo possuem diversos modelos elétricos representativos que simulem o processo de carga e descarga. Para este trabalho, modelo elétrico escolhido foi o de dupla polarização que segue as referências vistas em (Moraes, 2020), (Jackey, 2007) (Ceraolo, 2000), sendo representado na Figura 32.

Figura 32 – Circuito equivalente das baterias de Chumbo.



Fonte: (Ceraolo, 2000)

Observando o circuito equivalente, nota-se que será necessário definir os valores de cinco principais componentes, sendo eles:

- **Tensão de Circuito Aberto ( $E_m$ ):** A tensão da bateria que descarrega-se com a utilização, depende da temperatura e do estado de carga.
- **Resistência dos terminais ( $R_o$ ):** Resistência vista pelos terminais das baterias, optou-se por manter fixo em  $5m\Omega$ .

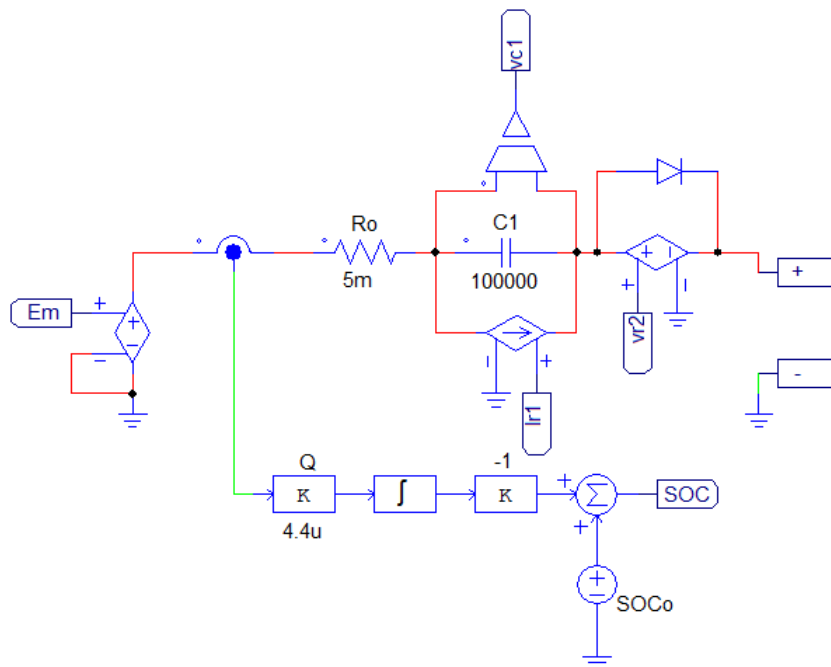
- **Resistência do Ramo Principal ( $r_1$ ):** Aumenta exponencialmente e depende exclusivamente do estado de carga da Bateria.
- **Resistência Interna ( $r_2$ ):** Varia exponencialmente com o estado de carga e a corrente que está passando na bateria.
- **Capacitância do Ramo Principal ( $C_1$ ):** Representa a capacidade da bateria de armazenar e fornecer energia.
- **Diodo Bypass ( $D_1$ ):** A Resistência  $R_2$  não tem interferência significativa durante o processo de descarga, sendo contornada com uso do diodo.

Como visto em (Jackey, 2007) esses são os principais parâmetros a serem relatados e têm seus valores representados conforme se verá na seção a seguir de simulação do modelo.

### 3.3.1 MODELO DE SIMULAÇÃO - BATERIA 12V

O modelo de simulação da bateria no *PSIM*<sup>®</sup> é extenso e possui amplo dimensionamento matemático baseado em equações obtidas em (Ceraolo, 2000; Jackey, 2007), de modo que o modelo da Figura 32 possa ser descrito de acordo com a Figura 33.

Figura 33 – Simulação da bateria de chumbo.



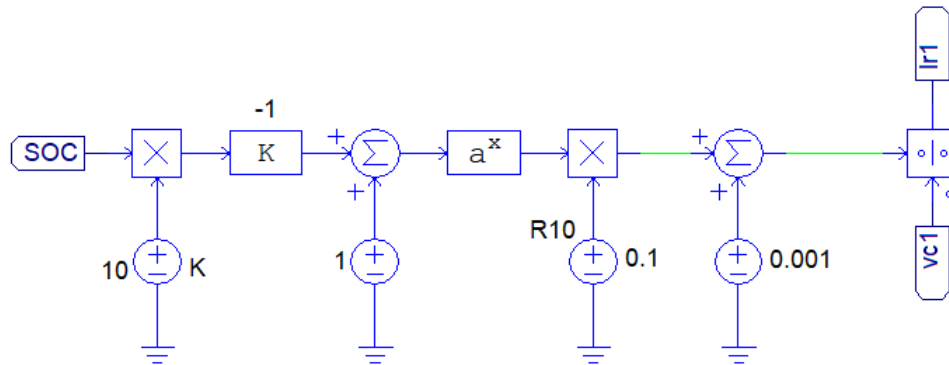
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nota-se que as resistências  $r_1$  foi elaborada a partir de uma fonte de corrente controlada por tensão e a  $r_2$  elaborada com uma fonte de tensão controlada por tensão. Esses valores podem ser obtidos partir das equações 39 e 40 e modeladas dentro do software conforme demonstrado nas Figuras 34 e 35.

$$r_1 = 0,1 \cdot e^{1-10 \cdot SOC} \quad (39)$$

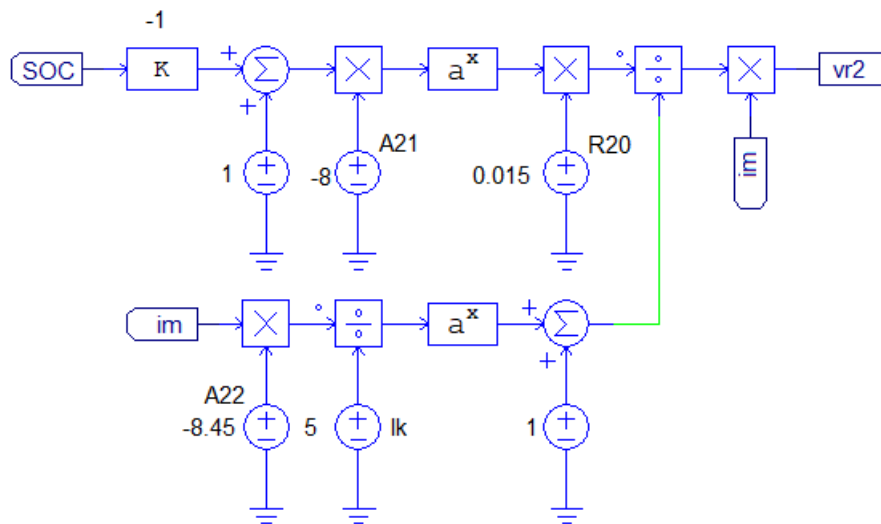
$$r_2 = 0,015 \cdot \frac{e^{-8 \cdot (1-SOC)}}{1 + e^{-8,45 \cdot i_{bat}(t)/5}} \quad (40)$$

Figura 34 – Modelo de resistência  $r_1$  baseado na Equação 39.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 35 – Modelo de resistência  $r_2$  baseado na Equação 40.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No modelo das figuras apresentadas acima, há sensores que monitoram tensão, corrente e estado de carga e realimentam a interdependência existente na resistência  $r_1$  e  $r_2$ .

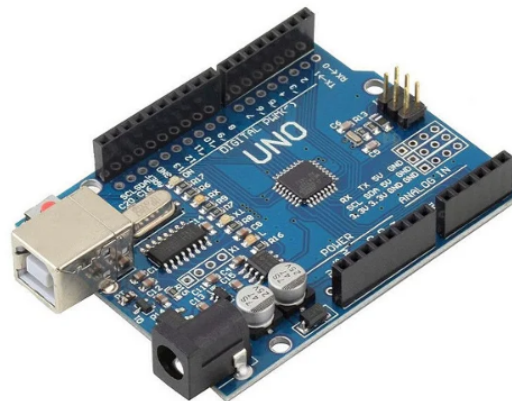
## 4 VALIDAÇÃO DA CARGA SIMULADA

O sistema de sensoriamento empregado neste trabalho foi baseado no projeto desenvolvido em (Walt, 2019) para instrumentação de um kart elétrico, sendo adaptado e ajustado para atender aos objetivos de validação experimental da carga simulada. O sistema foi configurado para medir corrente e tensão do motor, possibilitando o cálculo da potência e torque exigidos durante o percurso e fornecendo o sinal de referência de rotação utilizado nas simulações computacionais realizadas no *software PSIM*<sup>®</sup>.

### 4.1 SISTEMA DE SENSORIAMENTO

O sistema de sensoriamento tem como objetivo realizar a aquisição das principais variáveis elétricas e mecânicas do kart, de modo a obter dados experimentais que permitam a validação do modelo simulado. As medições contemplam a tensão aplicada ao motor e a corrente de armadura, grandezas suficientes para determinar o comportamento dinâmico da carga durante o percurso. A unidade central de aquisição e processamento de dados foi implementada utilizando uma placa *Arduino Uno*, equipada com o microcontrolador ATmega328P, amplamente utilizados em sistemas embarcados.

Figura 36 – Placa de desenvolvimento *Arduino Uno*.



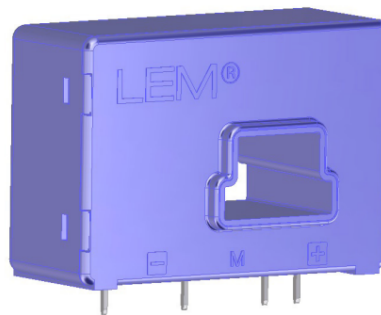
Fonte: (ELETROGATE, 2025)

O ATmega328P possui conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits, permitindo a amostragem de sinais com resolução adequada para as grandezas medidas neste projeto. O sistema foi programado em linguagem C por meio do ambiente de desenvolvimento *Arduino IDE*, com rotinas de leitura periódica dos canais analógicos e temporização para o cálculo de rotação em tempo real, conforme apresentado no **Apêndice A**. A alimentação foi realizada a partir de uma fonte auxiliar de 12V, garantindo isolamento elétrico entre o sistema de sensoriamento e o circuito de potência do kart.

#### 4.1.1 SENSORES UTILIZADOS

A medição da corrente do motor foi realizada utilizando um sensor de efeito Hall modelo LA 200-P, fabricado pela *LEM International SA*, ilustrado na Figura 37. O sensor permite medir correntes contínuas, alternadas ou pulsadas, com isolamento galvânico entre o circuito de potência e o de medição, característica essencial para aplicações automotivas. Sua corrente nominal é de 200A eficazes, se energizado a tensão de alimentação simétrica de 12V. O sinal de saída é proporcional à corrente primária, fornecendo 100mA eficazes na bobina secundária para cada 200A eficazes de corrente medida.

Figura 37 – Sensor hall LA 200P da *LEM*.



Fonte: (LEM, n.d.)

Neste trabalho, o LA 200-P foi utilizado no modo compensado, com a corrente secundária convertida em tensão através de um resistor de carga (shunt) de  $27\Omega$  conectado à saída do sensor. Esse valor foi escolhido de modo a manter a faixa de tensão de saída dentro dos limites de leitura do circuito de aquisição, garantindo boa resolução e baixo ruído.

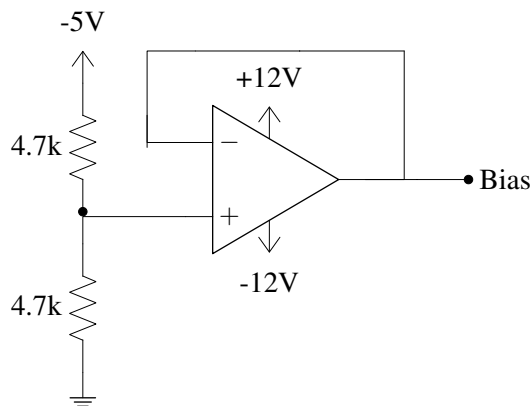
Para a medição de tensão, não foi empregado um sensor dedicado, uma vez que a própria tensão aplicada ao motor é utilizada como entrada direta no circuito de condicionamento de sinal, descrito na seção posterior. A medição é feita a partir dos terminais do motor de tração, cujos valores são reduzidos e adequados à faixa de leitura do conversor analógico-digital por meio de um circuito divisor e filtragem passiva.

#### 4.1.2 CONDICIONAMENTO DOS SINAIS

O sinal de saída do sensor *hall* é uma corrente proporcional à corrente que circula pela armadura do motor, podendo assumir valores positivos e negativos conforme o modo de operação do conversor (tração ou regeneração). Como o conversor analógico-digital do microcontrolador opera na faixa de 0 a 5V, foi necessário implementar um condicionamento de sinal em duas etapas (Walt, 2019).

Na primeira etapa, vista na Figura 38, um divisor de tensão é conectado a um amplificador operacional na configuração conhecida como *buffer* seguidor de tensão, responsável por somar uma referência de 2,5V que será somado ao sinal proveniente do sensor. Assim, correntes nulas correspondem a aproximadamente 2,5V, enquanto correntes positivas elevam o valor e correntes negativas o reduzem. O circuito da Figura 38 é composto por um divisor de tensão e por um seguidor de tensão, que permite fornecer uma tensão de 2,5V e uma corrente de saída no terminal *Bias*, sem alterar o equilíbrio do divisor.

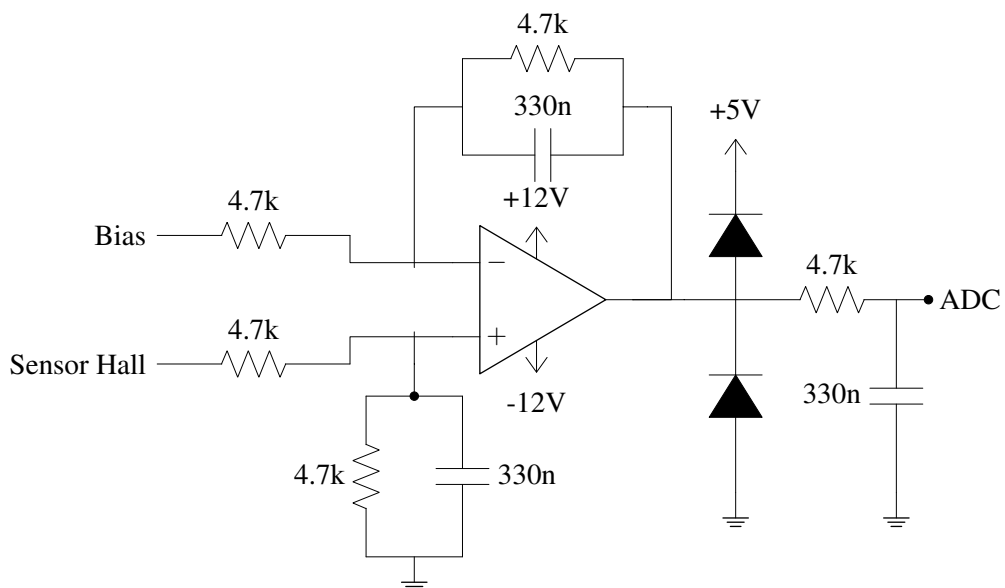
Figura 38 – Circuito *buffer* para condicionamento de sinal de corrente.



Fonte: Adaptado de (Walt, 2019)

Na segunda etapa, indicada pelo circuito da Figura 39, o sinal referenciado em 2,5V é aplicado a um amplificador operacional não inversor, responsável por ajustar o ganho e limitar a banda passante do sinal.

Figura 39 – Circuito subtrator para condicionamento de sinal de corrente.

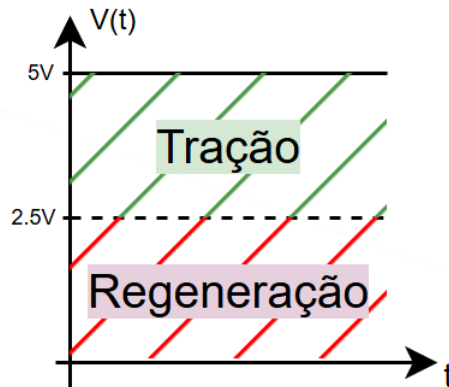


Fonte: Adaptado de (Walt, 2019)

Na saída desse estágio foi implementado um filtro passa-baixa com frequência de corte de aproximadamente 100Hz, que atenua o ruído proveniente do chaveamento do conversor PWM sem afetar as variações dinâmicas de torque e corrente.

O ganho é configurado de modo que a corrente no motor utilize toda a faixa de 0 a 5V disponível no microcontrolador, otimizando a resolução de leitura como ilustra a Figura 40.

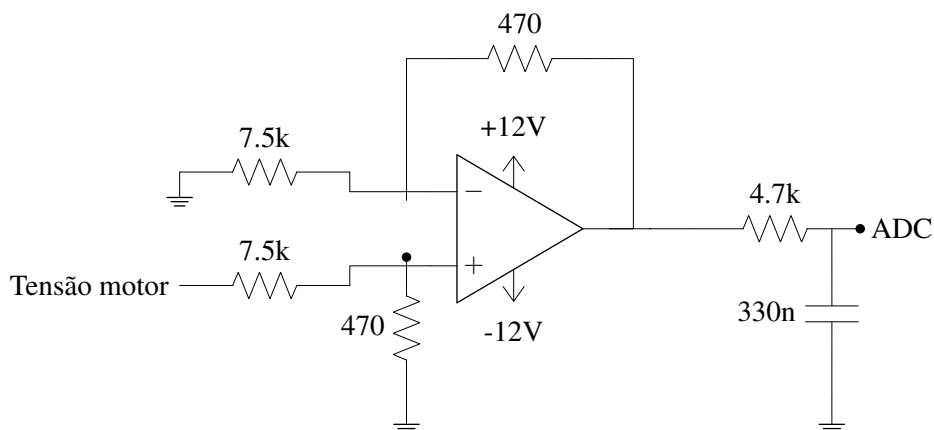
Figura 40 – Interpretação da leitura de corrente no conversor analógico digital.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A medição da tensão aplicada ao motor foi realizada por meio de um circuito de condicionamento de sinal. Neste caso, o circuito tem a função de reduzir a amplitude da tensão dos terminais do motor, que pode atingir até 48V, para a faixa de 0 a 5V compatível com o conversor analógico-digital do microcontrolador (Walt, 2019). O circuito utiliza a configuração de um amplificador diferencial do tipo subtrator, apresentada na Figura 41, com uma das entradas aterrada. Essa topologia permite realizar a redução de amplitude de forma linear e com boa rejeição de ruído de modo comum, garantindo a integridade do sinal medido. Os valores dos resistores foram dimensionados para que o ganho do amplificador limite a saída a 5V quando o motor opera em sua tensão máxima.

Figura 41 – Circuito subtrator para condicionamento de sinal de tensão.

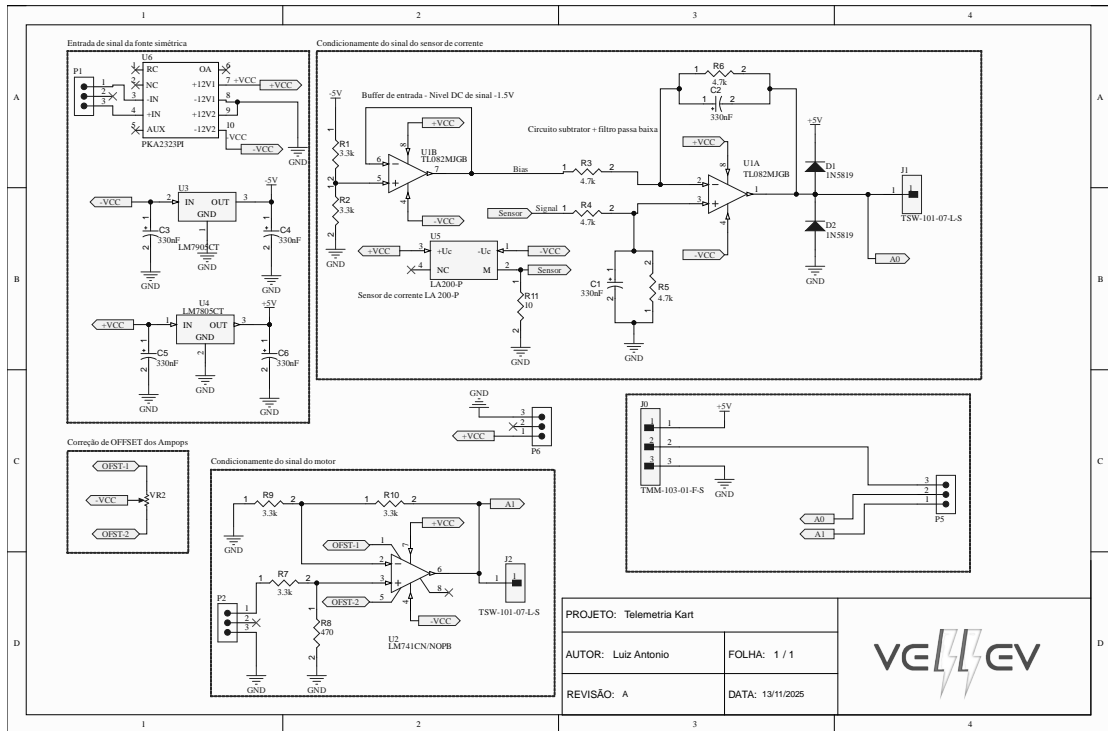


Fonte: Adaptado de (Walt, 2019), 2025

Na saída do subtrator foi adicionado um filtro passa-baixa RC, responsável por atenuar o ruído de alta frequência proveniente do chaveamento do conversor bidirecional. O sinal resultante é uma representação contínua e filtrada da tensão aplicada ao motor, adequada para leitura pelo Arduino Uno e análise posterior no processo de validação experimental.

O esquemático desenvolvido da placa de medição é apresentado na Figura 42:

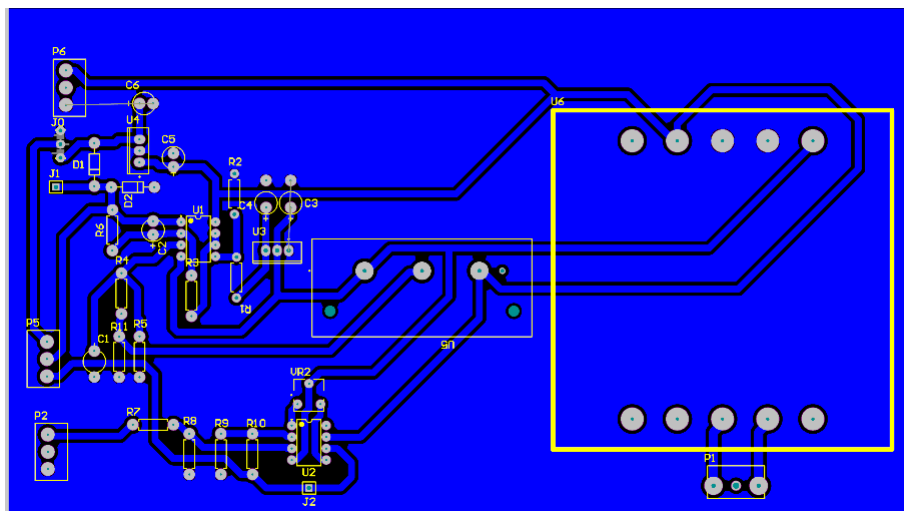
Figura 42 – Esquemático do projeto da placa eletrônica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O layout da placa de circuito impresso (PCI) está mostrado na Figura 43:

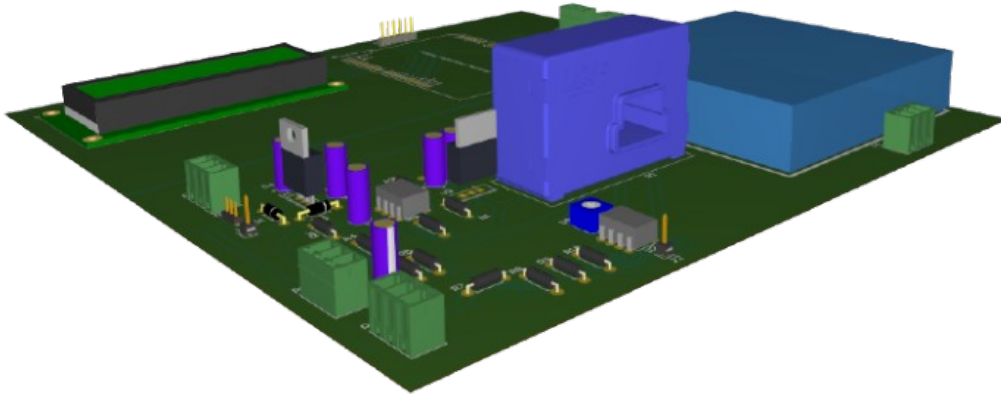
Figura 43 – Layout do projeto da placa eletrônica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Essa placa é uma adaptação simplificada do que já foi validado em (Walt, 2019). O desenvolvimento dela é um elemento prático na elaboração deste trabalho. Somente por uma questão visual de projeto a Figura 44 mostra uma visualização tridimensional do projeto:

Figura 44 – Visualização 3D do projeto da placa eletrônica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 4.1.3 INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

A coleta e o armazenamento dos dados experimentais foram realizados utilizando um módulo de cartão SD, mostrado na Figura 45, compatível com a interface serial periférica do microcontrolador.

Figura 45 – Módulo de gravação em cartão de memória.

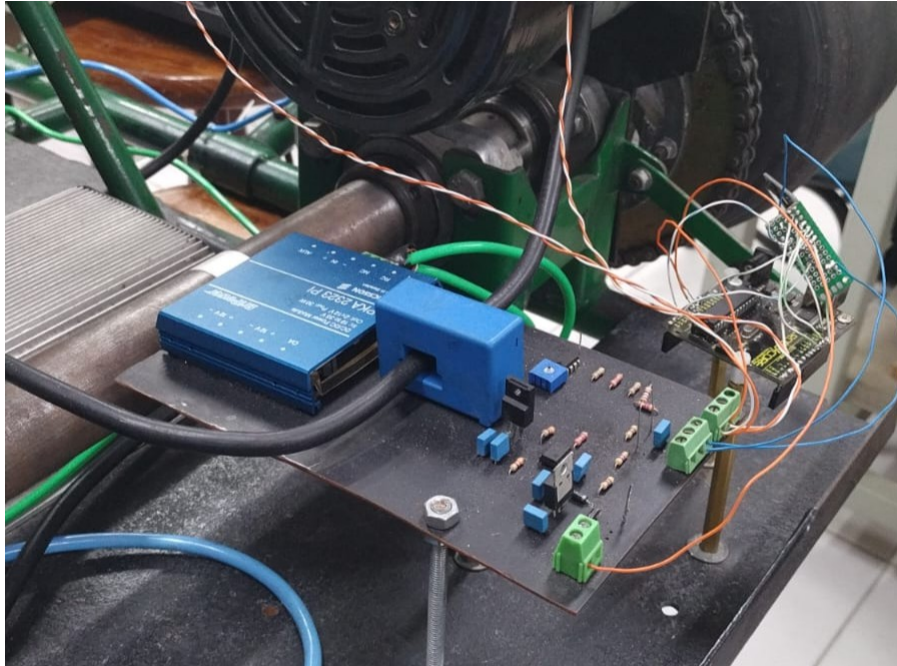


Fonte: (ELETROGATE, 2025)

O módulo foi configurado para registrar os valores de corrente e tensão medidos em intervalos regulares, salvando-os em um arquivo de texto no cartão SD. Essa solução permitiu a gravação autônoma dos dados durante os testes, eliminando a necessidade de comunicação com um computador e garantindo a integridade das amostras coletadas para posterior análise.

O sistema de aquisição foi integrado na placa de medição desenvolvida para este projeto, montada e embarcada na parte traseira do veículo, como mostra a Figura 46 e no vídeo exemplo.

Figura 46 – Placa de medição desenvolvida embarcada no kart.



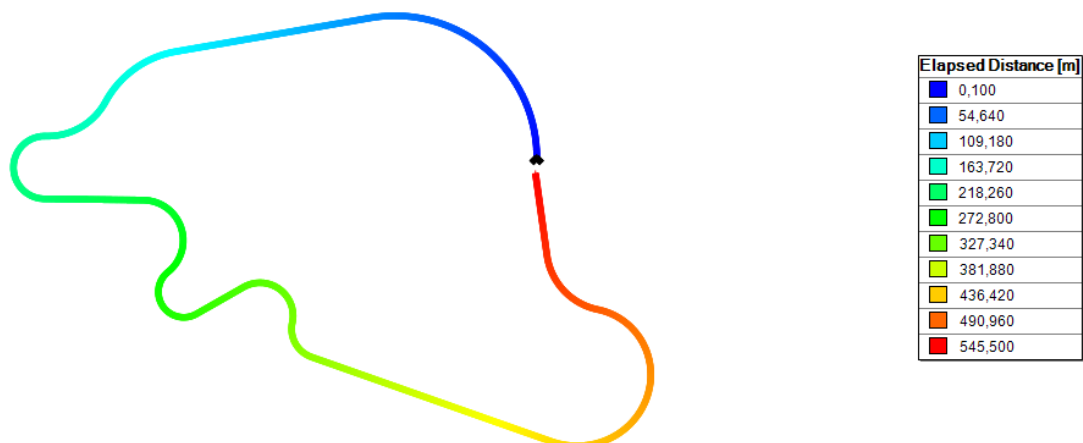
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

## 4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

A coleta de dados experimentais foi realizada durante uma volta completa no Kartódromo Internacional de Joinville, utilizando o veículo do projeto VELLEVO. O trajeto não teve como objetivo otimizar o desempenho ou reproduzir condições de competição, mas apenas registrar o comportamento elétrico do sistema em condições reais de funcionamento. O percurso utilizado corresponde ao traçado da pista do kartódromo, conforme mostrado na Figura 47, que serviu de base para a identificação do trecho e correlação com os dados medidos.

Figura 47 – Trajeto executado na pista do Kartódromo.

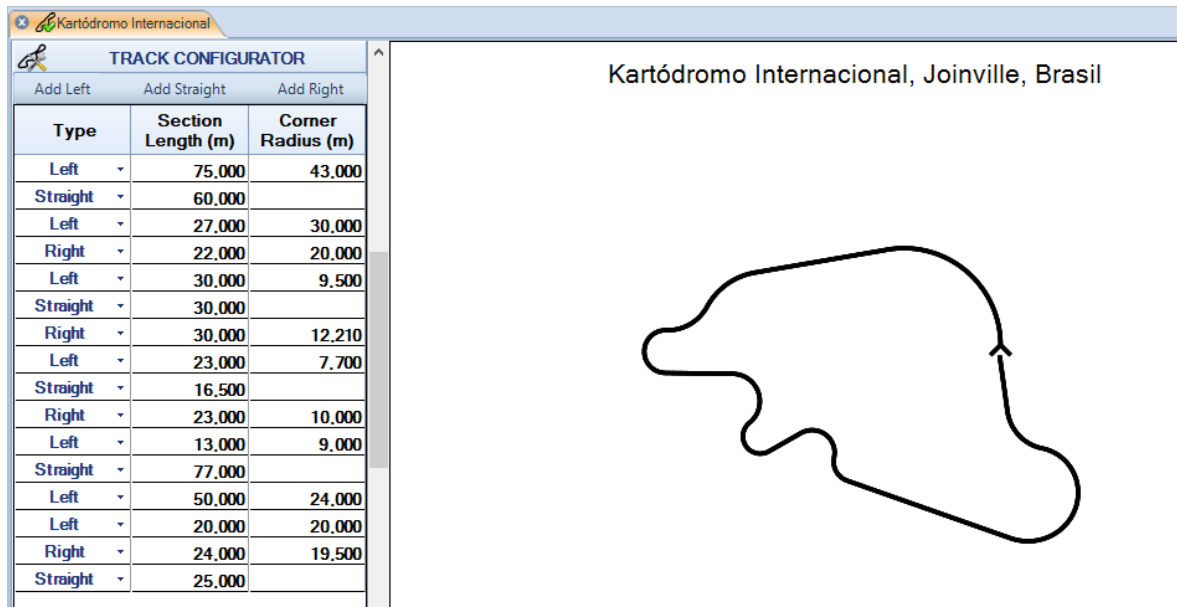
Kartódromo Internacional, Joinville, Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para desenhar o trajeto desta pista no *OptimumLap*, foram realizadas medidas no próprio local, considerando o caminho feito pelo veículo no meio da pista. No *software* os parâmetros a serem inseridos para o desenho são o tamanho da seção em metros e o raio de curvatura de seção em graus. Desse modo, utilizando-se de uma trena, foi possível coletar os valores aproximados de cada seção real para composição total da pista e inseri-los no *software*, como mostra a Figura 48.

Figura 48 – Aba de inserção dos dados de distância da pista no *OptimumLap*



Type	Section Length (m)	Corner Radius (m)
Left	75,000	43,000
Straight	60,000	
Left	27,000	30,000
Right	22,000	20,000
Left	30,000	9,500
Straight	30,000	
Right	30,000	12,210
Left	23,000	7,700
Straight	16,500	
Right	23,000	10,000
Left	13,000	9,000
Straight	77,000	
Left	50,000	24,000
Left	20,000	20,000
Right	24,000	19,500
Straight	25,000	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

#### 4.2.1 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os sinais monitorados foram tensão e corrente no motor elétrico, obtidos a partir do sistema de aquisição desenvolvido e embarcado no veículo, descrito anteriormente. A aquisição foi realizada pelo microcontrolador, que efetuava leituras instantâneas a cada 50 milissegundos (50 ms), gravando os valores em um arquivo de texto armazenado em um cartão de memória SD. Dessa forma, foi possível registrar a evolução temporal das principais grandezas elétricas ao longo de toda a volta. Durante a coleta, não foi aplicado nenhum tipo de filtro digital, os valores registrados correspondiam às amostras diretas obtidas pelo conversor analógico-digital do microcontrolador.

Após o ensaio, os dados foram transferidos e organizados em uma planilha no *software Google Sheets*, como pode ser visto na Figura 49, onde foi realizada uma etapa preliminar de tratamento, em que, foram removidos os períodos iniciais de medição nos quais o veículo ainda se encontrava parado, eliminando valores nulos que não representavam nada significativo.

Figura 49 – Dados coletados na planilha do *Google Sheets*.

1	Tempo ajust	tensão	corrente	torque	power	speed rads motor	speed rpm motor	rpm sugerido em tensão	speed rpm kart	vel kmh	razão cíclica
15	0.812	0.91	109.5975	11.18341837	99.733725	8.918	85.17669532	85.0395	17.67151355	0.832593361	0.0187994825
16	0.876	1.26	116.8425	11.92270408	147.22155	12.348	117.9369628	117.747	24.46624953	1.152821577	0.0260300527
17	0.939	1.76	119.1825	12.16147959	209.7612	17.248	164.7373448	164.472	34.17787236	1.610290456	0.03635943869
18	1.003	2.82	119.1825	12.16147959	336.09465	27.636	263.9541547	263.529	54.76227277	2.580124481	0.05825773698
19	1.066	2.82	116.8425	11.92270408	329.49585	27.636	263.9541547	263.529	54.76227277	2.580124481	0.05825773698
20	1.131	2.97	119.88	12.23265306	356.0436	29.106	277.9942693	277.5465	57.67515961	2.717365145	0.06135655278
21	1.194	4.33	118.7175	12.11403061	514.046775	42.434	405.2913085	404.6385	84.08533371	3.961680498	0.08945248267
22	1.259	4.33	113.1075	11.54158163	489.755475	42.434	405.2913085	404.6385	84.08533371	3.961680498	0.08945248267
23	1.321	5.44	110.3025	11.25535714	600.0456	53.312	509.1881566	508.368	105.6406964	4.977261411	0.1123837196
24	1.385	4.63	111.705	11.39846939	517.19415	46.374	433.3715377	432.6735	89.91110741	4.236161826	0.09565011427
25	1.448	4.73	105.1575	10.73035714	497.394975	46.354	442.7316141	442.0185	91.85303198	4.327655602	0.09771599147
26	1.512	4.88	132.0215	13.47158163	644.26492	47.824	456.7717287	456.036	94.76591883	4.464896266	0.1008148073
27	1.575	4.43	132.905	13.56173469	588.76915	43.414	414.6513849	413.9835	86.02725828	4.053174274	0.09151835987
28	1.64	4.83	135.5745	13.83413265	654.824835	47.334	452.0916905	451.3635	93.79495654	4.419149378	0.09978186866
29	1.703	3.83	138.2345	14.10556122	529.438135	37.534	358.4909265	357.9135	74.37571088	3.504211618	0.07912309668
30	1.768	7.45	143.564	14.64938776	1069.5518	73.01	697.3256925	696.2025	144.6733802	6.816286307	0.1539078513
31	1.832	7.85	144.153	14.7094898	1131.60105	76.93	734.7659981	733.5825	152.4410784	7.182261411	0.16217136
32	1.896	8.41	142.975	14.58928571	1202.41975	82.418	787.182426	785.9145	163.315856	7.694626556	0.1737402724
33	1.96	8.86	146.224	14.92081633	1295.54464	86.828	829.3027698	827.967	172.0545166	8.106348548	0.1830367197
34	2.025	8	150.0715	15.31341837	1200.572	78.4	748.8061127	747.6	155.3539653	7.319502075	0.1652701758
35	2.088	8.76	141.7875	14.46811224	1242.0585	85.848	819.9426934	818.622	170.112592	8.014854772	0.1809708425
36	2.154	10.12	133.5035	13.62280612	1351.05542	99.176	947.2397326	945.714	196.5227661	9.259170124	0.2090667724
37	2.217	8.96	166.7	17.01020408	1493.632	87.808	838.6628462	837.312	173.9964411	8.197842324	0.1851025969
38	2.282	8.56	145.275	14.82397959	1243.554	83.888	801.2225406	799.932	166.2287429	7.83186722	0.1768390882
39	2.345	9.92	142.1625	14.50637755	1410.252	97.216	928.5195798	927.024	192.638917	9.076162573	0.204935018
40	2.41	9.16	140.2125	14.30739796	1284.3465	89.768	857.382999	856.002	177.8802903	8.380829876	0.1892343513
41	2.475	10.37	125.4125	12.79719388	1300.527625	101.626	970.6399236	969.0765	201.3775775	9.487904564	0.2142314654
42	2.539	9.87	118.4	12.08163265	1168.608	96.726	923.8395415	922.3515	191.6679547	9.030435685	0.2039020794
43	2.602	9.72	114.125	11.64540816	1109.295	95.256	909.7994269	908.334	188.7550678	8.893195021	0.2008032636
44	2.665	9.77	114.125	11.64540816	1115.00125	95.746	914.4794651	913.0065	189.7260301	8.938941909	0.2018362022
45	2.729	10.42	113.3375	11.56505102	1180.97675	102.116	975.3199618	973.749	202.3485398	9.533651452	0.2152644404

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

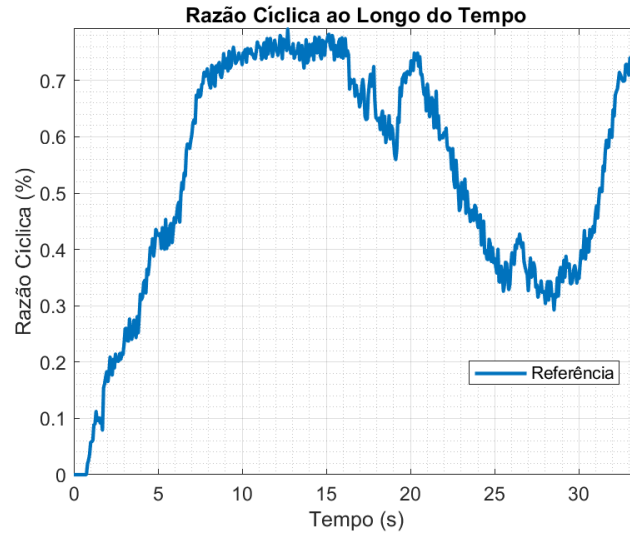
#### 4.2.2 DEFINIÇÃO DO SINAL DE ROTAÇÃO COMO REFERÊNCIA

O sinal de rotação utilizado como referência para a simulação foi obtido indiretamente a partir das medições experimentais de corrente e tensão no motor durante o ensaio. Com base nesses sinais, foi possível determinar a potência instantânea aplicada ao motor, dada pelo produto entre as duas grandezas. Em motores de corrente contínua a constante de torque ( $k_t$ ) relaciona diretamente o torque eletromagnético desenvolvido com a corrente de armadura. Esse parâmetro foi fornecido pelo fabricante e está apresentado na Tabela 5 do Capítulo 3. A partir da relação entre potência e torque, a rotação do motor ( $\omega_m$ ) foi obtida conforme a Equação 18, reproduzida a seguir para referência:

$$\omega_m = \frac{P_{motor}}{T_m}$$

O resultado foi expresso inicialmente em rad/s e posteriormente convertido para rotações por minuto (RPM). Em seguida, o sinal foi normalizado, como mostra a Figura 50, permitindo a utilização direta como razão cíclica de referência no circuito de controle implementado no *PSIM*<sup>®</sup>.

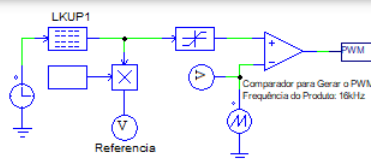
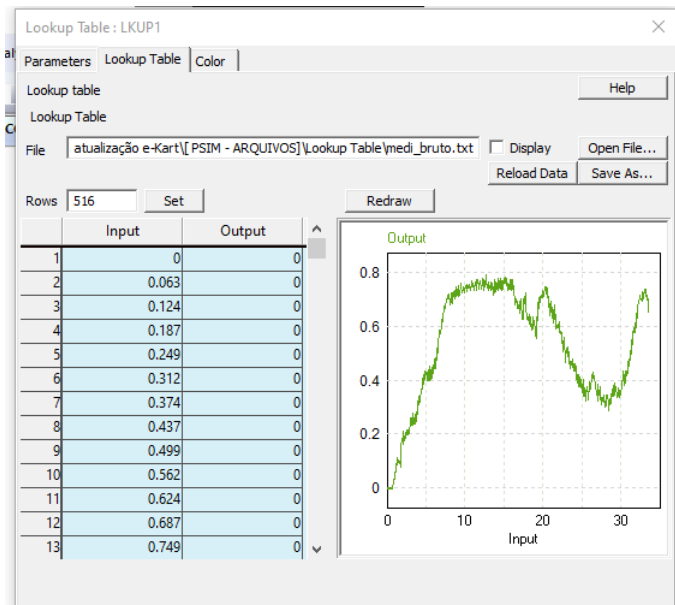
Figura 50 – Sinal de referência obtido por meio da medição.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após o tratamento, o sinal foi exportado no formato de texto e utilizado no ambiente de simulação através do bloco "Lookup Table", que permite importar dados experimentais externos e associá-los a uma variável de tempo da própria simulação, conforme mostra a Figura 51.

Figura 51 – Sinal de referência adicionado no bloco *lookup table*.

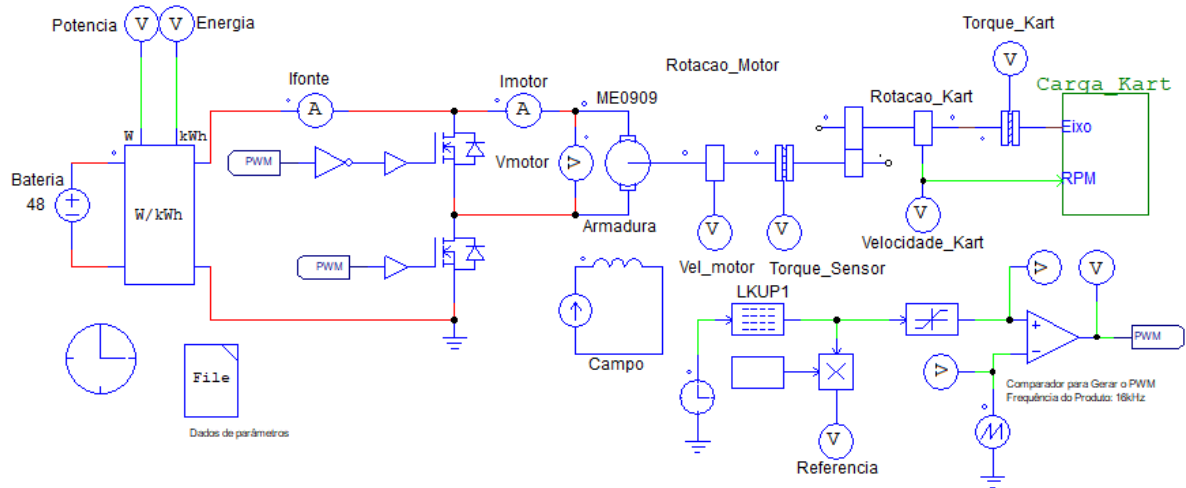


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 4.2.3 SIMULAÇÃO DO KART NO PSIM®

Com o *powertrain* descrito no capítulo anterior, une-se cada uma das partes citadas para montar a simulação ideal do e-Kart da equipe VELLEV. De acordo com cada tópico, chegamos a um único modelo de simulação demonstrado na Figura 52.

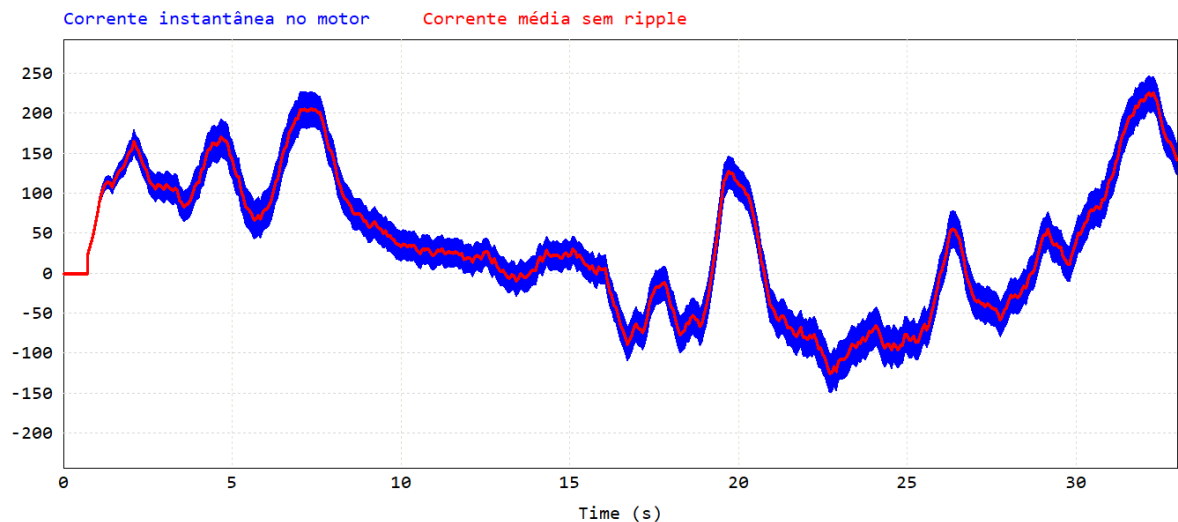
Figura 52 – Modelo de simulação do *powertrain* CC no PSIM®.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com o circuito montado no simulador pode-se encontrar as formas de onda mais relevantes para validação dos cálculos de carga. As grandezas relacionadas são: Corrente no motor; Potência no motor; Torque no motor; Velocidade de rotação do motor; Velocidade do veículo; A Figura 53 mostra o comportamento da corrente no motor CC durante a simulação.

Figura 53 – Corrente do motor no tempo.

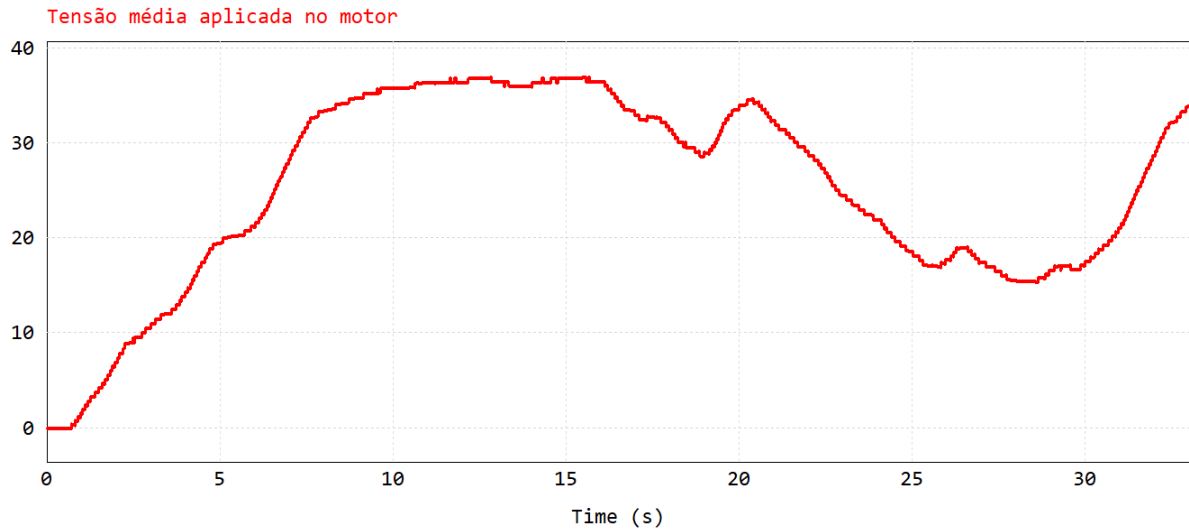


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O sinal de corrente obtido na simulação apresenta coerência com as propriedades elétricas do motor e com a capacidade de corrente do *powertrain* existente. Nos instantes iniciais, observa-se uma demanda de corrente mais elevada, correspondente ao esforço exigido para vencer a inércia do veículo parado. Após o início do movimento, a corrente diminui gradualmente, refletindo a redução do torque requerido para manter o kart em movimento.

A forma de onda da tensão média aplicada no motor é apresentada na Figura 54.

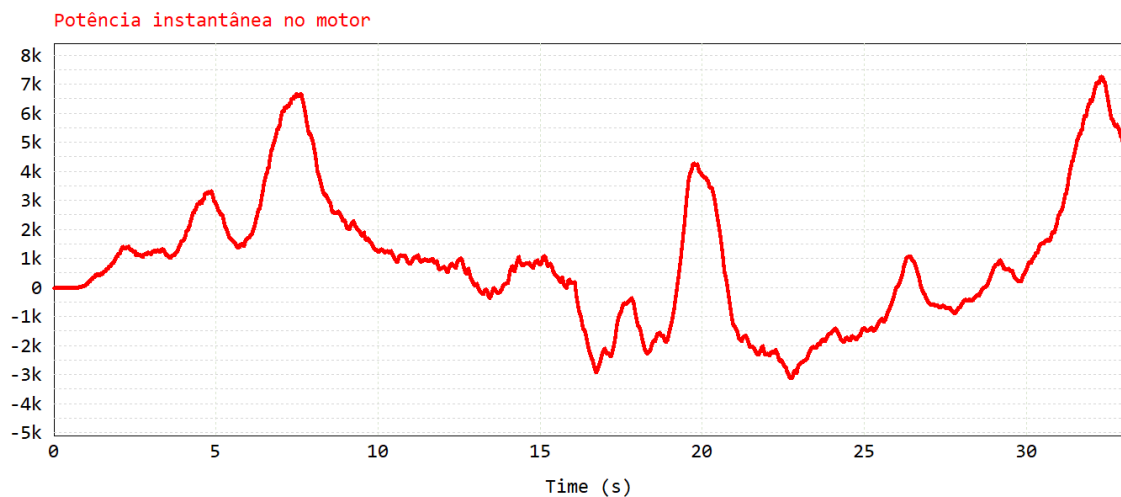
Figura 54 – Tensão média do motor no tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A tensão média aplicada ao motor acompanha a variação da razão cíclica do acelerador, a aceleração progressiva limita naturalmente os picos de corrente durante o processo de partida. A partir desses sinais, foi possível calcular a potência instantânea desenvolvida no motor, conforme ilustrado na Figura 55.

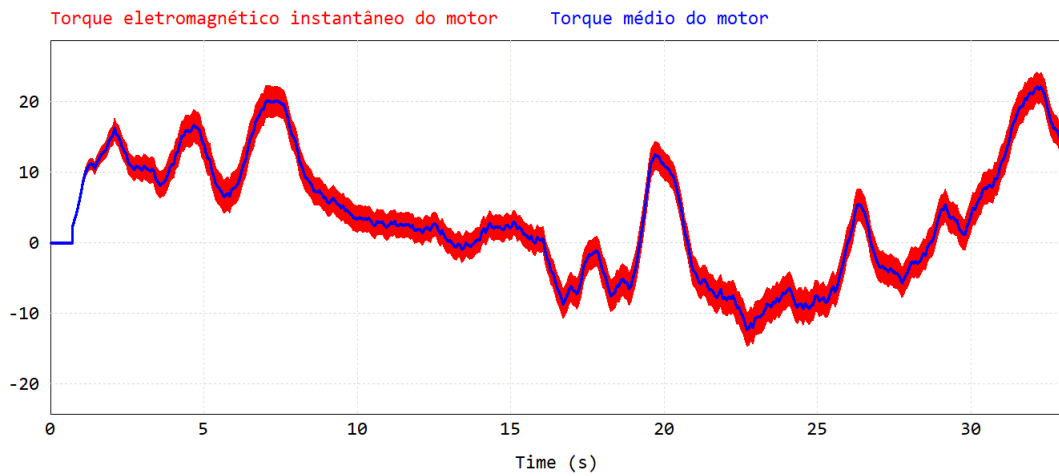
Figura 55 – Variação da potência instantânea do motor em relação ao tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O torque eletromagnético do motor é mostrado na Figura 56.

Figura 56 – Variação do torque instantâneo do motor em relação ao tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O torque simulado possui uma pequena divergência em relação a constante  $k_t$  informada pelo fabricante listada na Tabela 5, essa divergência é apresentada na Tabela 7.

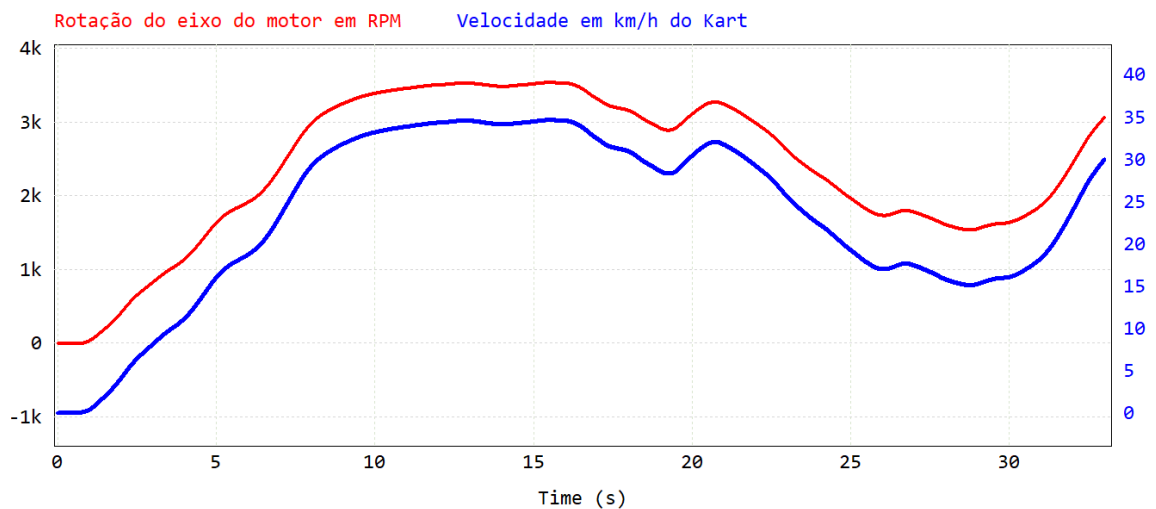
Tabela 7 – Comparação da constante de torque do motor CC.

Fabricante ( $k_t$ )	Simulado ( $k_{tmed}$ )	Erro (%)
0,101	0,098	2,97

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por fim, além das propriedades tração do motor, a Figura 57 apresentada a rotação do motor e a velocidade em  $km/h$  do kart.

Figura 57 – Variação de rotação do motor em relação ao tempo.

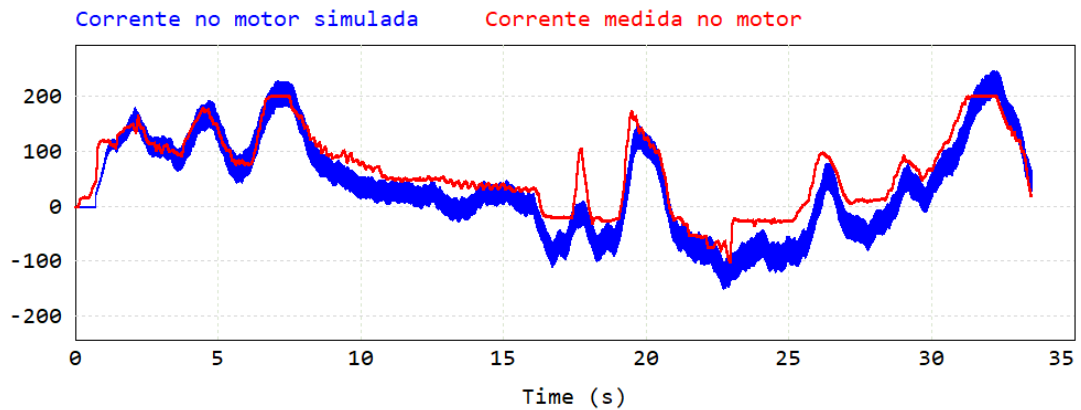


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

#### 4.2.4 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta seção tem o objetivo de validar se a carga simulada está de acordo com a realidade. Na Figura 58 é mostrado os valores de corrente no motor simulados em comparação com os dados medidos na primeira volta.

Figura 58 – Comparação dos resultados simulados e medidos de corrente no motor na primeira volta.

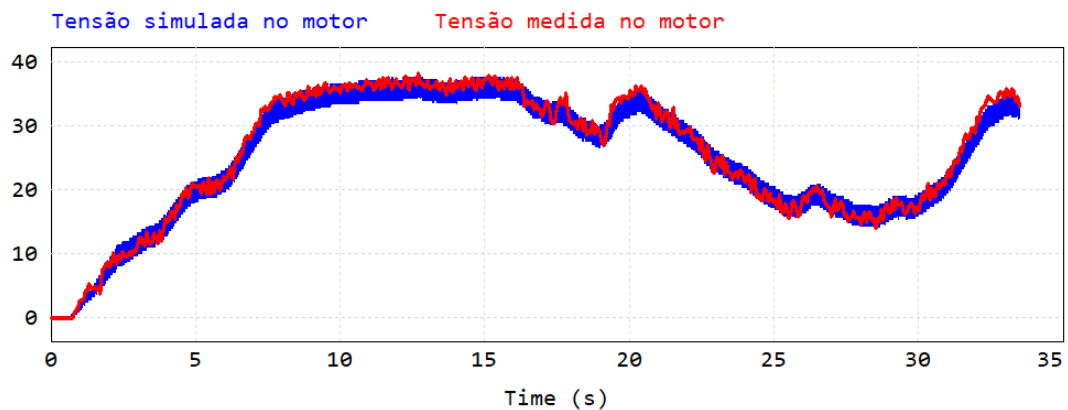


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que a corrente medida acompanha a tendência da corrente simulada, apresentando picos e vales em instantes semelhantes. As diferenças pontuais de amplitude podem ser atribuídas a não idealidades não simuladas. Nota-se também que a medição limitou-se a faixa de 200A, comportamento esperado tendo em vista a limitação de 200A eficaz do sensor de corrente.

Já a Figura 59 apresenta os valores de tensão no motor simulados em comparação com os dados medidos na primeira volta.

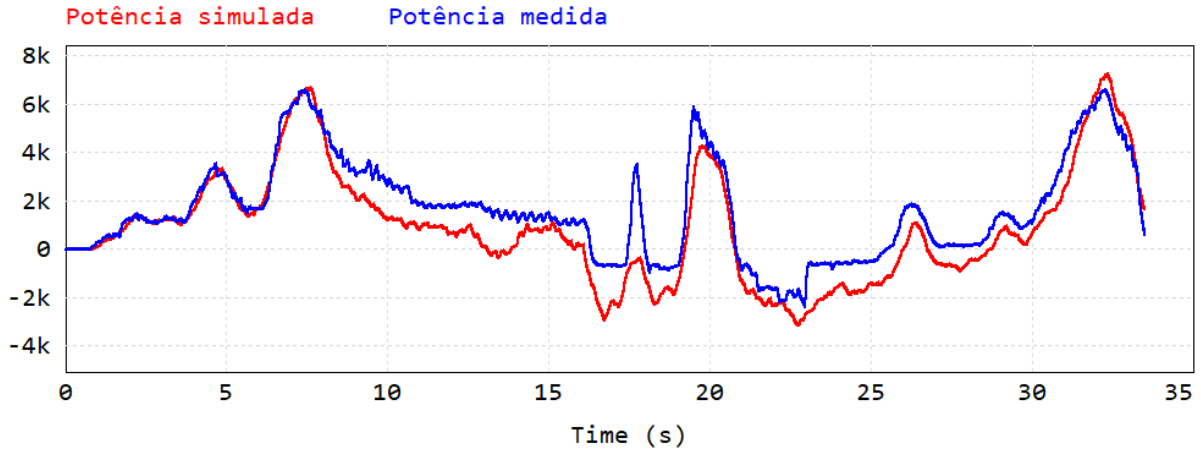
Figura 59 – Comparação dos resultados simulados e medidos de tensão no motor na primeira volta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A tensão medida apresenta pequenas oscilações em torno da curva simulada, reflexo das flutuações do sistema de medição. A simulação representa o comportamento dinâmico da tensão aplicada ao motor, confirmando a consistência do modelo elétrico adotado. Os valores de potência são mostrados conforme a Figura 60.

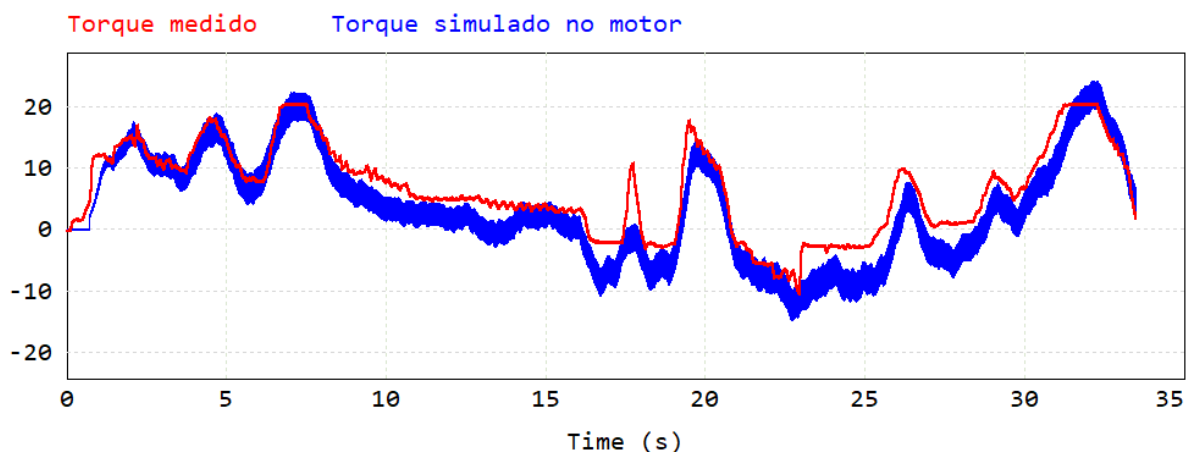
Figura 60 – Resultados simulados e medidos de potência na primeira volta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A potência simulada e a potência medida mantêm coerência temporal, com picos coincidentes nos momentos de aceleração e frenagem. No entanto, a potência medida tende a apresentar valores mais elevados nos instantes de pico que podem estar relacionados a dinâmicas não adicionadas no modelo simulado. O torque eletromagnético do motor é visto na Figura 61:

Figura 61 – Resultados simulados e medidos de torque no motor na primeira volta.

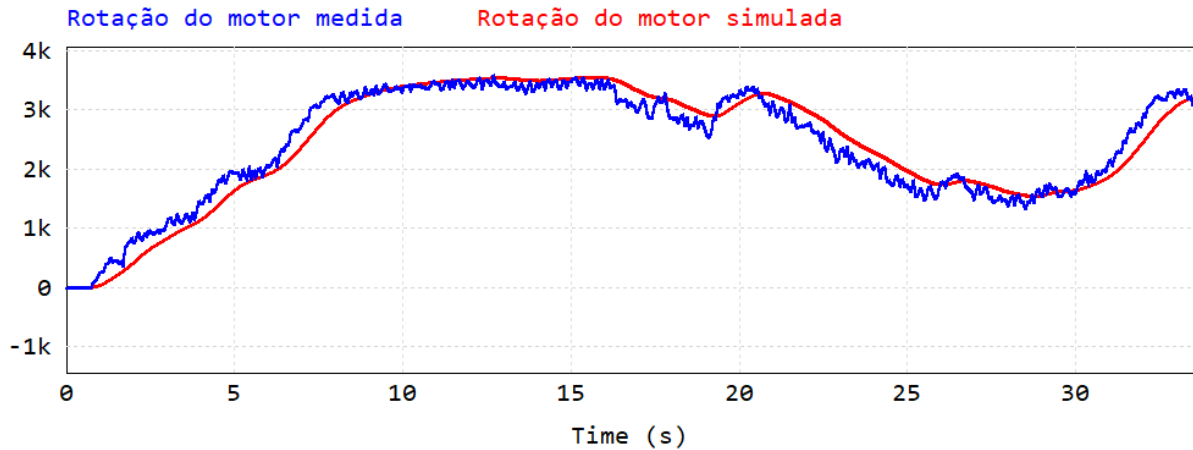


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O torque simulado e o torque calculado experimentalmente possuem o mesmo comportamento da corrente no motor, caracterizados pelas constante de torque do motor CC.

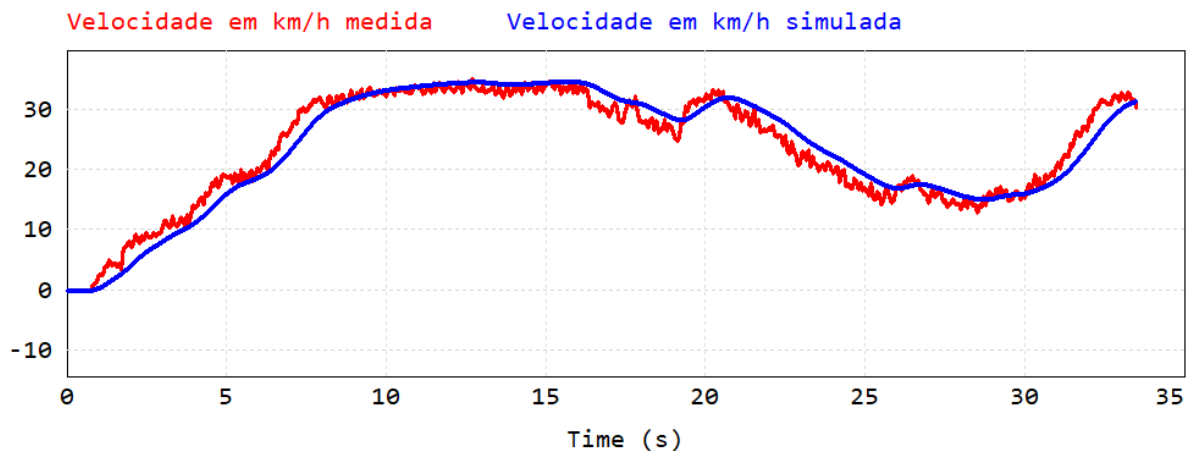
Por fim os resultados para a rotação no motor e velocidade do veículo são mostradas nas Figuras 62 e 63:

Figura 62 – Resultados simulados e calculados de rotação no motor na primeira volta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 63 – Velocidade do Kart simulada e calculada em função de corrente na primeira volta.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A rotação do motor medida e a velocidade calculada segue de forma próxima a curva simulada, reiterando que o modelo representa o comportamento dinâmico do conjunto motor-carga. Pequenas diferenças são observadas durante as transições de regime, possivelmente devido à simplificação da inércia e ao amortecimento não modelado no sistema real.

### 4.3 OBSERVAÇÕES GERAIS DO POWERTRAIN EXISTENTE

A validação do *powertrain* em corrente contínua (CC) demonstrou que o modelo implementado no *PSIM*<sup>®</sup> representa, de maneira aproximada, o comportamento real do atual sistema de tração do veículo. A comparação entre os resultados simulados e experimentais mostrou coerência entre as principais grandezas elétricas, confirmando que o modelo é adequado para a análise de desempenho e dimensionamento de futuras configurações. As medições permitiram observar variações pontuais de torque, corrente e potência ao longo das voltas, possibilitando caracterizar a demanda da carga em função do comportamento elétrico do sistema.

A Tabela 14 apresenta uma síntese comparativa entre as principais grandezas observadas nas três voltas executadas.

Tabela 8 – Comparação das grandezas medidas e simulada.

<b>Grandeza</b>	<b>Simulado</b>	<b>Medido</b>
Corrente máx. (A)	220	199,8
Tensão média (V)	36	38,31
Torque máx. (N·m)	22	20,38
Potência máx. (kW)	6800	6607,38
Vel. máx.(km/h)	36	35,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As grandezas mantêm-se dentro da faixa esperada para o conjunto motor-conversor, consolidando o modelo simulado como representativo do comportamento real. Assim, considera-se o sistema CC devidamente validado, servindo como base comparativa para a análise e desenvolvimento do sistema em corrente alternada abordado no capítulo seguinte.

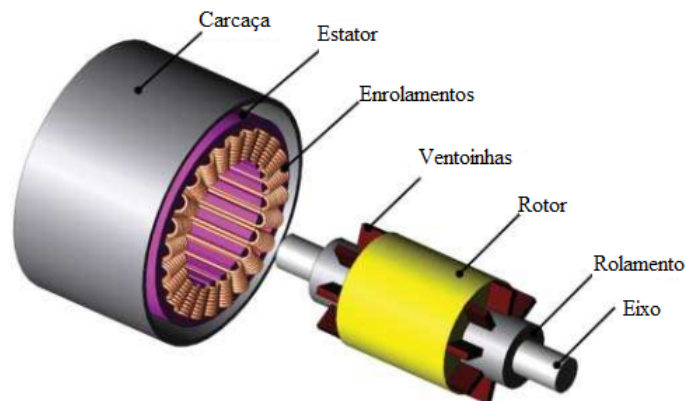
## 5 SISTEMA *POWERTRAIN* NACIONAL WEG

Em 2025 o projeto VELLEEV propôs uma melhoria técnica do *powertrain* da equipe, sendo praticamente uma nova proposta do veículo, sendo esta a motivação deste trabalho. O novo sistema aumentaria a potência nominal do veículo com o intuito de capacitar o e-Kart para uma categoria de competição de Karts de força livre. Não há uma categoria existente para Karts elétricos, embora haja interesse mútuo dos entusiastas e das Instituições de Ensino.

### 5.1 MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Motores elétricos de indução trifásicos têm se destacado como uma das principais tecnologias utilizadas em sistemas de tração elétrica, especialmente em veículos leves e aplicações industriais. Os principais elementos constituintes desse tipo de motor estão mostrados na Figura 64. Esses motores operam a partir do princípio da indução eletromagnética, onde um campo magnético rotativo, gerado pela corrente alternada trifásica no estator, induz correntes no rotor, produzindo torque.

Figura 64 – Motor CA de indução magnética.



Fonte: Adaptado de (Chau, 2015)

Os enrolamentos do rotor de um motor de indução são eletricamente em curto-circuito, geralmente construídos como barras de alumínio fundidas nas ranhuras do rotor, interligadas por anéis nas extremidades, estrutura conhecida como gaiola de esquilo. Para que o motor produza torque, é necessário que exista uma defasagem entre o movimento do campo girante do estator e a rotação do rotor. O campo do estator gira à velocidade síncrona, enquanto o rotor sempre opera a uma rotação ligeiramente inferior, por não conseguir acompanhar exatamente essa velocidade, pois se isso ocorresse não haveria indução de corrente. A diferença entre a velocidade síncrona ( $\omega_s$ ) e a velocidade do rotor ( $\omega_r$ ) é denominada velocidade de escorregamento:

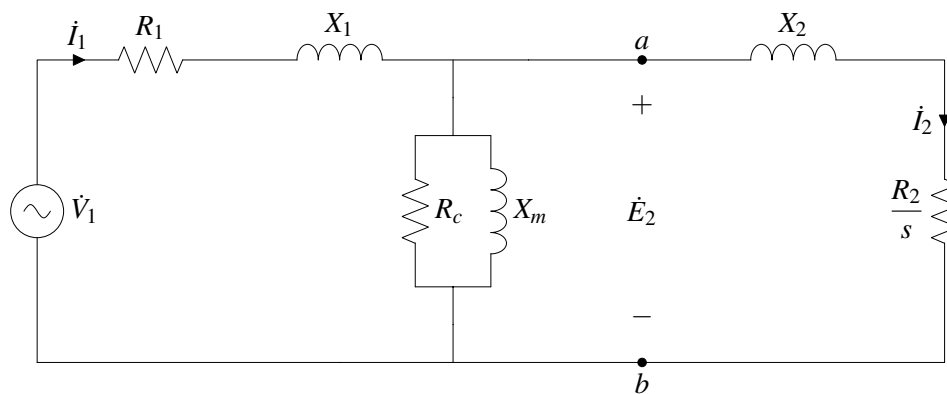
$$\omega_s = \omega_n - \omega_r \quad (41)$$

Pode-se escrever a função do escorregamento em termos das velocidades síncronas e real do motor, conforme mostra a Equação 42:

$$s = \frac{\omega_n - \omega_r}{\omega_n} \quad (42)$$

O circuito equivalente 'T' deste motor, amplamente utilizado para análise de desempenho em regime permanente, é representado pela Figura 65.

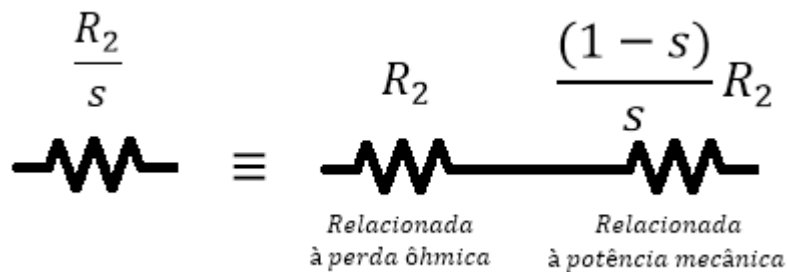
Figura 65 – Circuito equivalente 'T' de motor de indução para regime permanente.



Fonte: Adaptado de (Dias, 2015)

O modelo 'T' elétrico permite estudar o comportamento do motor de forma simplificada, considerando os principais elementos que influenciam seu funcionamento, como as impedâncias do estator e do rotor, a magnetização e as perdas associadas. A parcela resistiva da impedância de rotor pode ser separada em duas parcelas: uma representando as perdas ôhmicas rotóricas e outra representando a potência que, de fato, é convertida à natureza mecânica, visto na Figura 66 (Dias, 2015).

Figura 66 – Separação da resistência rotórica.



Fonte: (Dias, 2015)

Um exemplo representativo dessa tecnologia é o motor *WEG WTE300* mostrado na Figura 67, desenvolvido para aplicações veiculares.

Figura 67 – Motor Indução para Tração Elétrica WEG WTE300



Fonte: Catálogo WEG, 2020

Os dados de placa de motor são apresentados pela Tabela 9.

Tabela 9 – Tabela de dados do motor WTE300.

<b>DADOS PLACA MOTOR CA WEG - WTE300</b>	
Potência Nominal	6 kW
Potência Pico	16 kW
Torque Nominal	13 N·m
Torque Pico	36 N·m
Rotação Nominal Máx.	7500 RPM
Faixa de tensão	72V-82V
Corrente Nominal	132A
Corrente Máxima	255A (30s)
Peso	18,5 kg

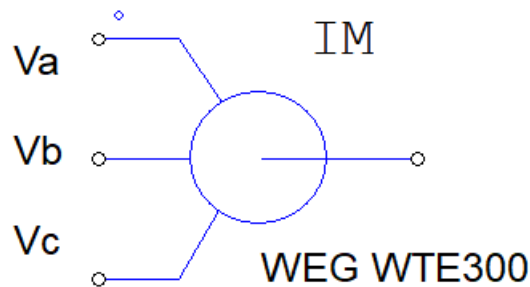
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Da mesma forma que anteriormente, necessita-se dos parâmetros internos da máquina de indução. Para obter esses parâmetros foi consultado os valores do circuito equivalente fornecido pelo fabricante. A equipe *Eforce* da UDESC, por já possuir este conjunto de Powertrain tem acesso ao dados do motor estimados pela empresa *WEG*. Entretanto não é possível fazer a divulgação desses dados neste trabalho por pedido de sigilo por parte da equipe.

### 5.1.1 SIMULAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO WTE300

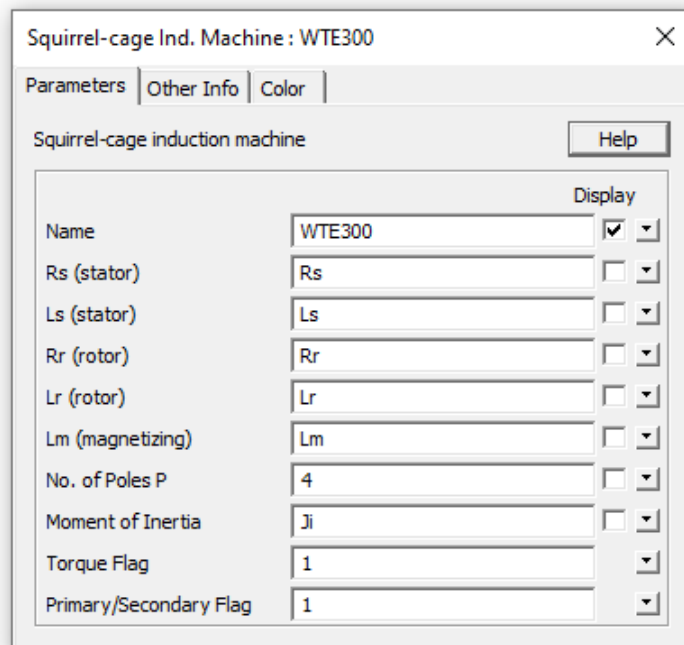
No *PSIM*<sup>®</sup>, utilizou-se do bloco *Squirrel-Cage Ind. Machine*, representando exatamente o motor de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo que estamos projetando, conforme mostrado na Figura 68. Os parâmetros que são solicitados pelo bloco do *PSIM*<sup>®</sup>, foram inseridos conforme mostrado na Figura 69.

Figura 68 – Bloco motor de indução com rotor em gaiola de esquilo no *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 69 – Parâmetros do bloco de motor de indução com rotor em gaiola de esquilo no *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como citado anteriormente, os valores inseridos não podem ser informados, contudo é comum encontrar trabalhos na área que desenvolvem algoritmos e modelos para estimar os valores dos parâmetros internos da máquina de indução.

A fim de contornar uma possível ausência de dados, o algoritmo desenvolvido em (Castro; Oliveira, 2020) usa o método de *gauss-seidel* para chegar em valores aproximados de um ensaio. Escrevendo um *script* no *MATLAB* que execute o algoritmo (apresentado no **Apêndice B**) e com base na Tabela 9 podemos inserir as variáveis de entrada solicitadas, que são:

- Tensão de linha do motor ( $V_l$ )
- Corrente nominal ( $I_{nom}$ )
- Potência trifásica ( $P_{3\phi}$ )
- Rotação nominal ( $\omega_n$ )

Além disso, insere-se o valor da resistência do estator ( $R_s$ ) medido nos terminais do motor, a relação entre as reatâncias ( $X_1/X_2$ ) obtidas por normas nacionais que padronizam a depender da categoria do motor, nesse caso categoria H, e a relação de corrente de partida pela nominal ( $I_p/I_n$ ), listados na Tabela 10:

Tabela 10 – Valores das variáveis de placa ou normalizadas do motor.

<b>Dados</b>	<b>Valor numérico</b>
Resistência de estator ( $R_e$ )	0,103 $\Omega$
Relação de reatância ( $X_1/X_2$ )	0,58
Relação de correntes ( $I_p/I_n$ )	2

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por fim, supõe-se inicialmente os valores das variáveis desejadas, nas quais não existem formas diretas de se obter. Escolhe-se uma tolerância de convergência  $\varepsilon$  na casa dos milésimos e inicializa-se o *loop* de convergência. Os resultados obtidos utilizando uma convergência  $\varepsilon < 0,001$  são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros estimados pelo algoritmo de estimação.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor estimado</b>
Resistência de rotor ( $R_r$ )	0,042247 $\Omega$
Reatância de estator ( $X_e$ )	0,000367 $\Omega$
Reatância de rotor ( $X_r$ )	0,000633 $\Omega$
Reatância magnetizante ( $X_m$ )	0,023139 $\Omega$

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Esse método é uma forma alternativa de obter os parâmetros da máquina, contudo o melhor meio continua sendo ensaios ou tabelas e folhas de especificação fornecidas pelos fabricantes.

## 5.2 INVERSOR TRIFÁSICO COM MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO

O inversor é um equipamento eletrônico capaz de transformar um sinal contínuo em um sinal alternado, muito utilizado no acionamento de motores de indução, pois permite o ajuste sobre a amplitude de tensão e frequência de alimentação do motor controlando a sua velocidade e torque mecânico. Para acionar o motor *WEG WTE300* utiliza-se o inversor *CVW300*, ilustrado na Figura 70, modelo que complementa o *powertrain* nacional da empresa.

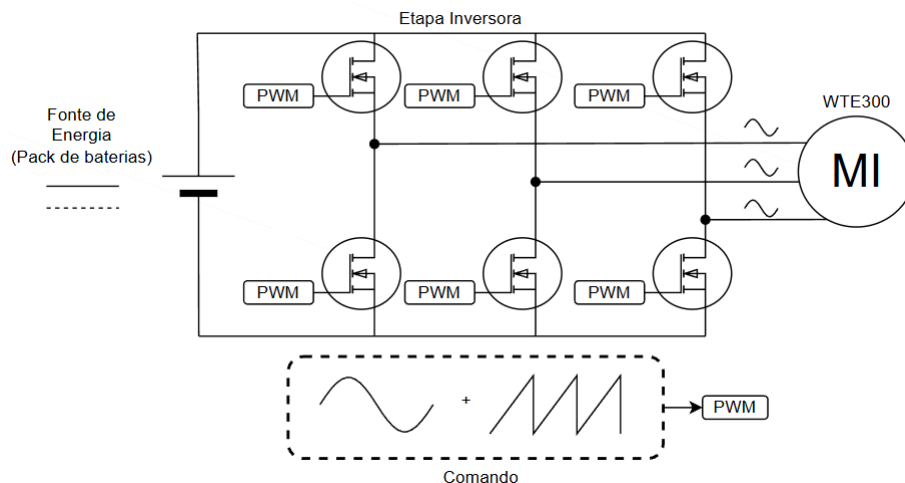
Figura 70 – Inversor *CVW300* do conjunto de tração elétrica *WEG*.



Fonte: Catálogo WEG, 2020

Sua estrutura é composta por seis chaves semicondutoras, agrupadas no que é conhecido como braço de transistor, em que cada uma das suas extremidades são conectadas aos polos da fonte de energia, como mostra a Figura 71.

Figura 71 – Modo de operação do Inversor.

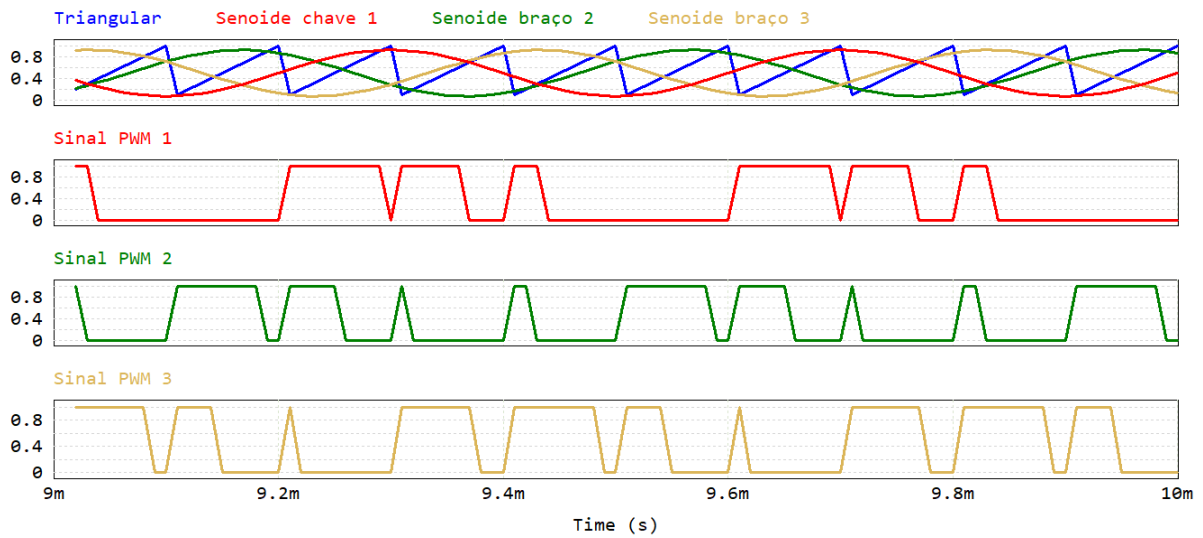


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A ordem de fechamento e abertura das chaves possibilita a variação da polaridade da tensão de saída, criando um sinal alternado de frequência e amplitude variável a partir da tensão contínua. Em antiparalelo a cada uma das chaves existe um diodo que permite o funcionamento adequado do inversor com cargas indutivas (Dias, 2015).

A modulação por largura de pulso do tipo senoidal, *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM), é a técnica mais utilizada para o controle de inversores. Ela se baseia na variação da largura dos pulsos de comando, obtida pela comparação entre dois sinais: uma portadora de onda triangular, e uma moduladora de onda senoidal. Cada fase do sistema possui uma onda moduladora própria, e as moduladoras das diferentes fases são defasadas entre si em  $120^\circ$  elétricos.

Figura 72 – Modulação por largura de pulso senoidal no comando do inversor.

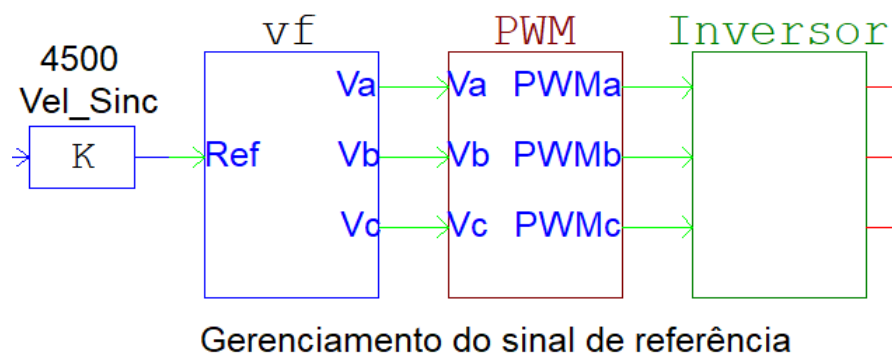


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 5.2.1 MODELO DE SIMULAÇÃO - INVERSOR CVW300

Para simular o inversor com controle de frequência montou uma simulação com três blocos listados abaixo e representados pela ferramenta de geração de blocos (*subcircuit*) no *PSIM*<sup>®</sup> visto na Figura 73.

Figura 73 – Agrupamento dos *subcircuits* que controlam a saída do inversor.



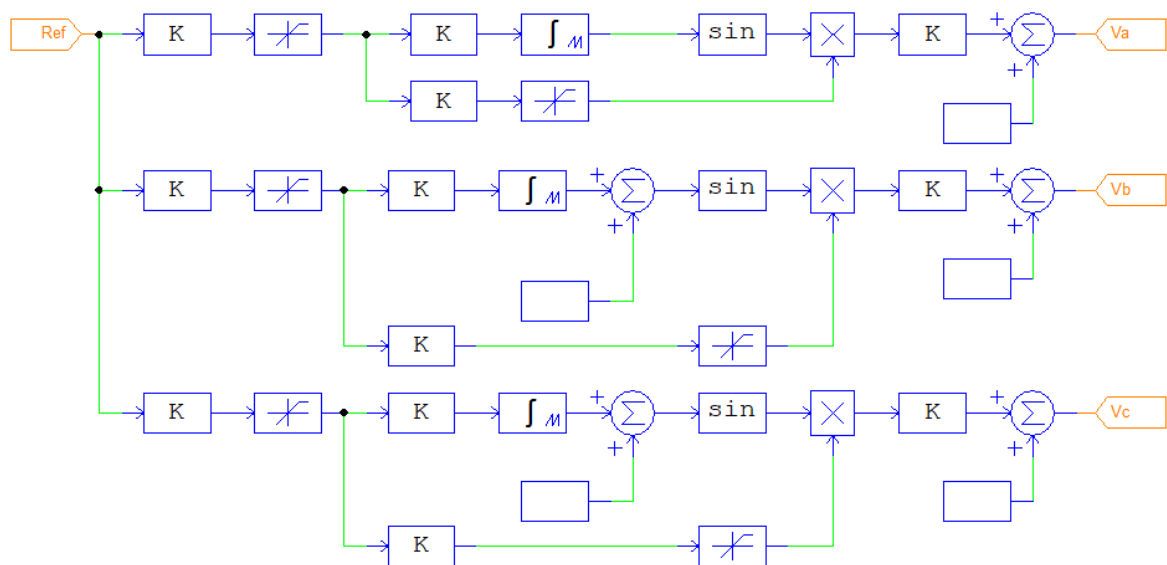
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na ordem como apresentado na Figura anterior:

- Sinal de Entrada: a partir do sinal de referência de entrada gera uma senoide;
- Comando: utiliza os blocos comparador para gerar os pulsos modulados;
- Inversor: topologia do inversor com fonte de alimentação

O primeiro bloco elabora a variação de amplitude juntamente com a frequência para controle do torque eletromagnético gerado pelo motor, como mostrado na Figura 74.

Figura 74 – Bloco de tratamento do sinal de entrada.

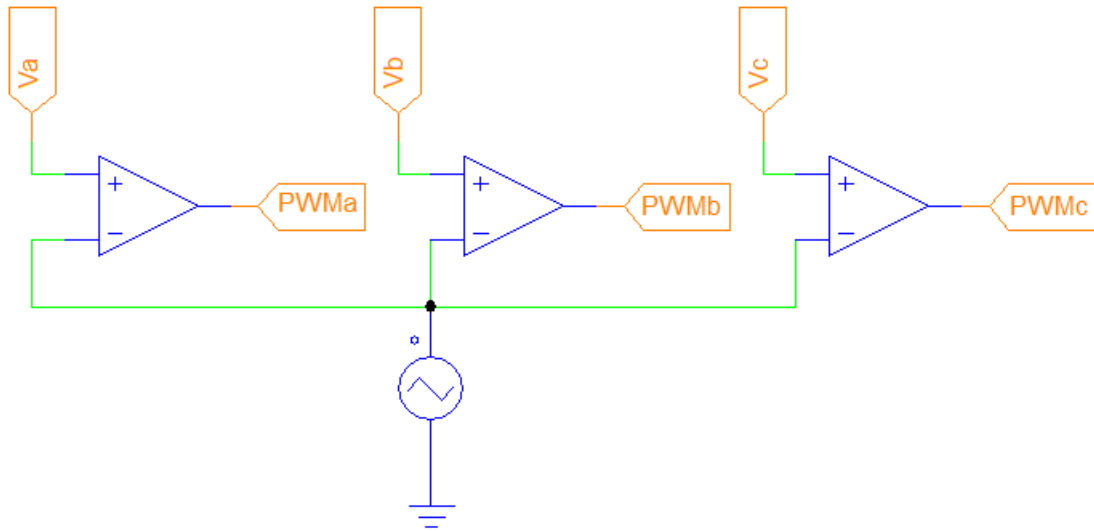


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O controle dessa relação "V/F" é o fator importante do acionamento via inversor; no entanto, para fins dessa simulação, por considerar uma análise de desempenho do sistema completo, não se utilizou de nenhuma forma de controle, mantendo a variação da relação constante.

O segundo bloco é o comparador para o chaveamento do sistema e geração do sinal modulado por largura para o comando das chaves. Para isso utilizou-se o bloco de comparador associando uma portadora triangular de frequência 10kHz, conforme mostrado na Figura 75.

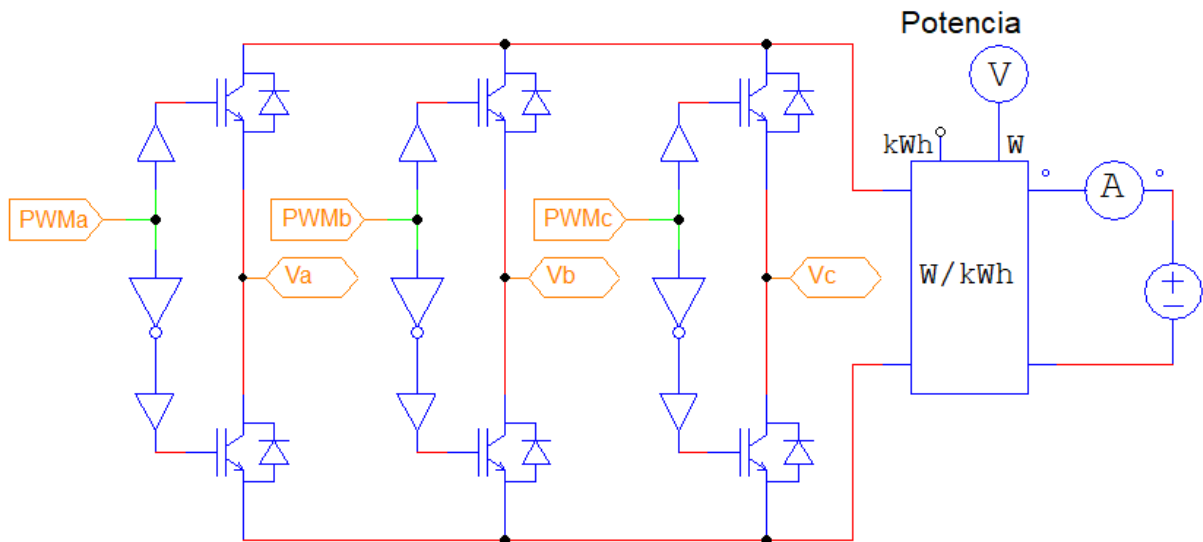
Figura 75 – Bloco comparador para comando.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O terceiro bloco é a própria topologia de inversor trifásico com a fonte de alimentação representando o banco de baterias, como mostra a Figura 76.

Figura 76 – Bloco do sistema do inversor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO SISTEMA CA

Com o sistema CA caracterizado, é importante destacar que a fonte de alimentação utilizada será a mesma do *powertrain* atual. Essa escolha, embora não seja a opção desejada inicialmente, se enquadra dentro do contexto real da equipe, pois não há pacotes (comumente chamado pelo termo em inglês, *packs*) de bateria de lítio suficientes para atender as demandas do sistema atual e do novo modelo. Desse modo uma alternativa para contornar a situação seria a adição de mais duas baterias de chumbo ao sistema CA para atender a tensão nominal de alimentação de 72V.

A partir dessa condição é possível elaborar a Tabela 12 que apresenta os novos parâmetros construtivos do veículo, evidenciando as diferenças entre os dois modelos propostos.

Tabela 12 – Tabela de dados construtivos do veículo e-Kart com o powertrain CA.

<b>Dados construtivos do e-Kart com o sistema CA</b>	
Massa do piloto ( $m_{pil}$ )	75 kg
Massa do motor e conversor ( $m_{mot}$ )	20 kg
Massa das rodas ( $m_r$ )	3 kg
Massa das baterias ( $m_{bat}$ )	96 kg
Massa do kart c/ tudo ( $m_k$ )	242 kg
Altura do kart ( $h_k$ )	0,8 m
Largura do kart ( $l_k$ )	0,7 m
Coefficiente de área frontal ( $C_{af}$ )	0,9
Relação de transmissão ( $i_g$ )	11:53
Raio das rodas (R)	0,125m
Coefficiente de rolamento ( $C_r$ )	0,0131

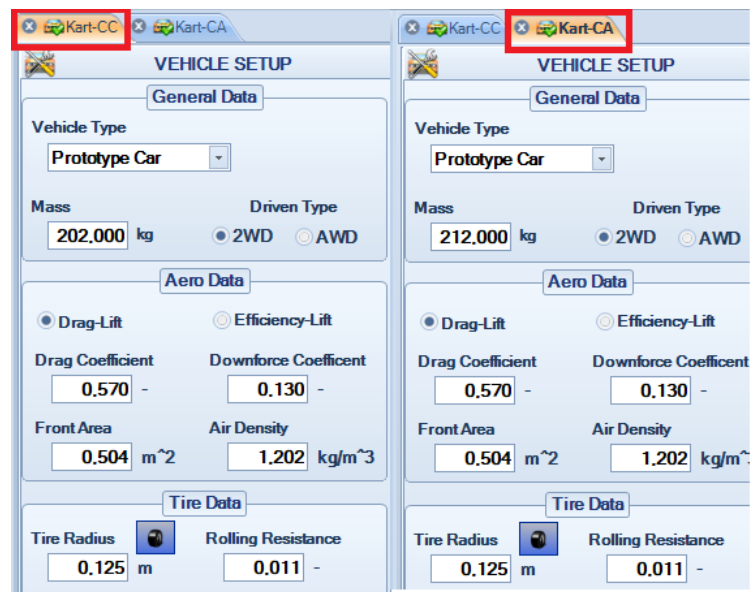
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além disso, utilizar o cenário da inserção de novas baterias de chumbo possibilita a comparação em termos de autonomia, deixando as diferenças dos resultados dependente exclusivamente dos critérios de potência de cada sistema.

#### 5.4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS *POWERTRAINS* CC E CA

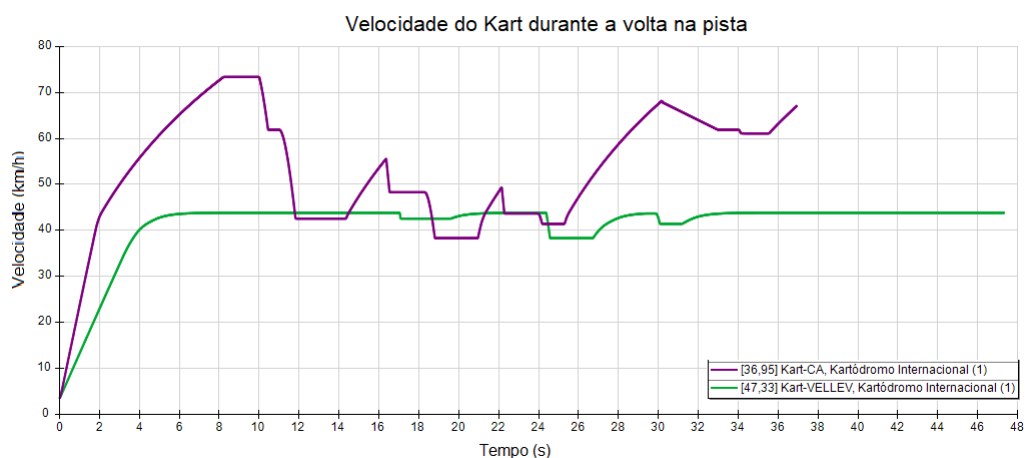
Para a análise comparativa, o comportamento do piloto utilizado nas simulações foi obtido a partir de uma volta otimizada gerada usando o *software OptimumLap*, considerando a mesma pista do kartódromo apresentada na Figura 47. Cada *powertrain* possui características únicas, especificadas nas Tabelas 1 e 12, refletindo em como serão simulados os desempenhos em pista. Na Figura 77 é apresentado os dados inseridos no *software* para o sistema CA e CC e na sequência o sinal de desempenho ideal de cada *powertrain* é mostrado, conforme a Figura 78.

Figura 77 – Dados do sistema CC e CA inseridos na aba *vehicle setup*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 78 – Sinal de velocidade com desempenho otimizado simulado no *software*.

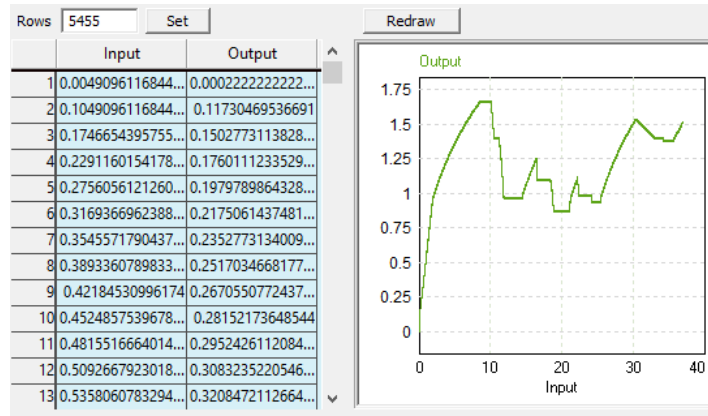


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Percebe-se que os resultados são diferentes para as condições nominais de potência de cada *powertrain*, o que é esperado dados as características de potência de cada conjunto.

O resultado de velocidade de cada um dos sistemas, fornecido pelo *OptimumLap*, foram adicionados no *PSIM*<sup>®</sup> usando o bloco *lookup table* e normalizado com base na rotação nominal dos motores para serem adotados como sinal de razão cíclica do acelerador para a comparação entre os *powertrains*, sendo esses representados nas Figuras 79 e 80.

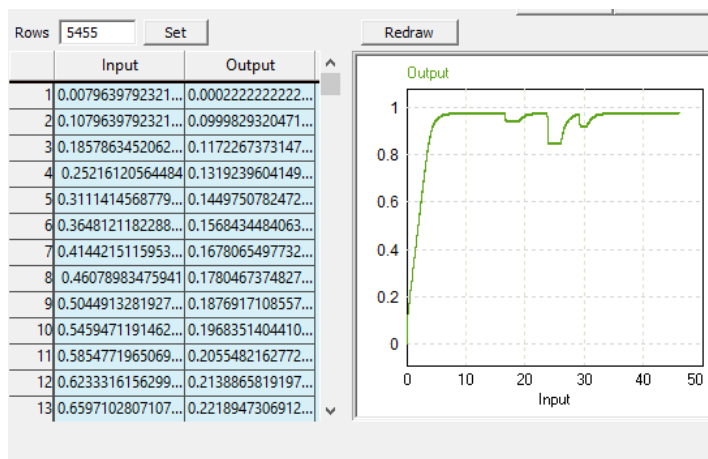
Figura 79 – Referência de velocidade para o *powertrain* CA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nota-se que o valor do sinal de referência para o motor CA ultrapassa o valor normalizado 1, que representaria a velocidade nominal do motor. No entanto, essa ultrapassagem é permitida, pois o motor CA acionado por um inversor tem a capacidade de aumentar a sua rotação controlando a frequência da senoide de modulação. Então durante a simulação preparou-se o ambiente para entender que após o valor numérico 1 ser ultrapassado, o acionamento passa a alterar a frequência da modulante.

Figura 80 – Referência de velocidade para o *powertrain* CC.



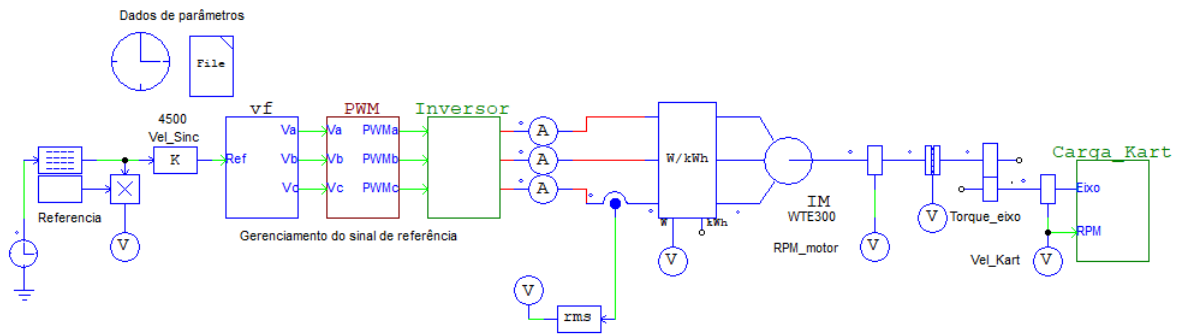
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

É importante ressaltar que os sinais de referência servem unicamente para simular o comportamento dinâmico em malha aberta de cada sistema, sem a presença de controle ativo. Dessa forma, as simulações visam avaliar o desempenho natural de cada configuração de *powertrain* frente às mesmas condições de pista.

### 5.4.1 SIMULAÇÃO DO KART COM POWERTRAIN CA

Semelhante ao Capítulo 4, para avaliar os aspectos de potência uniu-se todas as partes listadas, resultando no modelo completo conforme a Figura 81 a seguir.

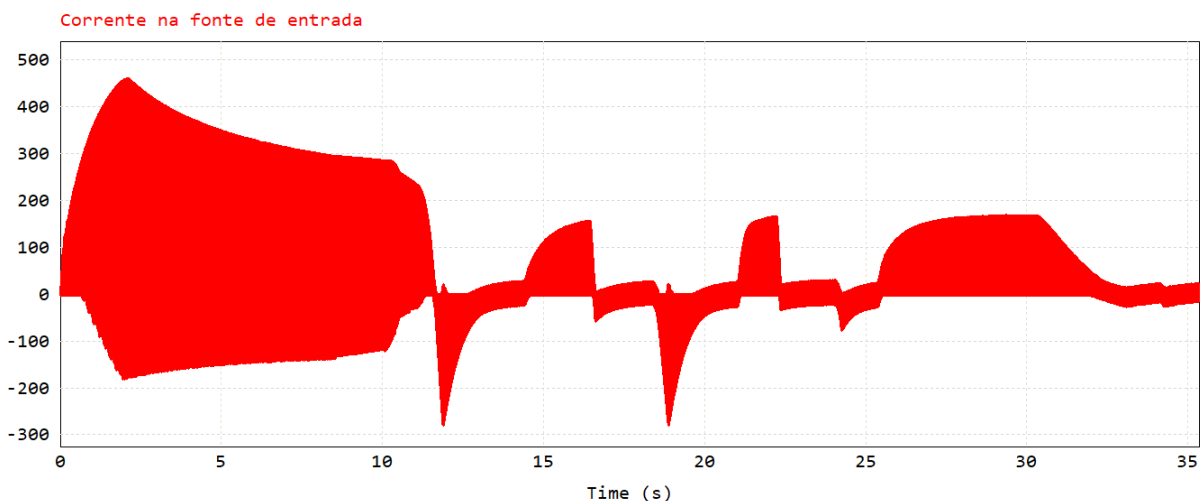
Figura 81 – Simulação do *powertrain* CA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se, na Figura 82, a corrente na fonte de entrada que acompanha diretamente o perfil de esforço imposto ao motor. Nos instantes iniciais ocorre um pico acentuado de corrente, característico do regime de partida do motor de indução, seguido por estabilização conforme o veículo atinge velocidade. Nota-se também os momentos em que há regeneração de energia para a fonte.

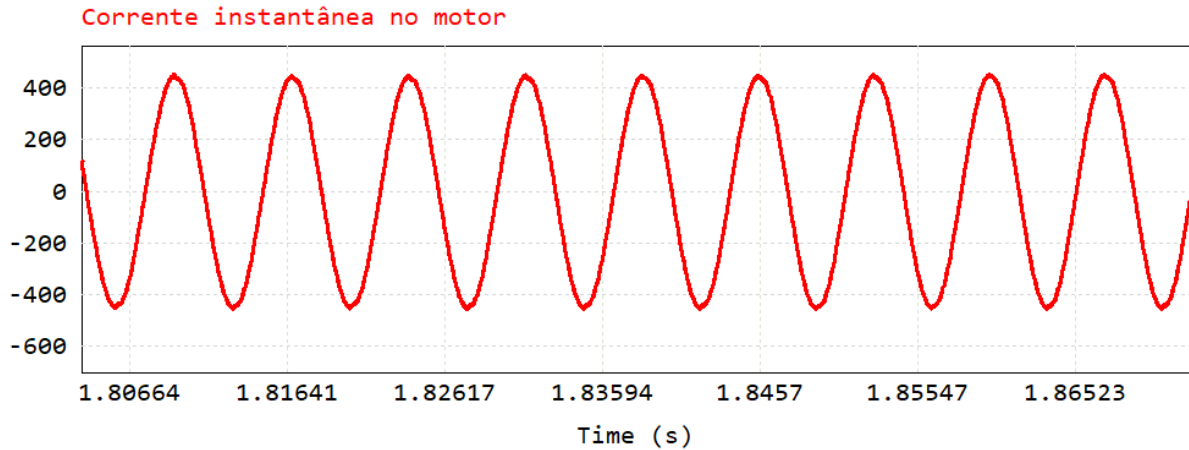
Figura 82 – Corrente na fonte de entrada do sistema CA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Figura 83, a forma de onda senoidal evidencia o correto funcionamento do inversor trifásico e o equilíbrio entre as fases. A amplitude máxima de aproximadamente 400 A ocorre durante aceleração plena, indicando regime de torque máximo. Esse valor de amplitude ultrapassou os limites máximos de corrente indicados, contudo não passou do limite de tempo estabelecido.

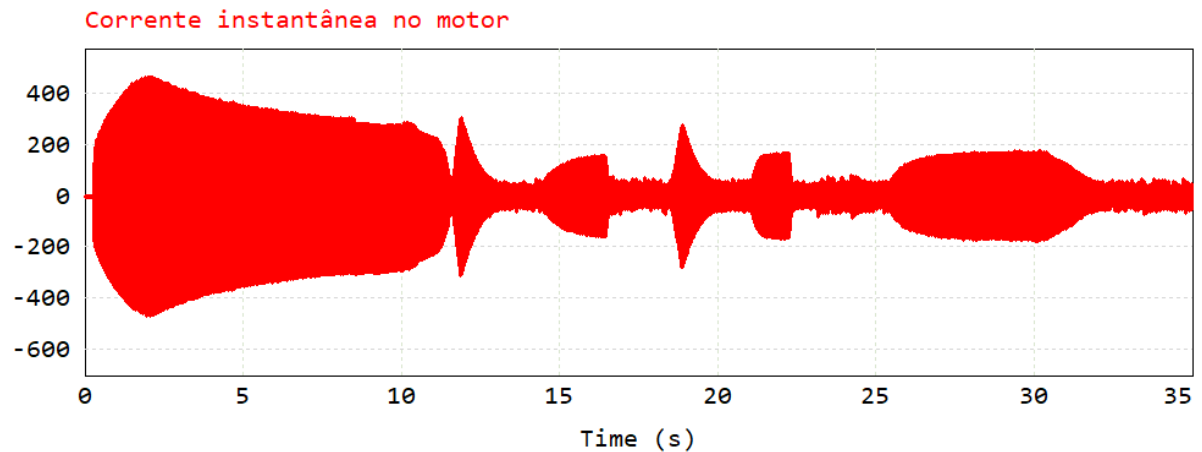
Figura 83 – Corrente instantânea máxima em uma fase atingida pelo motor na partida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Já a Figura 84 demonstra o formato densamente preenchido refletindo as variações cíclicas de corrente trifásica, com maior intensidade nos instantes de partida e retomada.

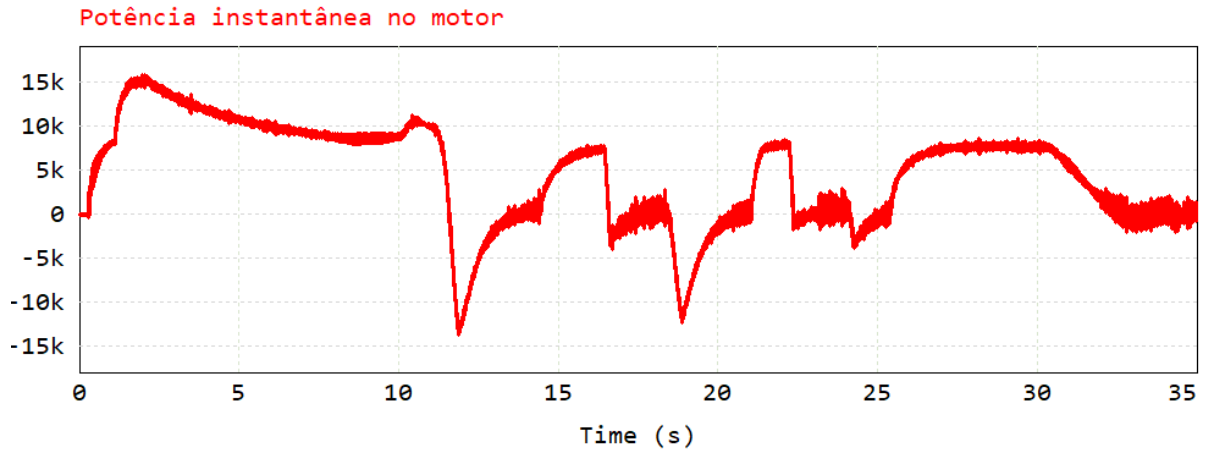
Figura 84 – Corrente instantânea em uma fase durante todo o percurso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A potência instantânea, mostrada na Figura 85, apresenta suas variações ao longo da volta, com picos máximo de 15 kW durante acelerações, não atingindo os 16kW do catálogo, e chegando em valores negativos nos instantes de frenagem regenerativa.

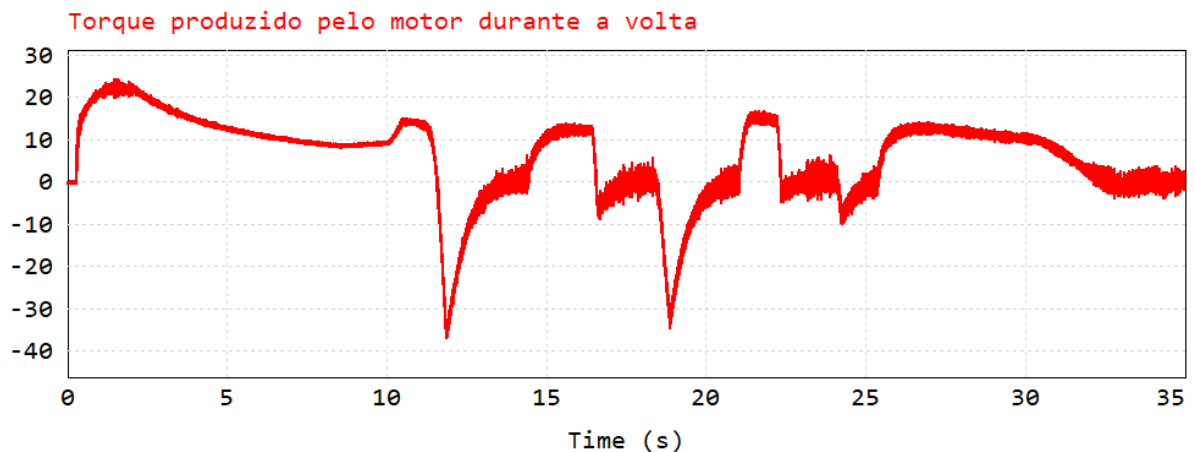
Figura 85 – Potência instantânea do motor durante todo o percurso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A forma de onda do torque, na Figura 86, segue o comportamento de esforço do veículo, apresentando picos positivos nas acelerações e valores negativos nos trechos de frenagem regenerativa. O valor máximo em torno de  $25 \text{ N} \cdot \text{m}$  confirma a capacidade do motor em atender à demanda de tração sem saturação de corrente.

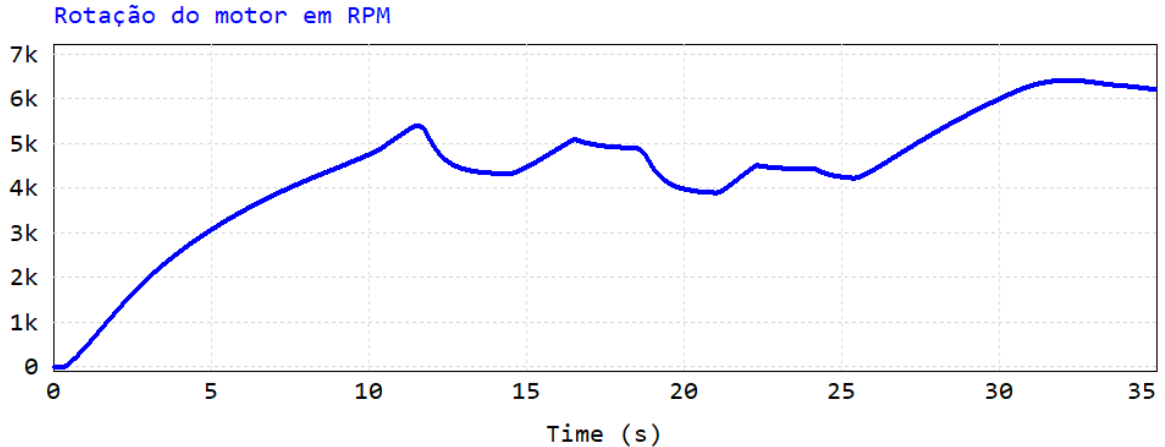
Figura 86 – Torque instantâneo do motor durante todo o percurso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Figura 87 a rotação instantânea do motor é apresentada, indicando o perfil de velocidade do veículo durante o trajeto na pista, alcançando ao final do percurso rotação maior que 6500 RPM. As quedas intermediárias correspondem às zonas de desaceleração e frenagem na pista.

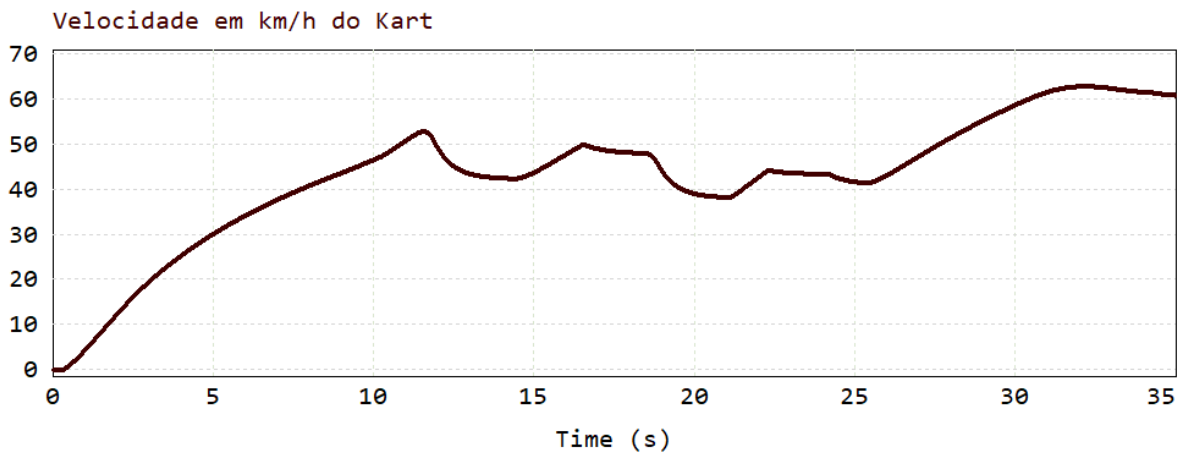
Figura 87 – Rotação instantânea do motor durante todo o percurso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por último, a Figura 88 apresenta a velocidade do veículo de acordo com a rotação do motor e a relação de transmissão existente, atingindo aproximadamente 65 km/h no trecho de maior aceleração. As variações suaves de velocidade indicam transições eficientes entre aceleração e frenagem, representando adequadamente o desempenho do sistema CA.

Figura 88 – Velocidade em km/h do kart durante o percurso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

## 5.4.2 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO COM O POWERTRAIN CC

O *OptimumLap* calcula a volta otimizada de acordo com as características dinâmicas e a potência nominal de cada conjunto de tração, permitindo comparar ambos os sistemas em condições equivalentes de pista, mas respeitando as restrições e capacidades inerentes a cada configuração. Para maior clareza da diferença nos tempos de volta entre os veículos, o *software* fornece o mapa do trajeto com os valores de tempo para cada instante do percurso, conforme mostra a Figura 89.

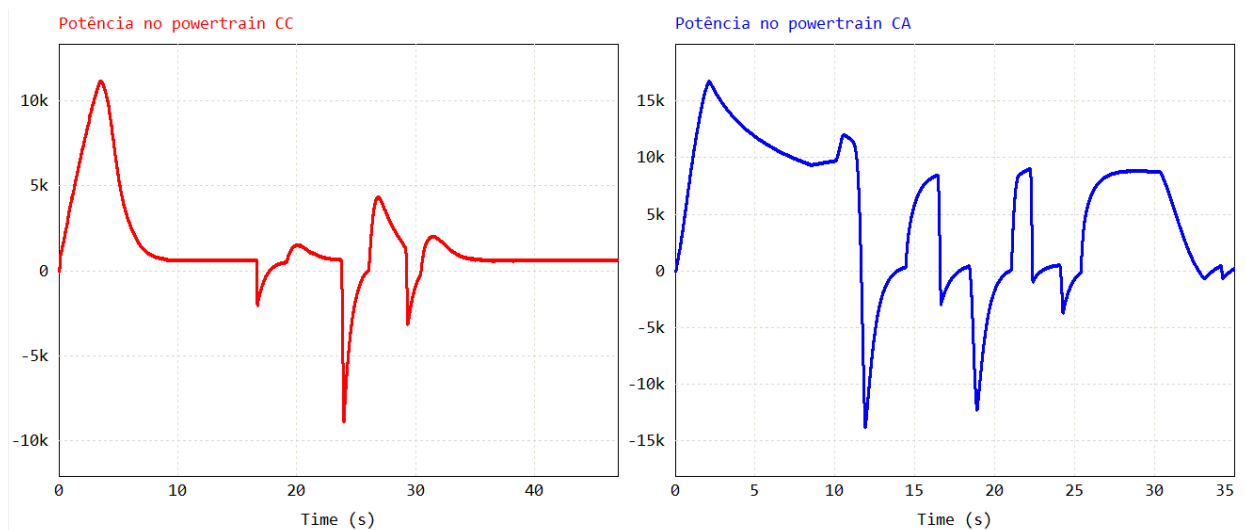
Figura 89 – Desempenho de tempo de cada sistema ao longo do percurso na pista do KIJ.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O *powertrain CA* obtém a vantagem durante a largada e a mantendo durante todo o caminho, no entanto as curvas do trajeto fazem com que essa vantagem diminua, porém essa vantagem é ampliada novamente no trecho retilíneo. Em relação critérios de desempenho, a potência instantânea de cada *powertrain* durante o percurso, é mostrada na Figura 90.

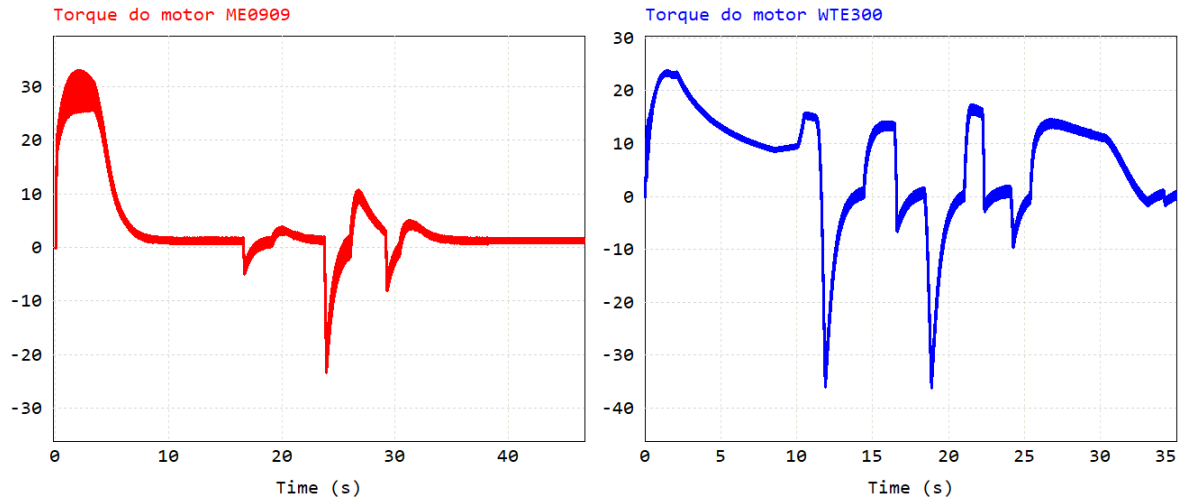
Figura 90 – Potência nos sistemas CC e CA durante o percurso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A potência instantânea do sistema CA atinge valores próximos a 16 kW, superiores aos cerca de 10 kW do sistema CC. Nota-se também a maior capacidade regenerativa durante as frenagens, evidenciada pelos picos negativos durante as curvas acentuadas. O *powertrain* CC mantém uma potência média inferior, mas com menor variação dinâmica. Na Figura 91, o torque durante o período de análise é mostrado.

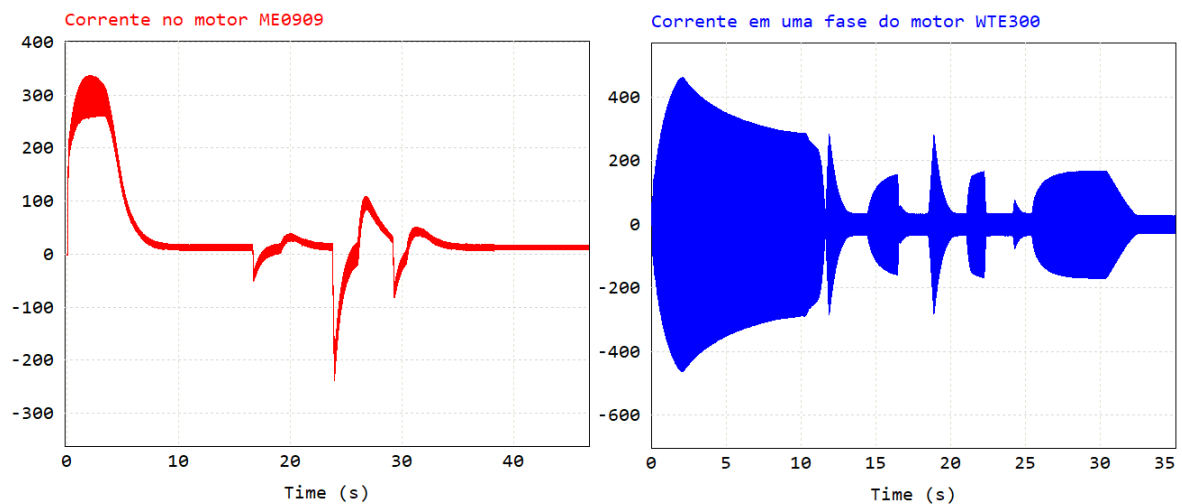
Figura 91 – Torque nos sistemas CC e CA durante o percurso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os motores apresentam comportamentos diferentes quanto ao formato do torque. O motor de indução (CA) exibe picos de torque superiores devido a maiores variações de velocidade durante as curvas. O motor CC, por sua vez, apresenta resposta contínua, refletindo a manutenção da mesma velocidade durante todo o trajeto, excetuando-se somente durante a curva de maior acentuação. A Figura 92 mostra a corrente em cada um dos sistemas.

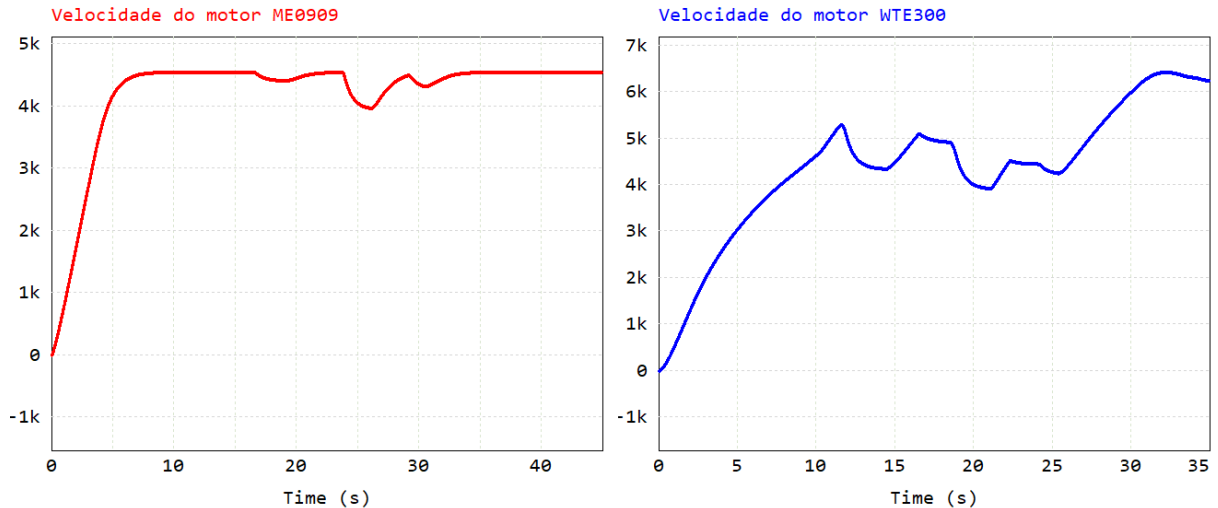
Figura 92 – Comparação entre as correntes no motor de cada *powertrain*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que o motor de indução demanda corrente mais elevada durante os instantes de maior aceleração, enquanto o motor CC apresentou o maior pico durante a largada e outros picos de menores amplitudes na seção das curvas. A rotação de cada motor é ilustrado na Figura 93.

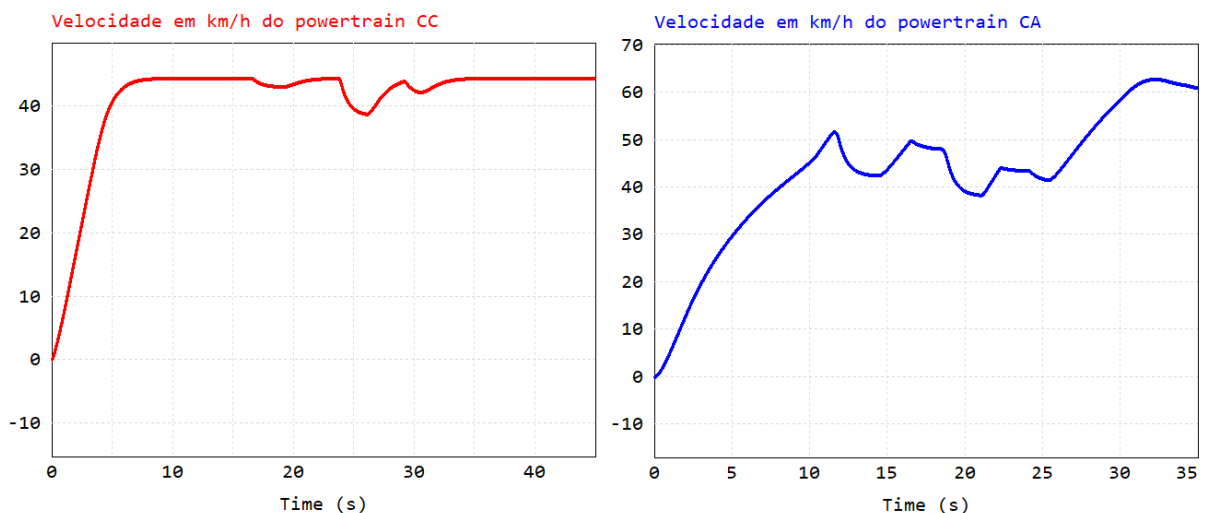
Figura 93 – Comparação da rotação em cada um dos motores.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O motor CA apresenta rotação máxima superior a 6500 RPM, enquanto o motor CC estabiliza em torno de 4500 RPM. Essa diferença confirma a maior faixa de operação e o melhor aproveitamento da potência no sistema CA, embora ambos atinjam regimes compatíveis com o desempenho esperado para o veículo. Na Figura 94, estendendo a análise ao sistema inteiro, mostra-se a velocidade do Kart para cada *powertrain* simulado.

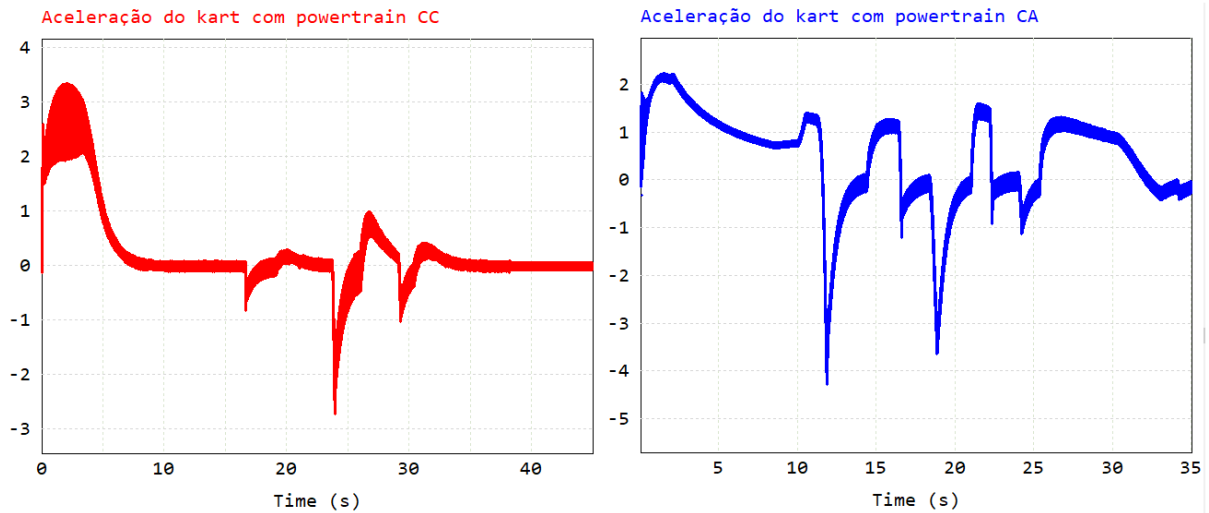
Figura 94 – Velocidade do kart em cada *powertrain*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A velocidade do kart com o sistema CA ultrapassa 60 km/h, enquanto o sistema CC mantém máxima em torno de 45 km/h. O resultado evidencia a vantagem de desempenho do motor de indução, associado à maior potência e faixa útil de rotação. Na figura 95 a aceleração em  $m/s^2$  é apresentada:

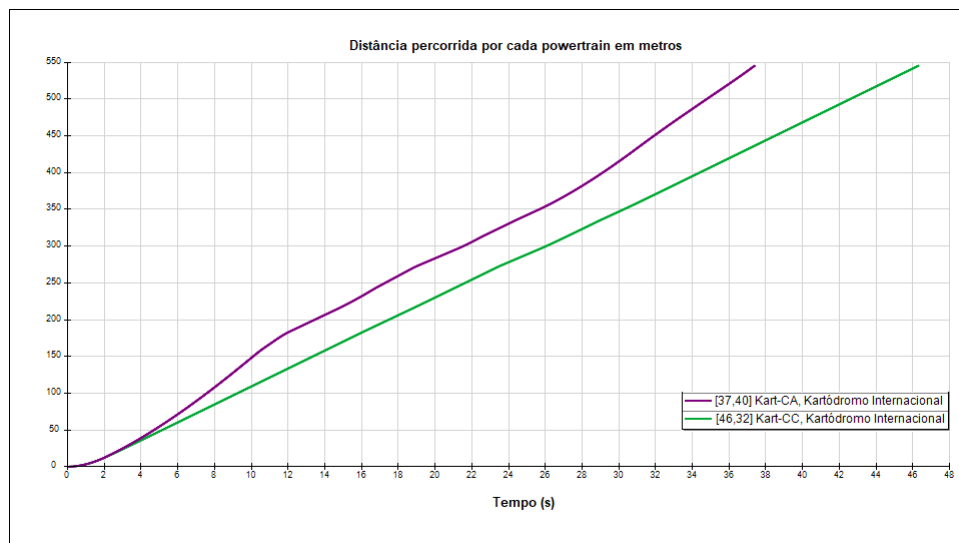
Figura 95 – Aceleração realizada por cada *powertrain*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A aceleração do *powertrain* CC é maior que a do *powertrain* CA durante a largada, o que representa uma resposta mais veloz do veículo de menor carga, contudo a diferença não reflete numa vantagem significativa. Por fim a Figura 96, demonstra a distância percorrida ao longo do tempo. Esse gráfico é extraído diretamente do *OptimumLap* e serve para destacar a diferença de posição.

Figura 96 – Distância percorrida por cada *powertrain*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

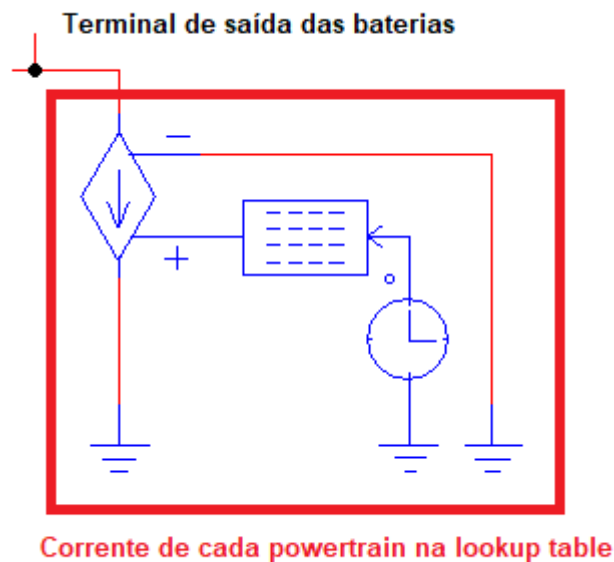
Ambos os sistemas percorrem o mesmo trajeto de pista, porém o *powertrain CA* apresenta avanço mais rápido no tempo, completando a volta em menor intervalo. Essa diferença decorre da maior potência disponível e do perfil de desempenho gerado pelo *OptimumLap*.

### 5.4.3 DESEMPENHO EM AUTONOMIA DOS SISTEMAS CC E CA

Para complementar a comparação entre os dois *powertrains*, foi realizada uma simulação simplificada visando observar o comportamento das baterias de chumbo durante uma volta completa em pista. O modelo utilizado é o mesmo apresentado no Capítulo 3, baseado em um circuito equivalente da bateria de chumbo-ácido visto em (Ceraolo, 2000; Jackey, 2007).

A implementação foi realizada no ambiente *PSIM*<sup>®</sup> utilizando uma fonte controlada de corrente conectada à bateria, cuja entrada é um bloco de *lookup table* contendo o sinal de corrente simulado em cada *powertrain*, conforme mostra a Figura 97.

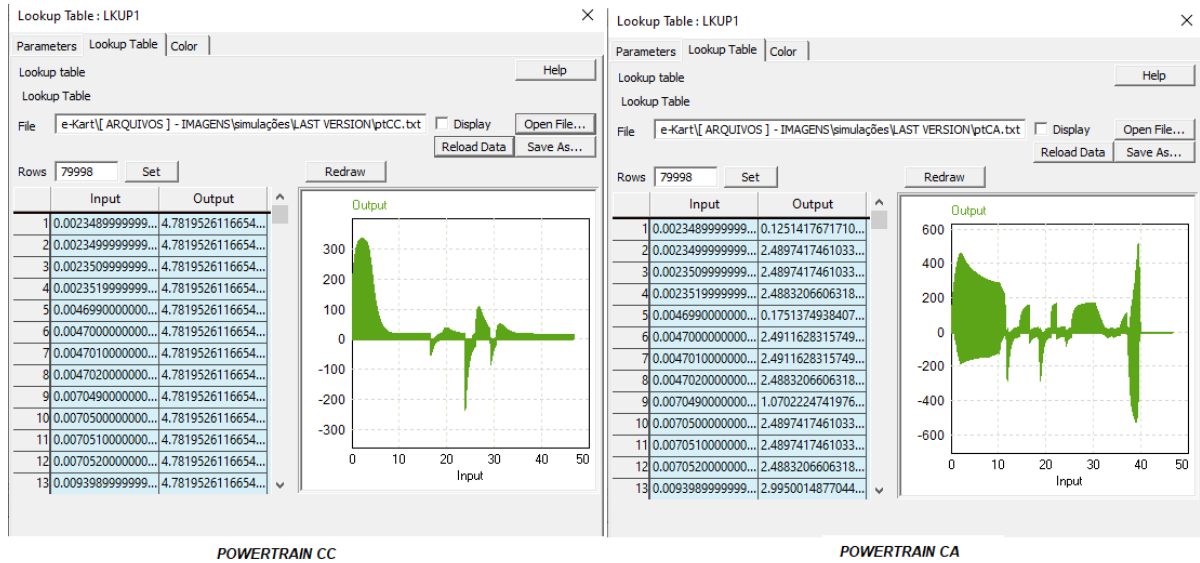
Figura 97 – Bloco *lookup table* usado para simular a corrente do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 98 mostra internamente o bloco *lookup table* para ambos os modelos simulados usado nas simulações das baterias de chumbo-ácido.

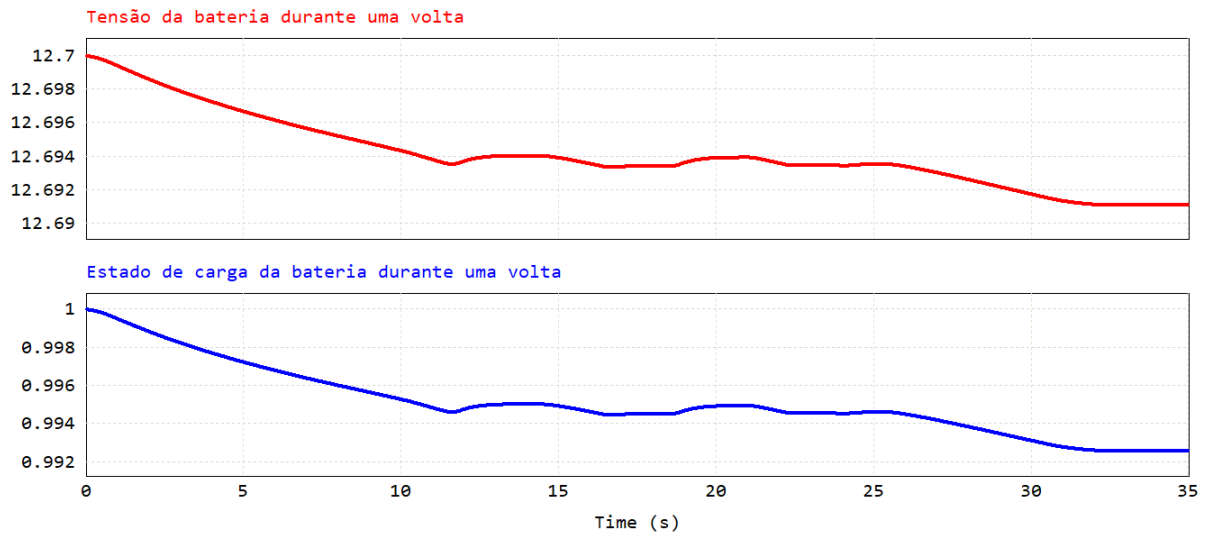
Figura 98 – Corrente drenada da bateria de chumbo vista no bloco *lookup table*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A bateria é submetida ao mesmo regime de operação observado nas simulações de desempenho, permitindo reproduzir o comportamento dinâmico de tensão e estado de carga (SOC) para cada configuração. As Figuras 99 e 100 apresentam a variação da tensão terminal e do estado de carga da bateria durante uma volta completa para os dois sistemas.

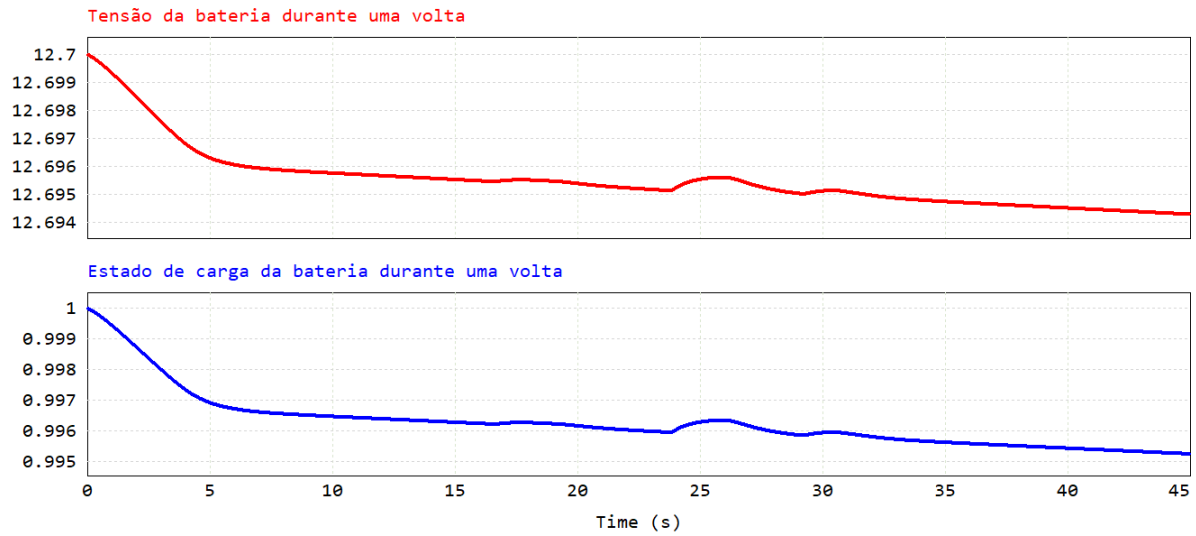
Figura 99 – Tensão e estado de carga da bateria para o sistema CA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que o sistema CA, por operar com correntes mais elevadas, provoca uma queda de tensão superior e uma descarga mais acentuada do SOC ao longo do tempo de simulação da volta de 35 segundos. Ainda assim, durante as desacelerações nota-se o sistema regenerando energia para as baterias.

Figura 100 – Tensão e estado de carga da bateria para o sistema CC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Já o sistema CC demonstra uma variação mais abrupta, embora com um percentual menor de queda do SOC, representando um menor consumo de energia feito pelo sistema CC durante a simulação da volta de 45 segundos.

Logo, é possível condensar os aspectos de autonomia elaborando a Tabela 13.

Tabela 13 – Resumo dos aspectos de autonomia de cada um dos sistemas de *powertrain*.

<b>Grandeza</b>	<b>Powertrain CC</b>	<b>Powertrain CA</b>
Queda de tensão (V)	0,005	0,008
Diminuição do SOC (%)	0,4	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

## 6 AVALIAÇÃO GERAL DOS SISTEMAS

Este trabalho abordou a análise, simulação e validação experimental do sistema *powertrain* de um e-kart desenvolvido pelo grupo VELLEV. O principal objetivo foi comparar o sistema de corrente contínua com uma proposta de motor de corrente alternada, além de investigar a viabilidade técnica e as vantagens de cada um em termos de eficiência, desempenho e aplicabilidade.

Através de simulações no software PSIM e validações experimentais realizadas no Kartódromo Internacional de Joinville, foi possível confirmar que o modelo matemático da carga desenvolvido do e-kart da equipe VELLEV apresentou coerência com os dados experimentais, especialmente no que tange ao comportamento da corrente, tensão, torque e potência do motor.

Tabela 14 – Comparação de desempenho entre os sistemas de *powertrain*.

<b>Grandeza</b>	<b>Powertrain CC</b>	<b>Powertrain CA</b>
Massa do sistema (kg)	202	242
Tempo de volta (s)	46	36
Potência máx. (kW)	10	16
Vel. máx.(km/h)	44	62
Consumo por volta	0,4% do <i>SOC</i>	0,6% do <i>SOC</i>
Torque máx. (N·m)	30	25
Rotação máx. (RPM)	4500	6800

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados obtidos confirmaram que, conforme esperado, o desempenho do *powertrain* de corrente contínua é inferior em termos de potência nominal quando comparado ao de corrente alternada, sendo 4,8 kW contra 6 kW, respectivamente. No entanto, nos primeiros instantes, ambos os sistemas apresentaram respostas de aceleração parecidas, com o conjunto CC mostrando uma vantagem sobre o CA, demonstrando a influência da carga do veículo. O *powertrain* CA, embora mais pesado, não apresentou uma desvantagem substancial suficiente para comprometer a comparação entre os sistemas em condições práticas. A pista e as características da carga contribuíram para essa aproximação de desempenho.

O sistema de corrente alternada consome mais energia e apresenta maior complexidade de controle, essas observações sugerem uma análise mais detalhada do novo conjunto, avaliando o custo-benefício da substituição. O estudo contribui para o desenvolvimento de novos sistemas de tração elétrica, fornecendo dados para futuras melhorias e novas pesquisas no campo dos *powertrains* elétricos em veículos de mobilidade leve.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos passos, sugere-se a realização de novos testes práticos com o *power-train* de corrente alternada. Além disso, a integração do sistema de telemetria mais avançado desenvolvido em (Walt, 2019), capaz de monitorar em tempo real o comportamento de diversos parâmetros operacionais que auxiliariam na otimização contínua do sistema. Sugere-se também outras direções para pesquisas futuras:

- **Análise econômica e adaptação:**
  - Estudo de custo-benefício entre tecnologias CC e CA.
  - Estudo para substituição do banco de baterias existente.
- **Adaptação para competições:**
  - Desenvolvimento de estratégias de pilotagem otimizadas.
  - Estudo de sistemas de regeneração de energia.

## REFERÊNCIAS

- BALDASSI, Mariana. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), **CONTROLE DE CONVERSOR CC-CC MULTIFÁSICO BIDIRECIONAL EM CORRENTE NÃO ISOLADO APLICADO A SISTEMAS ELÉTRICOS DE TRACÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS LEVES**. Joinville: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://pergamumweb.udesc.br/acervo/167598>>. Acesso em: 05 out. 2024. Citado na página 43.
- BARBI, Ivo. **Fontes Chaveadas: Conversores CC-CC Não Isolados**. 2. ed. Florianópolis, SC: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2010. ISBN 978-85-328-0482-2. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 47.
- BARRETO, Leandro Carolino Meira. **O marketing esportivo no automobilismo a importância do marketing esportivo no processo de construção da carreira de um piloto no kart**. Brasília: [s.n.], 2006. Disponível em: <<https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/123456789/1409>>. Acesso em: 05 out. 2024. Citado na página 18.
- BLACK, Fábio. **Os 60 anos do Kart no Brasil: esporte de Senna e Piquet era Marginalizado**. [S.l.], 2021. Citado na página 18.
- BRAGA, Newton C. **Todos os Tipos de Motores (MEC149)**. 2025. Acesso em: 05 dez. 2025. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/robotica-e-mecatronica/9435-todos-os-tipos-de-motores-mec149.html>>. Citado na página 37.
- CASTRO, Marco A. A.; OLIVEIRA, Edimar J. Algoritmo para estimação dos parâmetros do motor de indução em plena operação. **ASBA**, v. 2, n. 1, 2020. Citado na página 72.
- CERAOLO, Massimo. New dynamic model for lead-acid batteries. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 15, n. 20, p. 1184–1190, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 48, 49 e 88.
- CHAU, K. T. **Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application**. Chichester, UK: Wiley, 2015. ISBN 978-1118752606. Citado 3 vezes nas páginas 21, 31 e 68.
- CORREA, Maurício. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), **PROJETO DE CONTROLE DE SISTEMAS DE TRACÇÃO ELÉTRICA E DE EQUALIZAÇÃO ATIVA DE CARGA DE BATERIAS USANDO CONVERSORES CC-CC TIPO BUCK E BUCK-BOOST BIDIRECIONAIS EM CORRENTE**. Joinville: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://pergamumweb.udesc.br/acervo/167598>>. Acesso em: 05 apr. 2024. Citado na página 41.
- DIAS, Sersan. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), **PROJETO DE INVERSOR TRIFÁSICO APLICADO AO ACIONAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 69 e 73.
- EHSANI, Mehrdad et al. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. ISBN 978-0849333793. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 24, 26 e 28.
- ELETROGATE. **Placa Uno R3 SMD CH340**. 2025. Acesso em: 05 dez. 2025. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/uno-r3-smd-ch340>>. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 56.

FERRONATO, Fernanda. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), **DESENVOLVIMENTO VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO POWERTRAIN DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DO TIPO FÓRMULA SAE**. Joinville: [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://pergamumweb.udesc.br/acervo/167598>>. Acesso em: 05 out. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 35.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 978-1-56091-199-9. Citado 5 vezes nas páginas 21, 24, 25, 26 e 28.

HONGWEN, He; XIONG, Rui; FAN, Jinxin. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. **Open Access Energies**, 2011. Citado na página 32.

JACKEY, Robyn A. A simple, effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection. **SAE World Congress**, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 48, 49 e 88.

LEM. **LA 200-P — Datasheet (v17)**. n.d. Acesso em: 05 dez. 2025. Disponível em: <[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/la\\_200-p\\_v17.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_200-p_v17.pdf)>. Citado na página 52.

MOHAN, Ned. **Máquinas Elétricas e Acionamentos: Curso Introductório**. 1. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2014. ISBN 978-8521633778. Citado na página 28.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. Citado na página 37.

MORAES, Caio. **Uma revisão sobre baterias: Parte III – modelo elétrico da bateria**. 2020. <<https://eletronicadepotencia.com/modelo-eletrico-da-bateria/>>. Acesso em: 14 jun. 2025. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/modelo-eletrico-da-bateria/>>. Citado na página 48.

MOTENERGY. **ME0909 — Motor Elétrico / Especificações**. 2025. Acesso em: 05 dez. 2025. Disponível em: <<https://www.motenergy.com/me0909.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

PASSARELLI, Alan da Silva Duarte. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica), **Levantamento de curvas características do motor de corrente contínua de ímã permanente e escovas**. Curitiba, PR, Brasil: [s.n.], 2023. Disponível em repositório institucional UTFPR, acessado em 2025. Citado na página 37.

RODRIGUES, Julio Cesar Bortolini. Trabalho de Conclusão de Curso, **Dimensionamento do Sistema de Tração para Veículos Elétricos - Tração Dianteira In-Wheel**. Ponta Grossa, PR: [s.n.], 2017. Curso de Engenharia Eletrônica. Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Cristina Correa. Citado na página 21.

SAVICKI, Oscar. **Aerodynamics in Karting**. [S.l.], 2025. Citado na página 25.

TANAKA, Carlos Naomi. **Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado na página 21.

WALT, Antonio Carlos. **Desenvolvimento de um sistema de sensoriamento remoto para um kart elétrico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Joinville, SC, 2019. Citado 6 vezes nas páginas 51, 52, 53, 54, 56 e 92.

## APÊNDICE A – CÓDIGO EM C++ PARA LEITURA E GRAVAÇÃO DA PLACA DE MEDIÇÃO

```

1 #include <SPI.h>
2 #include <SD.h>
3
4 // --- Pinos ---
5 const int sensorPin = 2;      // Encoder
6 const int pinCorrente = A2;   // Corrente
7 const int pinTensao = A4;     // Tensao
8 const int pinCS = 4;         // Chip Select SD
9
10 // --- Encoder ---
11 volatile unsigned int contagem = 0;
12 volatile unsigned long ultimoPulso = 0;
13 const int furosEncoder = 4;   // 4 furos por volta
14
15 // --- SD ---
16 File arquivo;
17
18 // --- Encoder ISR ---
19 void contadorPulsos() {
20     unsigned long agora = micros();
21     if (agora - ultimoPulso > 10000) { // debounce ~10 ms
22         contagem++;
23         ultimoPulso = agora;
24     }
25 }
26
27 void setup() {
28     Serial.begin(9600);
29     pinMode(sensorPin, INPUT_PULLUP);
30     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensorPin),
31                     contadorPulsos, FALLING);
32
33     Serial.println("Inicializando SD...");
34     if (!SD.begin(pinCS)) {
35         Serial.println("Erro ao inicializar SD!");
36         while (1); // trava aqui se nao encontrar SD
37     }
38     Serial.println("SD OK!");

```

```
38
39 // Abre arquivo para gravacao (cria novo)
40 SD.remove("dados777.txt");
41 Serial.println("Novo Arquivo");
42
43 arquivo = SD.open("dados777.txt", FILE_WRITE);
44 if (!arquivo) {
45     Serial.println("Erro ao abrir arquivo!");
46     while (1);
47 }
48 Serial.println("Leitura Encoder + Corrente + Tensao");
49 }
50
51 void loop() {
52     static unsigned long tempoAnterior = 0;
53     unsigned long tempoAtual = millis();
54
55     if (tempoAtual - tempoAnterior >= 1000) { // atualizacao a cada
56         1 segundo
57         tempoAnterior = tempoAtual;
58
59         // --- Encoder ---
60         noInterrupts();
61         unsigned int pulsos = contagem;
62         contagem = 0;
63         interrupts();
64
65         float voltasPorSegundo = pulsos / (float)furosEncoder;
66         float rpm = voltasPorSegundo * 60.0;
67
68         // --- Corrente ---
69         int valorADCCorrente = analogRead(pinCorrente);
70         float corrente = ((valorADCCorrente - 510.0) / 513.5) * 160.0;
71
72         // --- Tensao ---
73         int valorADCTensao = analogRead(pinTensao);
74         float tensao = (valorADCTensao * (5.0 / 1023.0)) * 10.3;
75
76         // --- Serial ---
77         Serial.print("Pulsos: "); Serial.print(pulsos);
78         Serial.print(" | RPM: "); Serial.print(rpm, 1);
```

```
78 Serial.print(" | Corrente: "); Serial.print(corrente, 2);  
    Serial.print(" A");  
79 Serial.print(" | Tensao: "); Serial.print(tensao, 2);  
    Serial.println(" V");  
80  
81 // --- SD ---  
82 if (arquivo) {  
83     arquivo.print(millis()); arquivo.print(";");  
84     arquivo.print(pulsos); arquivo.print(";");  
85     arquivo.print(rpm, 1); arquivo.print(";");  
86     arquivo.print(corrente, 2); arquivo.print(";");  
87     arquivo.println(tensao, 2);  
88     arquivo.flush(); // forca gravacao no SD  
89 }  
90 }  
91 }
```

## APÊNDICE B – SCRIPT DO ALGORITMO PARA ESTIMAR PARÂMETROS INTERNOS DO MOTOR DE INDUÇÃO NO MATLAB

```

1  % Parametros conhecidos:
2  VL = 51;           % Tensao de linha
3  IL = 132;         % Corrente nominal
4  P3f = 6000;       % Potencia trifasica de entrada
5  RPM = 4420;       % Velocidade
6  R1 = 0.9174;      % Resistencia do estator
7  alpha = 0.58;    % Relacao de reatancias
8  Ip = 2;           % Corrente de partida
9
10 % Inicializacao das variaveis
11 s = 0.022;        % Escorregamento nominal
12 X1 = 0;           % Reatancia do estator
13 X2 = 0;           % Reatancia do rotor
14 Xm = 100;         % Reatancia de magnetizacao
15 Rc = 10000;       % Resistencia no ferro
16 E1 = VL;          % Tensao interna do estator
17 I2 = IL;          % Corrente no rotor
18
19 % Definir a tolerancia para convergencia
20 epsilon = 1e-6;
21
22 % Funcao para calcular R2 a partir da equacao de Gauss-Seidel
23 R2_calc = @(E1, s, X2, PEF) s * (3 * E1^2 + sqrt(9 * E1^4 - 4
24     * PEF^2 * X2^2)) / (2 * PEF);
25
26 % Funcao para calcular PEF
27 PEF = @(P3f, PCE) P3f - PCE;
28
29 % Loop iterativo de Gauss-Seidel
30 max_iter = 1000; % Numero maximo de iteracao
31 for iter = 1:max_iter
32     % Passo 5 - Atualizacao de R2
33     R2_new = R2_calc(E1, s, X2, PEF(P3f, 3*R1*IL^2));
34
35     % Atualizar X1, X2, Xm e Rc
36     X1 = alpha * X2 / (1 + alpha);
37     X2 = Xm / (1 + alpha);

```

```
38     % Passo 6 - Calcular XRb e atualizar E1, I2
39     XRb = sqrt(VL^2 / Ip^2 - (R1 + R2_new)^2);
40     E1 = VL; % Assumir que E1 permanece constante
41     I2 = IL; % Corrente no rotor, similar ao caso de partida
42
43     % Verificar se a tolerancia foi atendida
44     if abs(R2_new - R2) < epsilon
45         break;
46     end
47
48     R2 = R2_new; % Atualizar R2 para a proxima iteracao
49 end
50
51 % Resultados estimados
52 disp('Parametros Estimados:');
53 fprintf('R2: %.4f \n', R2);
54 fprintf('X1: %.4f \n', X1);
55 fprintf('X2: %.4f \n', X2);
56 fprintf('Xm: %.4f \n', Xm);
57 fprintf('Rc: %.4f \n', Rc);
```