

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – DEE

WILLIAM DOS SANTOS

**ESTUDO E INTEGRAÇÃO DE UM POWERTRAIN HÍBRIDO EM VEÍCULOS
COMERCIAIS**

JOINVILLE

2025

WILLIAM DOS SANTOS

**ESTUDO E INTEGRAÇÃO DE UM POWERTRAIN HÍBRIDO EM VEÍCULOS
COMERCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Mezaroba

JOINVILLE

2025

,
Estudo e Integração de um Powertrain Híbrido em
Veículos Comerciais / William dos Santos. - Joinville,
2025.

120 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Mezaroba.

.
Trabalho de conclusão de curso (TCC) - Universidade
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Tecnológicas, Bacharelado em Engenharia Elétrica ,
Joinville, 2025.

1. Powertrain elétrico. 2. Implementação. 3. Veículo
Elétrico.

I. Mezaroba, Prof. Dr. Marcello. III. Universidade
do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Tecnológicas, Bacharelado em Engenharia Elétrica . IV.
Estudo e Integração de um Powertrain Híbrido em Veículos
Comerciais.

WILLIAM DOS SANTOS

**ESTUDO E INTEGRAÇÃO DE UM POWERTRAIN HÍBRIDO EM VEÍCULOS
COMERCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Programa de Graduação em Engenharia Elétrica
do Centro de Ciências Tecnológicas da Univer-
sidade do Estado de Santa Catarina, como requi-
sito parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Mezaroba

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcello Mezaroba
Universidade do estado de santa catarina

Membros:

Ms. Eng. Luiz Henrique Meneghetti
Convidado

Ms. Eng. Robert Uiliam Marin Viaro
Convidado

Joinville, 05 de dezembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à minha família, em especial aos meus pais, João Carlos e Roseli, e ao meu irmão Geiser, pelo apoio constante, pelos ensinamentos e pela base que foi fundamental para a conclusão desta jornada.

Agradeço a Universidade do Estado de Santa Catarina por possibilitar uma formação completa por meio de um ensino público e de excelência.

Ao Professor Marcelo Mezaroba, pela orientação, disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados ao longo da graduação.

Aos professores do nPEE, pelas contribuições acadêmicas e pela dedicação ao ensino.

Por fim, registro meu agradecimento aos amigos que tornaram esta trajetória mais leve e descontraída. Em especial, aos meus amigos José Victor, Lucas Sales e Jhon Brajhan, que participaram ativamente no desenvolvimento deste projeto.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo e a integração de um powertrain elétrico para uma van comercial, visando a conversão para um veículo elétrico híbrido *Through-The-Road* (TTR). A arquitetura TTR foi escolhida por simplificar a integração, mantendo o motor a combustão no eixo dianteiro e adicionando um motor de tração elétrico no eixo traseiro. O projeto focou na implementação em bancada do sistema elétrico, composto por um *pack* de baterias WEG BPW01, um inversor WEG CVW500, um motor de indução trifásico de 33 kW, além do carregador de bordo e do módulo auxiliar de potência. A unidade de controle do veículo FT450 foi utilizada para o gerenciamento centralizado e a comunicação com todos os periféricos via rede CAN. O trabalho detalha o projeto do sistema de arrefecimento e dos circuitos elétricos e, por fim, valida a integração do sistema através de testes em bancada. Os resultados confirmaram o correto funcionamento do controle vetorial de velocidade e a coerência dos mapas de torque e regeneração configurados na VCU, essenciais para o controle dinâmico da tração e a segurança do *pack* de baterias. O estudo estabelece a base para a instalação do sistema no veículo e a otimização final do desempenho em condições de carga.

Palavras-chave: Veículos Elétricos, *Powertrain* Elétrico, Veículo Elétrico Híbrido.

ABSTRACT

This work presents the study and integration of an electric powertrain for a commercial van, aiming for its conversion into a Through-The-Road (TTR) Hybrid Electric Vehicle. The TTR architecture was selected due to its capacity to simplify integration, preserving the existing combustion engine on the front axle while adding an electric traction motor on the rear axle. The project focused on the bench implementation of the electrical system, which consists of a WEG BPW01 battery pack, a WEG CVW500 inverter, and a 33 kW three-phase induction motor, alongside the On-Board Charger (OBC) and the Auxiliary Power Module (APM). The FT450 Vehicle Control Unit (VCU) was employed for centralized management and communication with all peripherals via the CAN network. This study details the design of the cooling system and the electrical circuits, finally validating the system integration through comprehensive bench tests. The results confirmed the proper functioning of the vector speed control and the coherence of the torque and regeneration maps configured within the VCU, which are essential for dynamic traction control and the safety of the battery pack. This research establishes a solid foundation for the subsequent installation of the system into the vehicle and the final performance optimization under real-world load conditions.

Keywords: Electric Vehicles, Electric Powertrain, Hybrid Electric Vehicle.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – <i>Powertrain</i> híbrido em série.	21
Figura 2 – <i>Powertrain</i> híbrido em paralelo.	22
Figura 3 – <i>Powertrain</i> híbrido em série/paralelo.	23
Figura 4 – <i>Powertrain</i> híbrido configuração <i>Through-The Road</i>	24
Figura 5 – Preço médio das baterias de íons de lítio nos últimos anos.	25
Figura 6 – Métodos de carregamento de baterias.	26
Figura 7 – Plugues do Tipo 1, Tipo 2 e CCS Combo 2.	27
Figura 8 – Esquema geral do sistema de energia de um VE.	29
Figura 9 – Representação sistema híbrido da Van.	36
Figura 10 – Pack de baterias WEG BPW01.	36
Figura 11 – Motor trifásico de indução para o <i>powertrain</i> elétrico.	38
Figura 12 – Inversor de frequência CVW500 com IP66.	40
Figura 13 – Blocodiagrama do CVW500.	42
Figura 14 – OBC Dilong DA6K6M20C-360C.	43
Figura 15 – Conversor DCDC TDC-IY-320-12.	44
Figura 16 – Unidade de Controle do Veículo - FT450.	45
Figura 17 – Estrutura da bancada e içamento para o <i>pack</i> de baterias.	48
Figura 18 – Projeto da bancada.	49
Figura 19 – Sistema de arrefecimento.	50
Figura 20 – Esquema hidráulico do sistema de arrefecimento.	51
Figura 21 – Radiador com ventilação forçada.	52
Figura 22 – Montagem do sistema de arrefecimento.	53
Figura 23 – Pontos de conexão da refrigeração do <i>pack</i> de baterias.	54
Figura 24 – Montagem do sistema de refrigeração ao <i>pack</i> de baterias.	54
Figura 25 – Diagrama de conexões.	55
Figura 26 – Esquema elétrico de potência.	56
Figura 27 – Conexões de potência com a bateria e o motor.	57
Figura 28 – Conexão inversor-motor com a correção das fases.	58
Figura 29 – Esquema elétrico da PDU.	59
Figura 30 – Esquema Elétrico do circuito de pré-carga do inversor.	60
Figura 31 – Modelos de contadores sugeridos.	60
Figura 32 – Projeto da PDU realizado em parceria com a empresa EVPT - vista externa.	61
Figura 33 – Projeto da PDU realizado em parceria com a empresa EVPT - vista interna.	61
Figura 34 – Esquema elétrico de BT.	62
Figura 35 – Modelagem esquema elétrico de BT.	63
Figura 36 – Montagem esquema elétrico de BT.	64
Figura 37 – Interface para parametrização do inversor CVW500	64

Figura 38 – Estrutura de parâmetros do CVW500.	65
Figura 39 – Ajuste parâmetros da bateria no WPS.	66
Figura 40 – Ajuste parâmetros do motor no WPS.	66
Figura 41 – Blocodiagrama geral para comandos e referências.	67
Figura 42 – Parâmetro de leitura do estado lógico do inversor.	68
Figura 43 – Blocodiagrama controle vetorial com encoder.	70
Figura 44 – Diagrama da rede can instalada na bancada.	73
Figura 45 – Tabela de Frames CAN - Pack de baterias.	74
Figura 46 – Endereços criados para comunicação entre a VCU e o inversor.	75
Figura 47 – Configuração can no WLP.	76
Figura 48 – Exemplo de configuração para o processo de indicação da pré-carga.	77
Figura 49 – Controle lógico do inversor via can.	77
Figura 50 – Interface FTManager.	78
Figura 51 – Configuração inicial do FTManager.	79
Figura 52 – Escolha do inversor a ser utilizado.	79
Figura 53 – Escolha do BMS e ajuste do pack de baterias.	80
Figura 54 – Escolha do modelo do OBC a ser utilizado.	80
Figura 55 – Mapa gerado a partir das informações iniciais.	81
Figura 56 – Curva de torque por posição do pedal.	82
Figura 57 – Curva de torque por rpm.	82
Figura 58 – Curva de torque por SOC da bateria.	83
Figura 59 – Curva de torque por temperatura da bateria.	83
Figura 60 – Curva de regeneração por posição do pedal.	84
Figura 61 – Curva de regeneração por rpm.	84
Figura 62 – Curva de regeneração por SOC da bateria.	85
Figura 63 – Curva de regeneração por temperatura da bateria.	85
Figura 64 – Configuração das entradas.	86
Figura 65 – Configuração das saídas digitais.	86
Figura 66 – Ajuste controle térmico.	87
Figura 67 – Configuração do dashboard da FT450.	88
Figura 68 – Dashboard configurado para os testes em bancada.	88
Figura 69 – Configuração dos alertas.	89
Figura 70 – Esquema de ligações com a VCU.	89
Figura 71 – Ajuste de parâmetros para comunicação com a rede can.	90
Figura 72 – Montagem da VCU em bancada.	91
Figura 73 – Esquema de de chicotes.	92
Figura 74 – Esquema elétrico dos comandos.	93
Figura 75 – Modelagem geral - vista de cima.	94
Figura 76 – Montagem geral - vista de cima.	96

Figura 77 – Montagem final da bancada de testes.	97
Figura 78 – Leitura dos sinais do encoder em rotação nominal.	99
Figura 79 – Leitura realizada através do software WPS.	100
Figura 80 – Leitura realizada com tacômetro diretamente no rotor.	101
Figura 81 – Leitura dos sinais do encoder com metade da rotação nominal.	102
Figura 82 – Leitura realizada no software WPS.	103
Figura 83 – Leitura realizada com tacômetro diretamente no rotor.	104
Figura 84 – Leitura dos sinais do encoder em rotação nominal com sentido de giro anti- horário.	105
Figura 85 – Teste 1 do controle variando a velocidade a cada 1000 rpm até chegar na rotação nominal.	106
Figura 86 – Teste 2 do controle aceleração e desaceleração.	106
Figura 87 – Teste 3 do controle variando a velocidade de forma abrupta.	107
Figura 88 – Tensão de linha entre as fases plotado no matlab através dos pontos capturados no osciloscópio com motor operando em rotação nominal.	108
Figura 89 – Tensão de linha entre as fases utilizando filtro do osciloscópio para suavização com motor operando em rotação nominal.	108
Figura 90 – Tensão de linha entre as fases plotado no matlab através dos pontos capturados no osciloscópio com motor operando com metade da rotação nominal.	109
Figura 91 – Tensão de linha entre as fases utilizando filtro do osciloscópio para suavização com motor operando com metade da rotação nominal.	109
Figura 92 – Tensão entre as fases V e W e corrente na fase W.	110
Figura 93 – Tensão entre as fases V e W e corrente na fase V.	110
Figura 94 – Tensão entre as fases V e W e corrente na fase U.	110
Figura 95 – Modulação PWM com motor em metade da rotação nominal.	111
Figura 96 – Modulação PWM com motor em rotação nominal.	111
Figura 97 – Registro de dados da operação, evidenciando o comando de torque com o motor a vazio e a limitação do torque entregue pela rampa de aceleração.	112
Figura 98 – Registro de dados da operação, ilustrando a transição do torque de tração para o freio regenerativo após a desativação do comando do acelerador.	113
Figura 99 – Registro de dados da operação, demonstrando a desativação do freio regene- rativo em conformidade com o mapa.	113
Figura 100 – Dashboard da FT450 com sistema em operação.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos carregadores baseada nos níveis de potência.	26
Tabela 2 – Comparação de desempenho entre diferentes tipos de motores elétricos de tração para VEs.	32
Tabela 3 – Características técnicas do <i>Pack</i> de Baterias WEG BPW01-73,5kWh.	37
Tabela 4 – Principais especificações do motor de tração.	39
Tabela 5 – Modelos do CVW500.	40
Tabela 6 – Especificações Técnicas Principais do OBC Dilong DA6K6M20C-360C.	43
Tabela 7 – Especificações Técnicas e de Desempenho do APM TDC-IY-320-12.	44
Tabela 8 – Comparativo de Hardware da Linha PowerFT (FT450, FT550 e FT600).	46
Tabela 9 – Especificações de Refrigeração do Sistema.	51
Tabela 10 – Cargas do circuito de baixa tensão e respectivos fusíveis de proteção.	62
Tabela 11 – Exemplo de estados do inversor em uma operação.	69
Tabela 12 – Parâmetros do motor e valores encontrados.	71
Tabela 13 – Principais parâmetros ajustados para operação do inversor com controle vetorial.	72
Tabela 14 – Estrutura dos IDs de Comunicação CAN do Pack de Baterias.	74
Tabela 15 – Descrição dos Parâmetros Monitorados no Dashboard da FT450 (Sistema em Operação).	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APM	<i>Auxiliary power module</i> - Módulo auxiliar de potência
AT	Alta Tensão
AWD	<i>All Wheel Drive</i> – Tração nas quatro rodas
BEV	<i>Battery electric vehicle</i> - Veículo elétrico a bateria
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i> - Corrente contínua sem escovas
BMS	<i>Battery management system</i> - Sistema de gerenciamento de bateria
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCS	<i>Combined Charging System</i> – Sistema de carregamento combinado
CLP	Controlador Lógico Programável
CVT	<i>Continuously variable transmission</i> - Transmissão continuamente variável
ECU	<i>Electronic control unit</i> - Unidade de controle eletrônico
ESS	<i>Energy storage system</i> - Sistema de armazenamento de energia
FCEV	<i>Fuel cell electric vehicle</i> - Veículo elétrico a célula de combustível
HVIL	<i>High Voltage Interlock Loop</i> – Loop de Intertravamento de Alta Tensão
ICE	<i>Internal combustion engine</i> - Motor de combustão interna
IHM	Interface Homem-Máquina
IM	<i>Induction motor</i> - Motor de indução
IPMSM	<i>Interior permanent magnet synchronous motor</i> - Motor síncrono de ímã permanente interno
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
OBC	<i>On-board charger</i> - Carregador de bordo
PCM	<i>Phase change materials</i> - Materiais de mudança de fase
PDU	<i>Power Distribution Unit</i> - Unidade de Distribuição de Potência
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> - Células a combustível de membrana de troca de prótons
PHEV	<i>Plug-in hybrid electric vehicle</i> - Veículo elétrico híbrido plug-in
PMSM	<i>Permanent magnet synchronous motor</i> - Motor síncrono de ímã permanente
PSD	<i>Power split device</i> - Dispositivo divisor de potência

SCIM	<i>Squirrel Cage Induction Motor</i> – Motor de indução com rotor de gaiola
SRM	<i>Switched reluctance motor</i> - Motor de relutância chaveada
TEWC	<i>Totally Enclosed Water Cooled</i> – Totalmente fechado e refrigerado a água
TTR	<i>Through-the-Road</i> - Através da estrada
TPS	<i>Throttle Position Sensor</i> - Sensor de posição do acelerador
VCU	<i>Vehicle control unit</i> - Unidade de controle do veículo
VE	Veículo elétrico
VEH	Veículo elétrico híbrido
WLP	<i>WEG Ladder Programmer</i> – Programador Ladder WEG
WPS	<i>WEG Programming Software</i> – Software de programação WEG

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS	16
1.2	PROBLEMÁTICA	17
1.3	OBJETIVO GERAL	18
1.4	OBJETIVO ESPECÍFICO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	CATEGORIZAÇÃO DOS VEÍCULOS ELETRIFICADOS	19
2.2	CATEGORIZAÇÃO DOS VEÍCULOS HÍBRIDOS	19
2.2.1	Grau de hibridização	19
2.2.2	Arquiteturas do <i>powertrain</i>	20
2.2.2.1	<i>Configuração série</i>	20
2.2.2.2	<i>Configuração paralela</i>	21
2.2.2.3	<i>Configuração série-paralelo</i>	22
2.2.2.4	<i>Configuração Through-The Road (TTR)</i>	23
2.3	COMPOSIÇÃO DO <i>POWERTRAIN</i> DE UM VE	24
2.3.1	Armazenadores de energia	24
2.3.1.1	<i>Baterias</i>	24
2.3.1.2	<i>Células a Combustível</i>	27
2.3.1.3	<i>Ultracapacitores</i>	28
2.3.1.4	<i>Volantes de Inércia</i>	28
2.3.1.5	<i>Armazenadores Híbridos</i>	28
2.3.2	Conversores de potência	29
2.3.2.1	<i>Conversores CC/CC</i>	29
2.3.2.2	<i>Conversores CC/CA</i>	29
2.3.2.3	<i>Carregamento on-board</i>	30
2.3.3	Unidade de controle do veículo	30
2.3.4	Máquina elétrica	30
2.3.5	Sistema de refrigeração	33
2.3.6	Sistema de transmissão	33
2.4	CONSIDERAÇÃO FINAIS	34
3	PROJETO ELETRIFICA E ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES	35
3.1	<i>PACK DE BATERIAS BPW01</i>	36
3.2	<i>POWERTRAIN</i>	37
3.2.1	Motor de tração	38

3.2.2	Inversor WEG CVW500	39
3.3	OBC	43
3.4	APM	44
3.5	UNIDADE DE CONTROLE DO VEÍCULO - FT450	45
3.6	CONSIDERAÇÕES	47
4	IMPLEMENTAÇÃO	48
4.1	ESTRUTURA	48
4.2	SISTEMA DE ARREFECIMENTO	49
4.3	SISTEMA ELÉTRICO	55
4.3.1	Circuito de Potência	56
<i>4.3.1.1</i>	<i>Unidade de Distribuição de Potência</i>	<i>59</i>
4.3.2	Circuito de Baixa Tensão	61
4.4	PARAMETRIZAÇÃO E OPERAÇÃO	64
4.4.1	Estrutura de Parâmetros e Configuração Inicial	65
<i>4.4.1.1</i>	<i>Configurações essenciais da bateria e motor</i>	<i>66</i>
4.4.2	Estrutura de Comando e Estado Lógico	66
<i>4.4.2.1</i>	<i>Estrutura de comando</i>	<i>66</i>
<i>4.4.2.2</i>	<i>Estado lógico do inversor e SoftPLC</i>	<i>68</i>
4.4.3	Configuração do Controle Vetorial com Encoder	69
4.4.4	Rede can e integração com a VCU	72
<i>4.4.4.1</i>	<i>Comunicação CAN do pack de baterias</i>	<i>73</i>
<i>4.4.4.2</i>	<i>Configuração do inversor</i>	<i>74</i>
4.4.5	Configuração da FT450	77
<i>4.4.5.1</i>	<i>Ajuste da eletrificação</i>	<i>78</i>
<i>4.4.5.2</i>	<i>Mapa de torque</i>	<i>81</i>
<i>4.4.5.3</i>	<i>Acionamento dos periféricos</i>	<i>86</i>
<i>4.4.5.4</i>	<i>Painel de diagnóstico</i>	<i>87</i>
4.4.6	Ajuste dos parâmetros do inversor para comunicação via rede can	90
4.4.7	Circuito e chicotes	92
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5	TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	98
5.1	TESTES COM ENCODER INCREMENTAL	98
5.2	TESTES REALIZADOS COM CONTROLE DE VELOCIDADE ATRAVÉS DO INVERSOR	105
5.3	TESTES REALIZADOS COM A VCU	111
5.4	CONSIDERAÇÕES	115
6	CONCLUSÃO	116

REFERÊNCIAS	117
--------------------	------------

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo contextualizar o leitor sobre a evolução do transporte automotivo, destacando a relevância e evolução dos veículos elétricos (VEs) e veículos elétricos híbridos (VEHs) no cenário atual, bem como os objetivos deste trabalho.

1.1 HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS

O desenvolvimento de veículos com propulsão elétrica remonta ao século XIX. Logo após a descoberta do eletromagnetismo em 1820, surgiram os primeiros motores elétricos experimentais e rudimentares, sendo logo utilizados para impulsionar veículos. Exemplos iniciais incluem o motor elétrico básico de Ányos Jedlik em 1827, usado em um pequeno carro de brinquedo em 1828, e o motor primitivo de Thomas Davenport em 1834, que impulsionou uma locomotiva elétrica de brinquedo em 1835 (CHAU; WONG, 2002). Contudo, os avanços foram além dos brinquedos; Robert Anderson é reportado por ter feito uma carruagem elétrica rudimentar entre 1832 e 1839 na Escócia, e em 1839, utilizou energia elétrica em um automóvel. Robert Davidson construiu a primeira locomotiva elétrica de tamanho real em 1842, testada em trilhos, e mais tarde, um carro elétrico em 1873 que é frequentemente referido como o primeiro veículo rodoviário elétrico funcional, embora ainda usasse baterias descartáveis (GUARNIERI, 2012).

Um grande avanço para os veículos elétricos práticos veio por volta de 1870 com a invenção da bateria recarregável prática, inicialmente a bateria de chumbo-ácido em 1859, e o desenvolvimento de motores elétricos mais potentes e eficientes. Isso permitiu o surgimento de carros elétricos mais viáveis em diversos países (GUARNIERI, 2012).

Na virada do século XX (aproximadamente 1900-1910), os carros elétricos alcançaram um pico de sucesso. Nos Estados Unidos, eles detinham 38% do mercado automobilístico, superando os carros a gasolina (22%) e ficando ligeiramente atrás apenas dos carros a vapor (40%). Sua popularidade se devia às vantagens que apresentavam na época: eram silenciosos, inodoros, confiáveis, simples de dirigir e fáceis de dar partida. Em contraste, os veículos a gasolina da época eram barulhentos, cheirosos, inconstantes, vibravam muito e eram difíceis e perigosos de ligar com manivela. Conceitos de veículos híbridos também surgiram nesse período, como o Auto-Mixte de Henri Pieper em 1896, que patenteou um esquema híbrido em 1905, e o carro de Ferdinand Porsche no início do século XX (GUARNIERI, 2012).

Entretanto, o declínio dos VEs teve início na segunda década do século XX. Isso ocorreu devido a uma combinação de fatores: avanços significativos nos motores a combustão interna, notadamente a invenção e a industrialização do motor de partida elétrico em 1912, que eliminou a dificuldade da partida manual; a descoberta de grandes reservas de petróleo, que tornou a gasolina barata; a melhora da infraestrutura rodoviária, que aumentou a demanda por veículos de maior alcance, uma limitação dos VEs da época; e a produção em massa, especialmente pelo modelo T de Henry Ford, que tornou os carros a gasolina drasticamente mais acessíveis do

que os VEs, que eram caros e frequentemente considerados artigos de luxo. As limitações das baterias da época em termos de custo, peso, autonomia limitada (30-60 km) e tempo de recarga prolongado, que podia levar de duas a oito horas, também foram fatores contribuintes (SITU, 2009).

O interesse em VEs e VEHs foi reacendido nas décadas de 1960 e 1970, impulsionado pela crise de energia e pela crescente preocupação com a poluição ambiental. O governo dos EUA, por exemplo, testou diversos VEs e VEHs. Contudo, o verdadeiro impulso recente para os VEHs ocorreu no final dos anos 90, com o lançamento do Toyota Prius no mercado japonês em 1997 e o Honda Insight em 1999. Estes modelos demonstraram a maturidade e o potencial da tecnologia VEH. Os VEHs, que combinam um motor a combustão interna (ICE)¹ e um motor elétrico, são frequentemente vistos como um compromisso entre os veículos puramente elétricos e os convencionais a combustão, oferecendo vantagens como a redução da poluição e do consumo de combustível (PENINA; TURYGIN; RACEK, 2010).

1.2 PROBLEMÁTICA

Atualmente, a ascensão dos VEs e VEHs no mercado é impulsionada por uma convergência de fatores. A preocupação crescente com o meio ambiente e a necessidade de reduzir as emissões de poluentes são motivos centrais, especialmente com a imposição de padrões de emissão mais rigorosos e a demanda por veículos sustentáveis (HESLA, 2009). A instabilidade e o aumento dos preços do petróleo, juntamente com a busca por independência energética, também desempenham um papel crucial. A redução significativa no consumo de combustível oferecida pelos VEHs e VEs responde diretamente a essa demanda do mercado. De fato, em uma base de ciclo completo de combustível, os híbridos podem ser cerca de um oitavo tão poluentes quanto um veículo convencional bem ajustado, e os veículos elétricos puros, um décimo (PENINA; TURYGIN; RACEK, 2010). Estudos indicam que a substituição de veículos com motor de combustão interna por VEs pode reduzir as emissões de GEE em até 75% até 2050 (CAO et al., 2021).

O mercado de veículos elétricos tem demonstrado uma aceitação crescente. Projeções baseadas nas atuais políticas energéticas e climáticas indicam que a participação nas vendas globais de veículos leves (incluindo carros de passageiros e veículos comerciais leves) alcançará quase 55% em 2035. Essa tendência está se materializando rapidamente, as vendas globais de carros elétricos se aproximaram de 14 milhões de unidades em 2023, o que representa 18% de todos os carros vendidos no mundo. Esse resultado é um aumento notável em relação à participação de 14% alcançada em 2022, confirmando a progressão dos VEs (IEA, 2024). Além disso, a tendência de eletrificação na indústria automotiva está sendo acelerada pela introdução de veículos elétricos híbridos plug-in (PHEVs). Diferentemente dos VEHs convencionais, um PHEV pode ter sua bateria alimentada também pela rede elétrica, além do gerador interno. PHEVs

¹ Do inglês, *Internal Combustion Engine*.

oferecem flexibilidade e maior autonomia, sendo vistos como uma nova tendência por oferecerem um alcance estendido no modo elétrico e a possibilidade de zero emissão em distâncias curtas (quando operando em modo elétrico com alcance suficiente). A eletrificação do setor de transporte está evoluindo em um ritmo muito rápido com penetração acelerada. Os veículos elétricos (VEs), que abrangem BEVs, HEVs e PHEVs, estão rapidamente se tornando o padrão por suas vantagens sobre os veículos de combustão interna. Esse aumento na aceitação e o desenvolvimento contínuo dos VEs são impulsionados por avanços tecnológicos constantes. Isso inclui o desenvolvimento da tecnologia de baterias, sendo as de íons de lítio proeminentes, consideradas fundamentais para o avanço do mercado. A sofisticação dos sistemas de gerenciamento e controle, como as unidades de controle eletrônico (ECU) ² integradas e as unidades de controle do veículo (VCU) ³, que desempenham um papel crucial na otimização da eficiência energética, também contribui para essa aceitação. O desenvolvimento da infraestrutura de carregamento é outro fator importante, com pesquisas contínuas nas tecnologias e sistemas de carregamento para VEs (NAQVI et al., 2024). Adicionalmente, o apoio governamental é essencial, com muitos países estabelecendo metas para reduzir as vendas de veículos a combustão interna e promovendo a eletrificação através de legislações que definem objetivos ambiciosos para o futuro próximo. Essa tendência de eletrificação é vista como o caminho futuro para o desenvolvimento de veículos, consolidando os VEs como uma alternativa valorosa (IEA, 2024).

1.3 OBJETIVO GERAL

Diante deste contexto histórico de desenvolvimento e da crescente relevância atual dos veículos elétricos e híbridos, este trabalho busca implementar um sistema de eletrificação híbrido para aplicação futura em uma van de transporte de passageiros, incluindo sua validação em bancada para posterior adaptação no veículo.

1.4 OBJETIVO ESPECÍFICO

1. Estudar as características e topologias de sistemas híbridos aplicados em veículos;
2. Projetar e montar uma bancada de testes que integre o *powertrain* elétrico, o carregador de bordo e o módulo auxiliar de potência;
3. Desenvolver e implementar o sistema de arrefecimento e os esquemas elétricos de potência e comando;
4. Integrar a VCU para o gerenciamento do veículo via protocolo CAN;
5. Testar e validar o sistema em bancada.

² Do inglês, *Electronic control unit*.

³ Do inglês, *Vehicle control unit*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A categorização de um veículo como elétrico, híbrido ou outra tipologia é determinada essencialmente pela arquitetura de seu sistema de propulsão, powertrain. O sistema define os processos de geração, armazenamento, conversão e distribuição de energia para tração, determinando a classificação técnica e funcional do veículo (EHSANI et al., 2018). Neste capítulo, serão abordadas as principais arquiteturas existentes no mercado, com especial atenção às soluções com eixos de tração independentes, dado seu destaque e aplicabilidade em projetos de eletrificação veicular.

2.1 CATEGORIZAÇÃO DOS VEÍCULOS ELETRIFICADOS

Os veículos eletrificados podem ser classificados nas principais categorias, conforme suas configurações de powertrain e fontes de energia (EHSANI et al., 2021):

- Veículo elétrico a bateria (BEV) ¹: utiliza exclusivamente um motor elétrico alimentado por uma bateria como fonte de tração. A recarga é feita conectando-se à rede elétrica e por frenagem regenerativa. Não possui motor a combustão, emissões locais ou consumo de combustível fóssil.
- Veículo elétrico híbrido (VEH): Utiliza duas fontes de energia distintas para propulsão, combinando um motor a combustão interna com um ou mais motores elétricos. A energia elétrica é gerada a bordo, seja pela ação do ICE como gerador, seja por recuperação via frenagem regenerativa, sem recarga externa direta. O sistema integra unidades de potência, propulsão (mecânica/elétrica) e armazenamento de energia (baterias, ultracapacitores), permitindo maior eficiência energética em comparação a veículos convencionais.
- Veículo elétrico a célula de combustível (FCEV) ²: propulsionado apenas por motor elétrico, mas com energia proveniente de uma célula de combustível que converte hidrogênio em eletricidade. Pode contar com baterias ou supercapacitores para armazenar energia regenerada. Tem emissão local zero, apenas de vapor d'água.

2.2 CATEGORIZAÇÃO DOS VEÍCULOS HÍBRIDOS

2.2.1 Grau de hibridização

Uma maneira de classificar os veículos híbridos é pelo seu grau de hibridização, que se refere à extensão da participação do sistema elétrico na propulsão do veículo. Esta classificação ajuda a entender a capacidade de propulsão elétrica e o tamanho dos componentes elétricos (PASCA, 2019). As principais classificações são:

¹ Do inglês, *Battery electric vehicle*.

² Do inglês, *Fuel cell electric vehicle*.

- *Micro-Hybrid*: Nesse tipo, o motor elétrico não participa da tração do veículo. Suas funções limitam-se a sistemas como *start-stop* automático e frenagem regenerativa. Embora contribua para a eficiência energética, ele não fornece torque adicional ao motor a combustão.
- *Mild-Hybrid*: Utiliza um motor-gerador elétrico capaz de fornecer até cerca de 10% da potência máxima do motor térmico. Esse sistema oferece assistência ao motor a combustão em situações de baixa eficiência e permite o desligamento do motor em marcha lenta, operando momentaneamente com energia elétrica. Também conta com recursos como frenagem regenerativa e *start-stop*.
- *Full-Hybrid*: Nesse caso, o motor elétrico contribui com pelo menos 40% da potência total, permitindo que o veículo opere em modo exclusivamente elétrico em determinadas condições. A bateria possui maior capacidade para atender demandas de aceleração e desempenho. É o tipo mais versátil entre os híbridos convencionais.

Além do grau de hibridização, a arquitetura híbrida também pode ser classificada pela possibilidade ou não de recarga externa da bateria:

- **VEH**: Não possui recarga externa. A bateria é recarregada apenas por meio do motor a combustão e frenagem regenerativa.
- **PHEV**: Permite recarga por fonte externa, via rede elétrica. Conta com bateria de maior capacidade, possibilitando rodar distâncias maiores apenas com eletricidade. Reduz significativamente o consumo de combustível e as emissões no modo urbano, quando operando como veículo puramente elétrico.

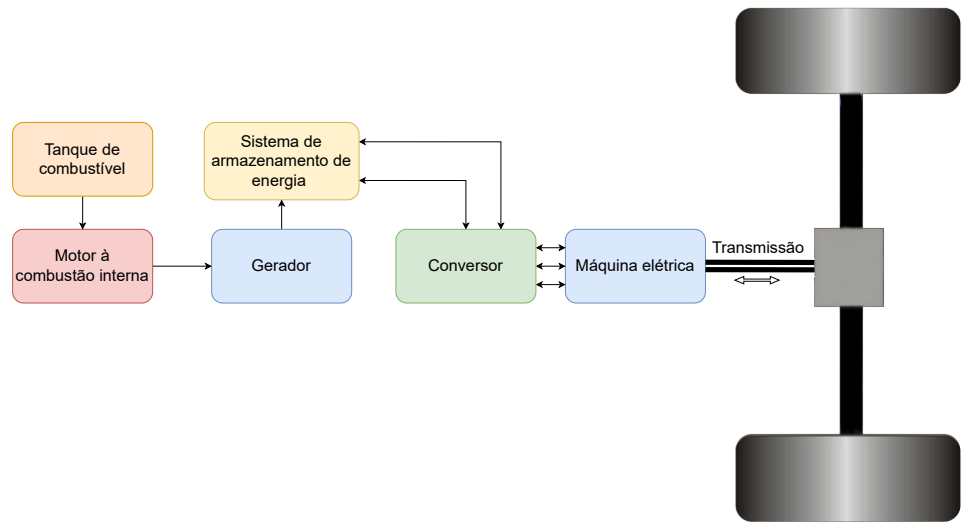
2.2.2 Arquiteturas do *powertrain*

As arquiteturas de veículos híbridos se distinguem pela forma como o motor a combustão interna e os motores elétricos interagem para fornecer tração.

2.2.2.1 Configuração série

Nesta configuração, o motor a combustão aciona apenas um gerador, que produz energia elétrica para alimentar o motor elétrico ou recarregar a bateria. A tração é sempre fornecida exclusivamente pelo motor elétrico (AGARWAL; DEV, 2013). Isso permite que o motor a combustão opere em sua faixa de maior eficiência, independentemente da velocidade do veículo. Como consequência, o sistema apresenta uma transmissão mais simples e um controle mais direto, características vantajosas principalmente em aplicações urbanas e em veículos pesados. No entanto, há perdas associadas à dupla conversão de energia (mecânica → elétrica → mecânica), e os componentes elétricos precisam ser dimensionados para suportar as demandas máximas de potência. A topologia pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 – *Powertrain* híbrido em série.

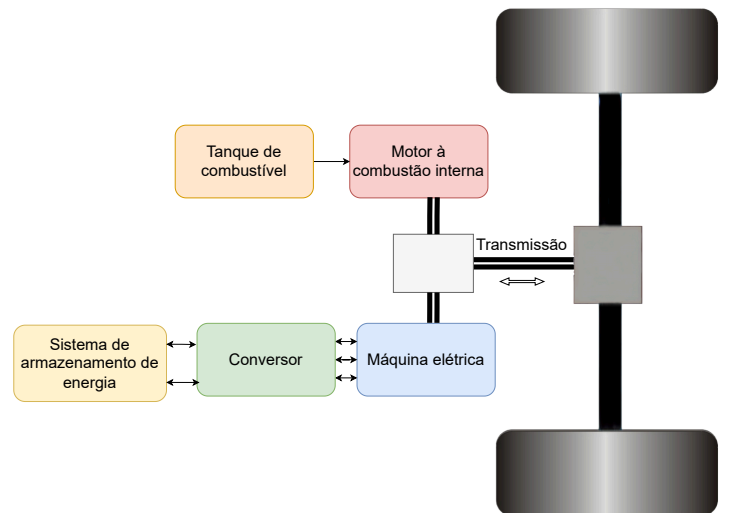


Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

2.2.2.2 Configuração paralela

O motor a combustão e o motor elétrico são conectados mecanicamente ao eixo de tração, permitindo que o veículo seja movimentado por um ou ambos os motores de forma combinada (CHENG, 2016). Esse arranjo proporciona maior eficiência energética e reduz as perdas por conversão, além de oferecer flexibilidade operacional ao sistema de propulsão. No entanto, essa configuração exige um controle mais sofisticado e depende de uma transmissão mais elaborada, o que pode aumentar a complexidade do sistema e os custos de desenvolvimento. A topologia é exemplificada na Figura 2.

Figura 2 – *Powertrain* híbrido em paralelo.



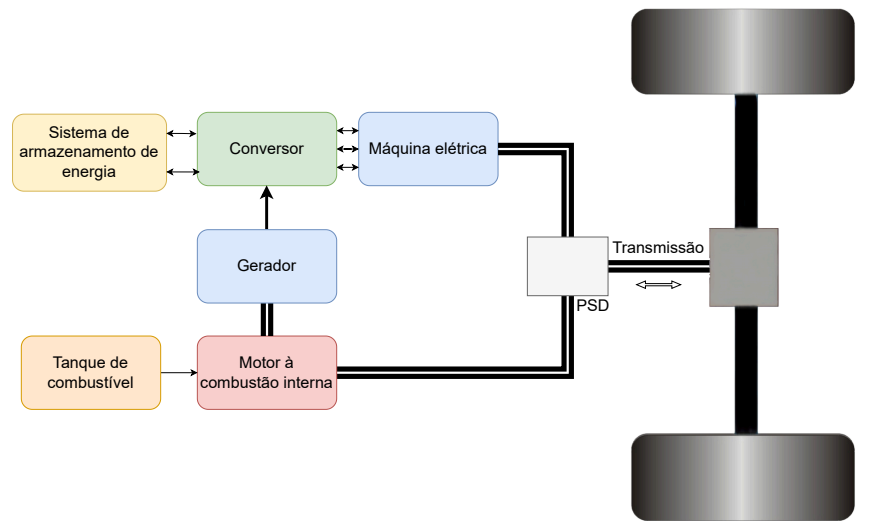
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

2.2.2.3 Configuração série-paralelo

Combina características das arquiteturas série e paralelo. O motor a combustão pode fornecer potência diretamente às rodas e/ou acionar um gerador que alimenta o motor elétrico (CHENG, 2016). Isso é possível devido a um dispositivo divisor de potência (PSD)³, que permite uma divisão dinâmica entre os fluxos mecânico e elétrico (EMADI et al., 2005). Essa configuração proporciona excelente eficiência energética e grande flexibilidade operacional, adaptando-se bem a diferentes condições de carga e condução. Em contrapartida, a integração dos dois modos de operação torna o controle do sistema mais complexo e eleva significativamente os custos de projeto e implementação. A configuração é mostrada na Figura 3.

³ Do inglês, *Power split device*.

Figura 3 – *Powertrain* híbrido em série/paralelo.



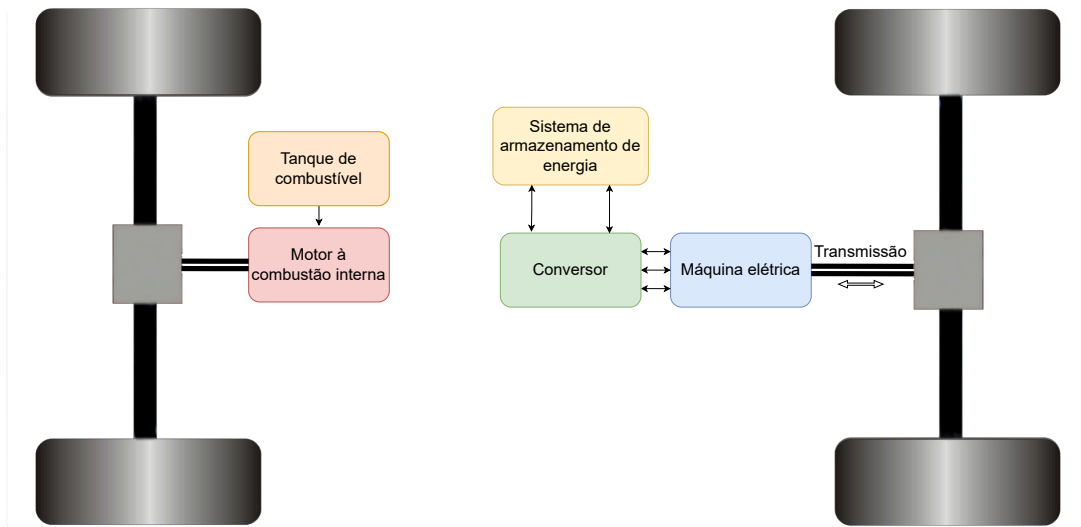
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

2.2.2.4 Configuração *Through-The Road (TTR)*

A TTR é uma variação da arquitetura paralela, em que o motor a combustão e o motor elétrico atuam em eixos diferentes, sem ligação mecânica direta (PASCA, 2019). A coordenação entre os dois eixos é realizada por meio da interação dinâmica das rodas com o solo, ou seja, pela própria estrada. Implementações típicas incluem a adição de um motor elétrico no eixo traseiro, enquanto o motor a combustão permanece no eixo dianteiro, ou ainda a utilização de motores elétricos instalados diretamente nas rodas, o que permite controle independente por roda e viabiliza estratégias avançadas como a vetorização de torque. Essa configuração permite tração integral (AWD)⁴, o que melhora a tração e a estabilidade do veículo, além de simplificar o processo de conversão de veículos convencionais, já que pode ser integrada sem modificações na transmissão original. Por outro lado, o desempenho do sistema depende das condições de aderência entre os pneus e o solo, exigindo maior sofisticação na integração e no controle dos motores para garantir uma operação eficiente e segura. A topologia é exemplificada na Figura 4.

⁴ Do inglês, *All Wheel Drive*.

Figura 4 – *Powertrain* híbrido configuração *Through-The Road*.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

2.3 COMPOSIÇÃO DO *POWERTRAIN* DE UM VE

2.3.1 Armazenadores de energia

A eficiência do combustível e o alcance dos VEs são altamente dependentes do sistema de armazenamento de energia (ESS) ⁵ do veículo (KHALIGH; LI, 2010). Entre as tecnologias mais relevantes destacam-se as baterias eletroquímicas, as células a combustível, os ultracapacitores e os volantes de inércia. Além disso, soluções híbridas que combinam duas ou mais dessas tecnologias têm ganhado destaque por proporcionar maior flexibilidade e desempenho operacional (WANG; YU; ZHU, 2008).

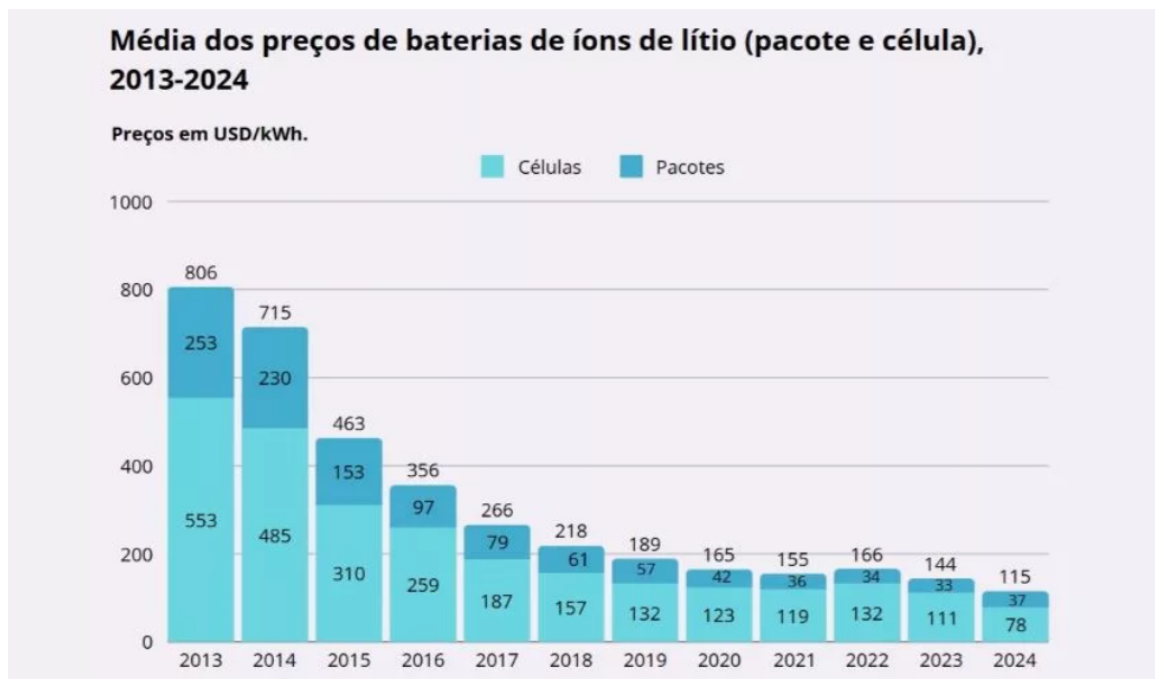
2.3.1.1 Baterias

As baterias constituem o tipo mais comum de ESS em VEs, tendo sido amplamente adotadas em função de sua alta densidade energética, compacidade e confiabilidade. Devido à maturidade tecnológica e ao custo relativamente acessível, são reconhecidas como a principal fonte de energia para VEHs no presente e no futuro próximo. Dentre as principais tecnologias estão (KHALIGH; LI, 2010): as baterias de chumbo-ácido, caracterizadas por baixo custo e robustez, porém com baixa densidade energética, vida útil limitada e elevada sensibilidade a ciclos profundos de descarga; as baterias de Níquel-Metal Hidreto (NiMH), utilizadas amplamente em veículos híbridos de gerações anteriores, que oferecem densidade energética intermediária, boa tolerância térmica e segurança, mas apresentam elevada taxa de autodescarga e são suscetíveis ao efeito memória; e, por fim, as baterias de íon-lítio, amplamente adotadas atualmente, devido

⁵ Do inglês, *Energy storage systems*.

à sua elevada densidade energética, alta eficiência e avançado grau de maturidade tecnológica (PESARAN, 2023). Essas baterias também se destacam por sua longa vida útil, baixa taxa de autodescarga e pela capacidade de fornecer grandes quantidades de energia em volumes reduzidos. No entanto, apresentam como desvantagens o custo de produção historicamente mais elevado, embora esse preço venha apresentando uma tendência de queda significativa ao longo dos anos, conforme ilustrado na Figura 5, e o risco inerente de superaquecimento que exige sistemas de gerenciamento e segurança.

Figura 5 – Preço médio das baterias de íons de lítio nos últimos anos.

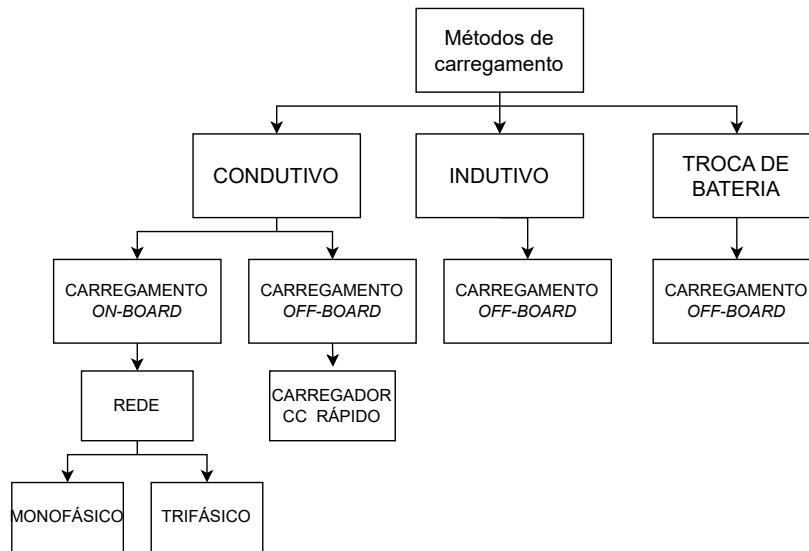


Fonte: BloombergNEF (2024).

Além da escolha da tecnologia de armazenamento, a forma como a bateria é recarregada é um fator determinante para o desempenho e a viabilidade dos VEs. Os métodos de carregamento de baterias podem ser classificados, de maneira geral, em condutivo e indutivo (SETHURAMAN; RUDHRAMOORTHY, 2024). No carregamento condutivo, há conexão física entre o veículo e a fonte de energia por meio de cabos, permitindo o fluxo de corrente elétrica diretamente para a bateria. Esse método pode ser realizado com carregadores *on-board* instalados no próprio veículo ou *off-board*, externos ao sistema veicular, como em estações públicas de recarga. No caso dos carregadores *on-board*, a energia fornecida pela rede, geralmente corrente alternada (CA) é convertida internamente em corrente contínua (CC) adequada para recarregar a bateria através de conversores como CA/CC ou CC/CC. Já no sistema *off-board*, essa conversão é feita externamente antes da energia ser transferida ao veículo (SETHURAMAN; RUDHRAMOORTHY, 2024). Em contrapartida, o carregamento indutivo elimina a necessidade de cabos, transferindo energia por meio de acoplamento magnético entre uma bobina transmissora e uma receptora. Essa abordagem reduz desgaste mecânico, além de possibilitar aplicações como carregamento

com o veículo em movimento (carregamento dinâmico) ou parado (estático) (SUN et al., 2020). Os métodos de carregamento são exemplificados na Figura 6.

Figura 6 – Métodos de carregamento de baterias.



Fonte: Adptada de Sethuraman e Rudhramoorthy (2024).

Adicionalmente, conforme apresentado na Tabela 1, o carregamento condutivo pode ser classificado em níveis de potência de acordo com a norma NBR IEC 61851-1 e os requisitos de conectores definidos pela NBR IEC 62196-2, ambas adaptadas dos padrões internacionais IEC 61851-1 e IEC 62196-2, respectivamente. Essa classificação contempla quatro modos de carregamento: os modos I, II e III correspondem a estruturas *on-board*, utilizando fontes de alimentação CA residenciais ou comerciais, enquanto o modo IV opera com potências superiores, exigindo infraestrutura *off-board* específica para recarga rápida. (ABNT NBR IEC 61851-1, 2021). Ressalta-se que os valores de corrente podem variar, pois os parâmetros das fontes de alimentação CA diferem entre as regiões do mundo, e os limites de tensão e corrente podem ser expandidos conforme os avanços tecnológicos.

Tabela 1 – Classificação dos carregadores baseada nos níveis de potência.

Modo de Recarga	Fonte	Carregador	Corrente [A]	Potência [kW]
I	ca – 1 ϕ /3 ϕ	OBC	16	3,7 – 11
II	ca – 1 ϕ /3 ϕ	OBC	32	7,4 – 22
III	ca – 1 ϕ /3 ϕ	OBC	63	14,5 – 43,5
IV	cc	Externo	Até 400	Até 600

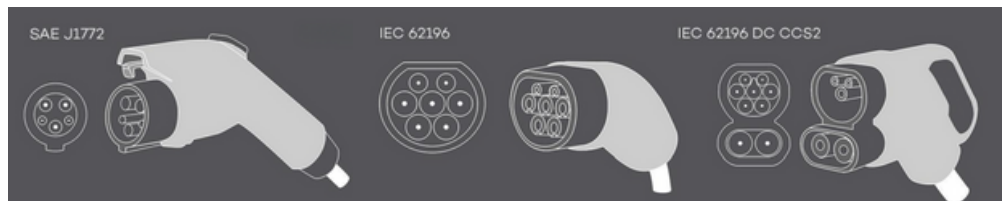
Fonte: International Electrotechnical Commission (2017).

A (ABNT NBR IEC 62196-2, 2021) especifica diferentes tipos de conectores para carregamento, sendo os principais:

- **Tipo 1:** Utilizado para sistemas monofásicos, com uma corrente nominal de até 32 A e uma tensão de até 250 V. É adequado para o modo de carregamento 1.
- **Tipo 2:** Permite carregamento em sistemas monofásicos e trifásicos, com correntes que podem chegar até 63 A e tensões de até 480 V, utilizado nos modos de carregamento 2 e 3, e também é o conector utilizado para o modo 4 quando se considera o sistema de carregamento combinado (CCS) ⁶.
- **Tipo 3:** Projetado para aplicações específicas, com características que permitem a conexão em sistemas monofásicos e trifásicos, com tensões de até 480 V e correntes de até 63 A. É utilizado principalmente no modo de carregamento 3.

A norma não menciona diretamente a preferência por um conector específico, mas descreve as características e compatibilidades de cada tipo. O Tipo 2 é frequentemente considerado o padrão europeu e é compatível com o CCS Combo 2, que é uma combinação de carregamento rápido e convencional. Alguns desses diferentes tipos de conectores podem ser visualizados conforme a Figura 6.

Figura 7 – Plugues do Tipo 1, Tipo 2 e CCS Combo 2.



Fonte: Adaptado de Inmetro (2024).

2.3.1.2 Células a Combustível

As células a combustível, especialmente as de membrana de troca de prótons (PEMFC) ⁷, são uma alternativa promissora para veículos com longa autonomia e reabastecimento rápido. Elas geram eletricidade a partir da reação entre hidrogênio e oxigênio, tendo como único subproduto a água, o que as torna ambientalmente limpas no ponto de uso. Além da alta eficiência energética, destacam-se por permitirem o reabastecimento em poucos minutos, superando a limitação do tempo de recarga das baterias (KHALIGH; LI, 2010).

Por outro lado, o uso de células a combustível ainda enfrenta desafios significativos. O custo dos sistemas permanece elevado, principalmente devido à utilização de catalisadores à base de metais nobres (KHALIGH; LI, 2010). Soma-se a isso a necessidade de uma infraestrutura específica para produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio, que ainda é escassa em muitos países. A complexidade dos sistemas também exige gerenciamento avançado e robustez operacional.

⁶ Do inglês, *Combined Charging System*.

⁷ Do inglês, *proton Exchange Membrane Fuel Cell*.

2.3.1.3 *Ultracapacitores*

Os ultracapacitores, também conhecidos como supercapacitores, armazenam energia por meio de fenômenos eletrostáticos e se destacam por sua alta densidade de potência, permitindo cargas e descargas extremamente rápidas (KHALIGH; LI, 2010). Sua elevada durabilidade e baixa taxa de degradação os torna ideais para aplicações como frenagem regenerativa e picos de aceleração, onde a energia precisa ser absorvida ou entregue rapidamente.

Contudo, esses dispositivos possuem baixa densidade energética em comparação às baterias, o que limita sua utilização como armazenamento principal. Além disso, a tensão de saída varia significativamente durante a descarga, exigindo circuitos de controle adicionais para integração eficiente com o sistema veicular (EHSANI et al., 2021).

2.3.1.4 *Volantes de Inércia*

Volantes de inércia armazenam energia na forma cinética, por meio da rotação de um disco ou rotor de alta velocidade. São capazes de fornecer e absorver energia rapidamente, com alta eficiência e sem desgaste significativo, o que garante longa vida útil (SCHAIBLE; SZABADOS, 1994). Essa tecnologia é útil especialmente em aplicações que requerem resposta imediata a variações de potência.

Como desvantagem, os volantes de inércia apresentam perdas mecânicas altas em ambientes sem vácuo devido à resistência do ar. Isso justifica a necessidade de operar o volante de inércia em vácuo, além disso, o sistema mecânico envolvido é relativamente complexo, exigindo materiais resistentes, sistemas de suspensão magnética e câmaras de vácuo (SONG; YI; XIAOLIANG, 2024). Além disso, questões relacionadas à segurança são críticas, especialmente em caso de falhas mecânicas.

2.3.1.5 *Armazenadores Híbridos*

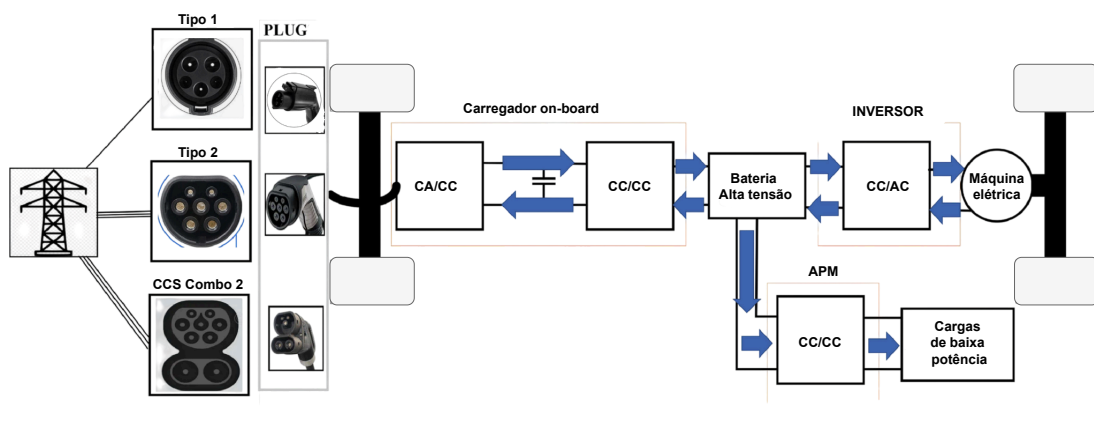
Soluções híbridas de armazenamento têm se tornado cada vez mais relevantes, ao combinar as vantagens de diferentes tecnologias. Sistemas que integram baterias com ultracapacitores podem fornecer tanto densidade energética quanto potência instantânea, otimizando o desempenho do veículo. Da mesma forma, a combinação de células a combustível com baterias permite atender a diferentes perfis de carga, unindo autonomia prolongada e boa resposta dinâmica (KHALIGH; LI, 2010).

Entretanto, a integração de múltiplas tecnologias aumenta a complexidade dos sistemas de controle e requer estratégias de gerenciamento energético mais avançadas (EHSANI et al., 2021). Além disso, o custo total do sistema pode ser superior ao de uma solução única, e questões como volume, peso e confiabilidade devem ser avaliadas.

2.3.2 Conversores de potência

Os conversores de potência em VEs tem como principal função gerenciar o fluxo de energia entre a bateria de alta tensão (AT), a máquina elétrica, o sistema de carregamento e os circuitos auxiliares de baixa potência. Essas unidades realizam a conversão entre diferentes níveis de tensão e tipos de corrente, como CA para CC, CC para CC e CC para CA, garantindo a operação do sistema de propulsão, carregamento e dos dispositivos auxiliares do veículo (BELLUR; KAZIMIERCZUK, 2007). O diagrama geral dos conversores de potência em um VE é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Esquema geral do sistema de energia de um VE.



Fonte: Adptado de Sethuraman e Rudhramoorthy (2024).

2.3.2.1 Conversores CC/CC

Os conversores CC/CC são responsáveis por transformar uma tensão contínua em outra de valor distinto, mantendo elevada eficiência. No contexto automotivo, seu papel mais comum é a alimentação das cargas auxiliares em baixa tensão (BT), geralmente 12 V ou 48 V, como unidades de controle eletrônico, iluminação, sistemas de entretenimento e segurança (BELLUR; KAZIMIERCZUK, 2007). Esse estágio é representado no diagrama pelo módulo de alimentação auxiliar (APM)⁸, que converte a tensão da bateria de AT para os sistemas de baixa potência (BLAABJERG et al., 2021).

Além disso, há conversores CC/CC bidirecionais, capazes de permitir o fluxo de energia nos dois sentidos (BELLUR; KAZIMIERCZUK, 2007). Em aplicações que exigem isolamento elétrico entre subsistemas, são utilizados conversores isolados.

2.3.2.2 Conversores CC/CA

Também conhecido como inversor, têm como função transformar a energia contínua da bateria de tração em corrente alternada para acionar a máquina elétrica principal do veículo. Essa conversão é indispensável para o controle vetorial de torque e velocidade do motor de

⁸ Do inglês, *Auxiliary power module*.

tração. Também podem ser bidirecionais, essa característica é fundamental para funcionalidades como frenagem regenerativa, onde a energia cinética é convertida e armazenada na bateria. Os inversores também podem alimentar cargas auxiliares de alta potência, como sistemas de climatização, que operam em corrente alternada (BELLUR; KAZIMIERCZUK, 2007).

2.3.2.3 Carregamento on-board

O carregador de bordo (OBC) ⁹ tem a função de converter a energia fornecida pela rede elétrica, em CA monofásica ou trifásica, em CC para carregamento da bateria de AT. Além da retificação, o OBC geralmente incorpora um estágio de correção do fator de potência, permitindo um fator próximo de 1, reduzindo perdas e interferências na rede (BLAABJERG et al., 2021).

As topologias mais comuns do OBC incluem dois estágios: um conversor CA/CC para retificação e correção de fator de potência, seguido por um conversor CC/CC que regula a tensão e corrente de carregamento da bateria (BLAABJERG et al., 2021).

2.3.3 Unidade de controle do veículo

A VCU ¹⁰ é a unidade central de comando em VEs, responsável por coordenar o funcionamento dos principais subsistemas, como o powertrain, sistema de gerenciamento da bateria (BMS) ¹¹, frenagem regenerativa e cargas auxiliares. Atuando como núcleo decisório do veículo, a VCU processa dados em tempo real de sensores distribuídos para otimizar desempenho, eficiência energética e segurança do veículo. Suas funções incluem controle de torque, recuperação de energia, estimativa de autonomia, modos de condução e gerenciamento térmico (NAQVI et al., 2024).

Em ICE, a central de controle é denominada central de controle da eletrônica e tem como função supervisionar o funcionamento do motor, regular o sistema de injeção de combustível, controlar os níveis de emissão e operar diversos subsistemas, como o freio ABS e recursos de assistência ao condutor exibidos no painel (NAQVI et al., 2024).

2.3.4 Máquina elétrica

Os motores elétricos são os principais responsáveis pela propulsão em VEs, convertendo energia elétrica em energia mecânica. A escolha da tecnologia de motor impacta diretamente no desempenho, autonomia, eficiência energética, custo e complexidade do sistema de tração. Entre as tecnologias mais utilizadas atualmente estão os motores síncronos de ímã permanente (PMSM) ¹², motores de indução (IM) ¹³, motores de relutância chaveada (SRM) ¹⁴ e os motores CC com

⁹ Do inglês, *On-Board Charger*.

¹⁰ Do inglês, *Vehicle control unit*.

¹¹ Do inglês, *Battery management system*.

¹² Do inglês, *Permanent magnet synchronous motor*.

¹³ Do inglês, *Induction motor*.

¹⁴ Do inglês, *Switched reluctance motor*.

escovas, cada um com características específicas que os tornam mais ou menos adequados a diferentes aplicações veiculares (KUMAR; CHANNI; SINGH, 2024).

Os motores PMSM se destacam pela alta eficiência e elevada densidade de potência, fatores fundamentais para aplicações automotivas que exigem bom desempenho dinâmico e menor volume ocupado (KUMAR; CHANNI; SINGH, 2024). Utilizando ímãs permanentes, geralmente de terras raras como o Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), embutidos no rotor, esses motores dispensam corrente de excitação, proporcionando menor consumo de energia e rápida resposta de torque (DEEPAK et al., 2023). Além disso, operam silenciosamente e com baixa ondulação de torque, o que os torna ideais para aplicações que exigem conforto e precisão (RIND et al., 2017). Contudo, esses benefícios têm um custo: os PMSMs dependem de ímãs caros e sensíveis à temperatura, o que pode elevar os custos de fabricação e apresentar riscos de desmagnetização em condições extremas. Ainda assim, sua eficiência e desempenho superior os colocam entre os motores mais adotados em VEs modernos, como Toyota, Nissan, BMW, Hyundai e Chevrolet (CAO et al., 2021), além dos veículos da Tesla, que utiliza motores síncronos de ímã permanente com rotor interior (IPMSM) ¹⁵ como unidade de tração principal nos modelos Model 3 e Model Y, substituindo os motores de indução usados nos modelos anteriores S e X. Essa mudança permitiu ganhos significativos em eficiência, compactação do trem de força e melhoria no controle térmico, com destaque para o uso de sistemas de refrigeração por óleo diretamente no estator e rotor (LIN et al., 2023).

Os motores DC sem escovas (BLDC) ¹⁶ são uma variação dos PMSM, diferenciando-se principalmente pelo tipo de excitação, que é retangular em vez de senoidal. Eles compartilham muitas vantagens dos PMSMs, como boa eficiência e baixa manutenção, mas podem apresentar maior ondulação de torque e menor suavidade em altas rotações (KUMAR; CHANNI; SINGH, 2024).

Os SRM, por sua vez, apresentam uma estrutura simples, sem ímãs nem enrolamentos no rotor, o que os torna leves, baratos e altamente tolerantes a falhas (YILDIRIM; POLAT; KüRÜM, 2014). Além disso, operam de forma eficiente em uma ampla faixa de velocidades e suportam altas temperaturas. No entanto, essas vantagens são contrabalançadas por desafios como ruído acústico elevado e ondulação de torque significativa (CAO et al., 2021).

Já os motores DC com escovas, amplamente utilizados em veículos elétricos nas décadas anteriores, têm perdido espaço nas aplicações modernas. Apesar da simplicidade construtiva e boa resposta de torque em baixas rotações, eles exigem manutenção frequente devido ao desgaste das escovas e do comutador, além de apresentarem menor eficiência, maior geração de calor e maior volume físico. Com o avanço da eletrônica de potência e o aumento da demanda por soluções mais duráveis e eficientes, seu uso tem se restringido a funções auxiliares ou aplicações de baixa potência (SELVAKUMAR, 2021).

¹⁵ Do inglês, *Interior permanent magnet synchronous motor*.

¹⁶ Do inglês, *Brushless Direct Current*.

E por último, os motores de indução, especialmente os de rotor de gaiola (SCIM) ¹⁷, são valorizados por sua robustez, confiabilidade e baixo custo, não exigindo ímãs nem escovas. Operando de forma assíncrona, esses motores se beneficiam de um projeto consolidado e são facilmente integrados com técnicas modernas de controle vetorial (SELVAKUMAR, 2021). Embora tenham eficiência ligeiramente inferior à dos motores PMSM, principalmente em cargas parciais ou em regimes de alta velocidade, seu desempenho geral é bastante competitivo. São também menos sensíveis a variações térmicas e apresentam vida útil elevada. Um exemplo de aplicação bem sucedida é o Tesla Model S, que adota motores de indução pelo seu bom equilíbrio entre custo, desempenho e durabilidade. Em uma avaliação de desempenho, os IM destacaram-se por sua controlabilidade, confiabilidade, robustez, vida útil e custo entre os motores DC, SRM e, em alguns aspectos, até mesmo motores síncronos de ímã permanente (PMSM), especialmente quando se prioriza durabilidade e simplicidade construtiva (RIND et al., 2017). Uma comparação de desempenho entre os motores é mostrada na Tabela 2, sendo o número 5 a pontuação máxima, dentro dessa classificação.

Tabela 2 – Comparação de desempenho entre diferentes tipos de motores elétricos de tração para VEs.

Critério de Avaliação	Motor DC	Motor de Indução (IM)	PMSM	SRM
Densidade de potência	2.5	4	5	3.5
Eficiência	2.5	4	5	4.5
Controlabilidade	5	5	4	3
Confiabilidade	3	5	4	5
Robustez	3	5	4	5
Densidade de torque	3	4	5	4
Faixa de velocidade	2.5	4	4.5	4.5
Manutenção Requerida	3	4	4	4
Ondulação de torque/ruído	3.5	4.5	4.5	3
Capacidade de sobrecarga	3	4	4	4
Maturidade técnica	5	4.5	4	3.5
Tempo de vida útil	3.5	5	4	4.5
Tamanho e peso	3	4	5	4
Custo	4	5	3	4
Pontuação total	46,5	62	60	56,5

Fonte: Adaptado de Rind et al. (2017).

Em resumo, a escolha do tipo de motor em um veículo elétrico envolve uma série de compromissos entre eficiência, densidade de potência, robustez, custo e requisitos de aplicação. PMSMs e motores de indução dominam o mercado atual por suas características equilibradas, enquanto SRMs e BLDCs oferecem alternativas interessantes em nichos específicos (KUMAR;

¹⁷ Do inglês, *Squirrel cage induction motor*.

CHANNI; SINGH, 2024). A tendência futura é de otimização contínua dessas tecnologias, visando maior desempenho com menor impacto econômico e ambiental (CAO et al., 2021).

2.3.5 Sistema de refrigeração

As baterias de AT geram calor significativo durante os ciclos de carga e descarga. Manter sua temperatura dentro de uma faixa ideal, geralmente entre 20°C e 30°C é essencial para preservar a vida útil, evitar degradação de desempenho e prevenir riscos como o descontrole térmico (TOMAR et al., 2025). Já os motores elétricos e geradores, ao converterem energia elétrica em mecânica ou vice-versa, também requerem refrigeração adequada, especialmente sob altas cargas. Além disso, a eletrônica de potência, incluindo inversores, conversores DC/DC e transistores como IGBTs demanda controle térmico para manter a estabilidade e a confiabilidade do sistema (LI; XIE, 2024).

Para atender a esses requisitos, diferentes tecnologias de refrigeração são aplicadas. O resfriamento a ar, embora simples e econômico, é limitado em eficiência térmica. O resfriamento a líquido, mais comum, utiliza circuitos com água/glicol e placas frias para dissipar calor de forma eficiente (ARANZABAL et al., 2019). É um método amplamente utilizado e eficaz para controlar a temperatura da bateria, motor e eletrônica de potência (LI; XIE, 2024). Métodos mais avançados incluem o resfriamento bifásico, que explora a mudança de fase do fluido refrigerante para absorver mais calor, e o uso de materiais de mudança de fase (PCM)¹⁸, capazes de regular a temperatura através do calor latente (ARANZABAL et al., 2019). Sistemas termoelétricos, por sua vez, permitem controle térmico localizado e preciso, embora com maior demanda energética (LI; XIE, 2024).

Nos VEHs, o desafio se amplia pela presença do motor a combustão, exigindo múltiplos circuitos térmicos operando em faixas diferentes de temperatura. Em ambos os casos, sistemas modernos utilizam controladores inteligentes e técnicas de simulação computacional para otimizar o fluxo térmico, garantir confiabilidade e adaptar a refrigeração conforme as condições de uso (TOMAR et al., 2025).

2.3.6 Sistema de transmissão

Em VEs, a entrega instantânea de torque pelos motores elétricos permite, na maioria dos casos, o uso de uma única relação de redução fixa no sistema de transmissão, eliminando a necessidade de caixas de câmbio complexas. Essa configuração simplificada melhora a eficiência, reduz peso e custos, sendo amplamente adotada em projetos comerciais e de passageiros. No entanto, estudos indicam que transmissões com múltiplas marchas ou relações continuamente variáveis (CVT)¹⁹ podem proporcionar ganhos de eficiência energética, especialmente

¹⁸ Do inglês, *Phase change materials*.

¹⁹ Do inglês, *Continuously variable transmission*.

em ciclos de condução urbanos mais dinâmicos, além de melhorar a aceleração e permitir o redimensionamento do motor (REN; CROLLA; MORRIS, 2009).

Além do tipo de transmissão, a topologia do powertrain também influencia diretamente o desempenho e a arquitetura do veículo. Três configurações principais são utilizadas: o arranjo central, mais simples e de fácil integração em plataformas existentes; o acionamento próximo à roda, *E-Axle*, que oferece melhor eficiência e dinâmica veicular; e o acionamento no cubo da roda, que elimina completamente os elementos mecânicos da transmissão, mas impõe desafios térmicos e estruturais, além de aumentar a massa não suspensa (KAMPKER et al., 2019). A escolha entre essas topologias envolve compromissos entre custo, facilidade de implementação e desempenho.

2.4 CONSIDERAÇÃO FINAIS

O presente capítulo estabeleceu a base teórica para o desenvolvimento do projeto de eletrificação da van, abrangendo desde a classificação dos veículos híbridos até os detalhes dos componentes do *powertrain*.

Com a fundamentação teórica, o próximo capítulo, fará a transição do conceito teórico para o projeto prático, detalhando a escolha final, as características técnicas e a compatibilidade dos equipamentos adquiridos que serão implementados na bancada de testes.

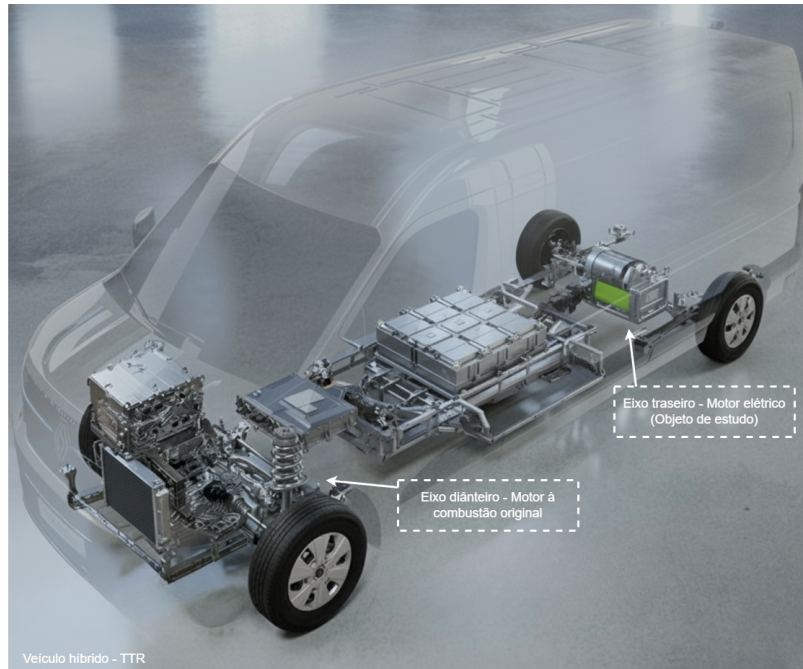
3 PROJETO ELETRIFICA E ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES

A UDESC recebeu recentemente uma van Renault Master, ano 2015, que apresenta falhas no motor a combustão. Este veículo passou a integrar o Projeto Eletrifica, cujo objetivo é desenvolver uma configuração híbrida *Through-The-Road* (TTR), caracterizada pela utilização de sistemas de transmissão independentes e de menos complexidade na integração. Nessa proposta, o motor a combustão será preservado e mantido no eixo dianteiro, enquanto um motor elétrico será incorporado ao eixo traseiro. Essa abordagem possibilita que os dois sistemas operem de forma autônoma, viabilizando o desenvolvimento e os testes do sistema elétrico de forma independente.

Para viabilizar essa integração, o Núcleo de Processamento de Energia Elétrica (nPEE) da UDESC adquiriu junto à WEG um kit powertrain composto pelo motor elétrico e pelo inversor de frequência CVW500, comercializados em conjunto pelo fabricante, além do pack de baterias, é crucial destacar que a aquisição inicial dos equipamentos, foi realizada pelo NPEE em virtude do interesse da empresa WEG em fornecer os componentes de eletrificação, e o projeto foi concebido e estruturado a partir desses componentes já adquiridos. Esses elementos constituem a base do sistema elétrico do projeto, representando os principais componentes responsáveis pela conversão e pelo gerenciamento da energia.

O foco deste trabalho concentra-se no estudo e na integração da parte elétrica do powertrain, como indicado na Figura 9. Realizando a construção de uma bancada dedicada à validação da comunicação e do funcionamento dos componentes envolvidos. Entre eles destacam-se o pack de baterias, o inversor, o motor elétrico, o sistema de refrigeração e a unidade de controle do veículo. A bancada também permitirá a realização de testes nos sistemas periféricos, como o carregador de bordo e o módulo auxiliar de potência.

Figura 9 – Representação sistema híbrido da Van.

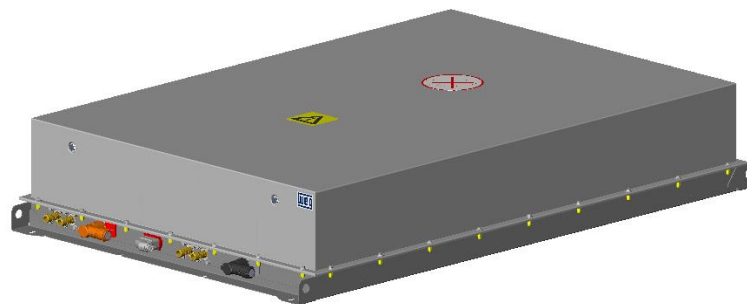


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.1 PACK DE BATERIAS BPW01

Para o sistema de tração elétrica, o armazenamento de energia é composto por um *pack* de baterias de íon-lítio WEG BPW01, modelo 1P112S LFP, com energia nominal de 73,46 kWh.

Figura 10 – Pack de baterias WEG BPW01.



Fonte: WEG S.A. (2023).

O *pack* de baterias é projetado a partir de um conjunto de células de baterias de baixa tensão (tipicamente 3,2 V ou 3,66 V) conectadas em série e/ou paralelo para atingir os níveis de tensão e corrente requeridos para uma determinada aplicação. O projeto desses *packs* é específico para cada uso, priorizando a segurança e um fornecimento de energia ininterrupto, o que é fundamental em aplicações veiculares.

Este *pack* é composto por 112 células LFP (Lítio-Ferro-Fosfato) de 205 Ah conectadas em série. Essa configuração resulta em uma tensão nominal de 358,4 Vcc. Para o controle térmico,

o sistema utiliza um método de refrigeração a água. As especificações técnicas completas podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características técnicas do *Pack* de Baterias WEG BPW01-73,5kWh.

Característica	Valor
Modelo da célula	LFP 205Ah
Energia (String)	73,46 kWh
Quantidade de células	112
Quantidade de caixas	1
Energia eficaz	73,47 kW
Potência de pico	83,80 kW
Corrente 1C	205 Ah
Corrente máxima	370 A em 18 min
Tensão nominal	358,4 Vcc
Tensão mínima de operação	336,0 Vcc
Tensão máxima de operação	408,8 Vcc
Alimentação de comando	12 Vcc
Potência térmica gerada (Q_t)	2,12 kW
Fluido de refrigeração	98,5% água desmineralizada + 1,5% de CORTEC (VpCI-649 ou similar)
Pressão em cada entrada da caixa	2 bar
Vazão em cada saída da caixa	2,3 L/min
Temperatura de operação	22 a 25°C
Mangueira	3/4"
Proteções	Sobrecorrente, Sobre tensão, Subtensão, Curto-Circuito, Sobre temperatura, Subtemperatura
Grau de proteção	IP67
Torques	Parafusos M4: 2,5 N.m, M6: 7 N.m
Peso do String (2 caixas)	545 kg

Fonte: WEG S.A. (2023).

Para a operação segura é necessário a utilização de um BMS, sendo responsável pelo monitoramento e gerenciamento constante de cada célula, garantindo que operem dentro de limites seguros de tensão, corrente e temperatura, e assim prolongando sua vida útil. A comunicação entre o BMS e o sistema de gerenciamento do veículo é realizada através da rede CANBUS, um protocolo de comunicação robusto e amplamente utilizado na indústria automotiva. O detalhamento das funcionalidades de gerenciamento e dos mecanismos de proteção do BMS, bem como a implementação da comunicação via CANBUS, serão explorados com maior profundidade nos capítulos subsequentes.

3.2 POWERTRAIN

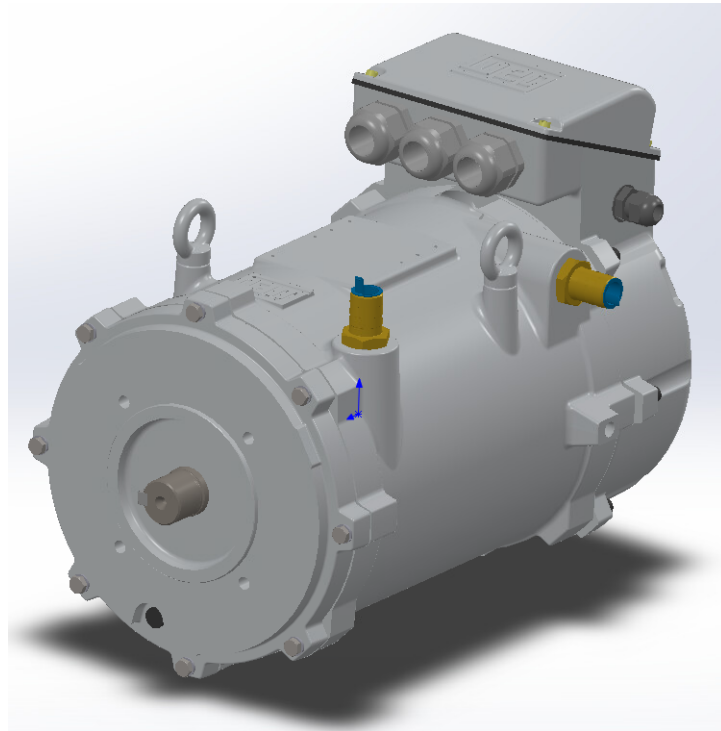
Para a conversão e gerenciamento da energia proveniente do *pack* de baterias para a propulsão do veículo, o motor elétrico e o inversor de frequência, atuam de forma conjunta para

transformar energia elétrica em energia mecânica com controle de torque e velocidade.

3.2.1 Motor de tração

O motor utilizado no projeto é um motor trifásico de indução com rotor de gaiola, desenvolvido pela WEG para aplicações de tração elétrica.

Figura 11 – Motor trifásico de indução para o *powertrain* elétrico.



Fonte: WEG S.A. (2021).

A documentação disponível limita-se a uma folha de dados técnica, sem maiores informações complementares de projeto. Ainda assim, os parâmetros fornecidos permitem caracterizar o desempenho e a adequação do equipamento para a aplicação proposta.

De acordo com a ficha técnica, o motor apresenta as seguintes especificações:

Tabela 4 – Principais especificações do motor de tração.

Parâmetro	Valor
Potência nominal	33 kW (45 cv)
Potência de pico	71 kW
Tensão nominal	165 V
Corrente nominal	185 A
Corrente máxima	550 A
Rotação nominal	4480 rpm
Rotação máxima	7600 rpm
Conjugado nominal	7,17 kgfm
Conjugado de pico	17,3 kgfm
Classe de isolamento	200 (Temperatura máxima dos enrolamentos - 180 °C)
Momento de inércia (J)	0,0231 kgm ²
Grau de proteção	IP66
Forma construtiva	B14T
Massa aproximada	50 kg

Fonte: Adaptado de WEG S.A. (2021).

O motor possui regime de serviço S9, no qual é projetado para suportar variações contínuas e imprevisíveis de carga e velocidade. Esse tipo de operação dinâmica frequentemente demanda a aplicação de picos de potência significativamente superiores à potência nominal de trabalho. Tal característica torna esse regime particularmente adequado para aplicações com variação frequente de demanda, como ocorre nos veículos elétricos (WEG, 2024). A refrigeração é realizada por sistema de circulação de líquido (TEWC) ¹ com fluxo mínimo de 18 L/min, temperatura de entrada de até 50 °C e pressão máxima de 2 bar.

Em termos de desempenho elétrico, a folha de dados informa rendimento de até 88,6% e fator de potência de 0,72 na condição nominal. Além disso, o motor foi projetado para operação com inversores de frequência, respeitando limite de tensão de pico fase-fase ≤ 650 V e taxa de variação de tensão $dV/dt \leq 5200V/\mu s$.

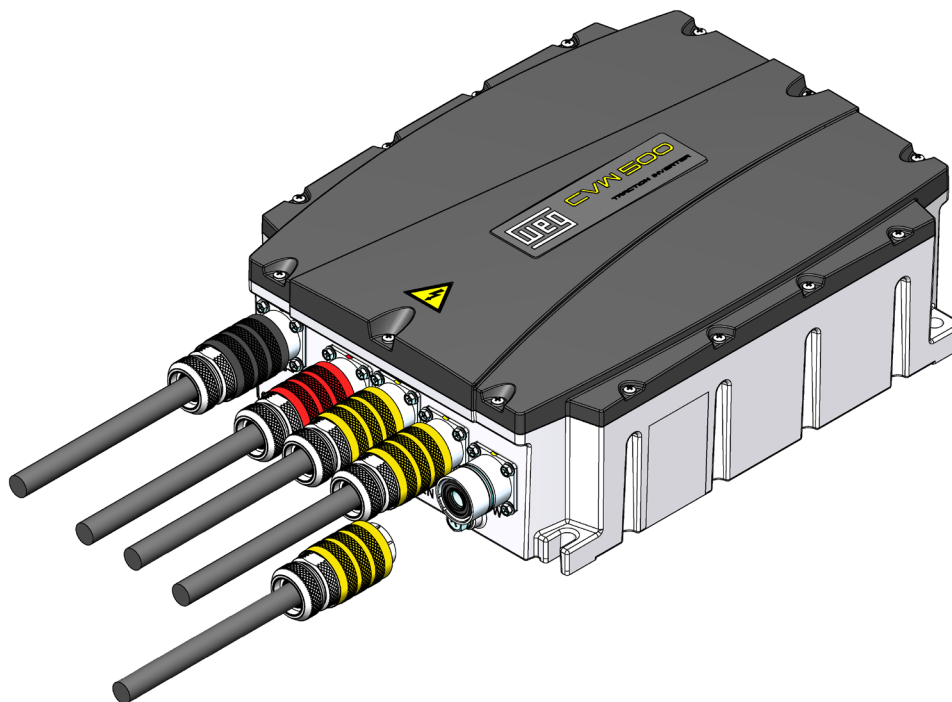
Por fim, observa-se que, apesar da limitação de informações detalhadas, os dados disponíveis confirmam a compatibilidade do motor com o banco de baterias BPW01 e o inversor CVW500 que será explorado na próxima seção.

3.2.2 Inversor WEG CVW500

O CVW500 é um conversor de frequência desenvolvido para aplicações de tração elétrica. Sua principal função é realizar a conversão da tensão contínua proveniente do pack de baterias em tensão alternada trifásica modulada, permitindo o controle dinâmico de velocidade e torque do motor de tração. O conjunto está disponível em versões com grau de proteção IP00 ou IP66, ambas com massa aproximada de 15 kg.

¹ Do inglês, *Totally Enclosed Water Cooled*.

Figura 12 – Inversor de frequência CVW500 com IP66.



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2016).

Em termos de funções de operação, o CVW500 dispõe de tecnologia de modulação vetorial, possibilitando tanto o controle escalar (V/f) quanto o controle vetorial com encoder. Entre suas funcionalidades adicionais destacam-se rampas programáveis de aceleração e desaceleração, o recurso *Flying Start*, que permite a retomada do controle mesmo com o motor já em movimento, e a função JOG, útil em procedimentos de testes e ajustes.

O equipamento apresenta características técnicas compatíveis com aplicações de média potência em tração. Os dados são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 – Modelos do CVW500.

Modelo	CVW500A0550D2NB00	CVW500A0550D2NB66
Tensão nominal de entrada (potência)	130...400 Vcc	130...400 Vcc
Limites da tensão de entrada (potência)	100...430 Vcc	100...430 Vcc
Tensão nominal de entrada (controle)	12...24 Vcc	12...24 Vcc
Limites da tensão de entrada (controle)	8...32 Vcc	8...32 Vcc
Corrente nominal*	275 A	275 A
Corrente de saída de pico (1 min)*	550 A	550 A
Tensão de saída	$\frac{V_{cc}}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_{cc}}{\sqrt{2}}$

* As correntes de operação para regime contínuo e máximo podem sofrer redução de acordo a eficiência do sistema de refrigeração.

Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2016).

A frequência de saída é ajustável de 0 a 500 Hz, com chaveamento configurável entre 2,5 e 10 kHz. Além disso, o inversor garante regulação de velocidade da ordem de $\pm 0,01\%$

da rotação nominal. No que se refere à segurança e proteções, o CVW500 integra sistemas de monitoramento que asseguram a integridade do inversor e do motor. Entre as principais funções de proteção estão: sobrecorrente, curto-circuito entre fases, falhas de isolamento, subtensão e sobretensão da bateria, bem como sobretemperatura dos IGBTs e do motor. O inversor também é capaz de limitar a sobrecarga a 200% da corrente nominal por até 60 segundos, acionando falhas em caso de ultrapassagem.

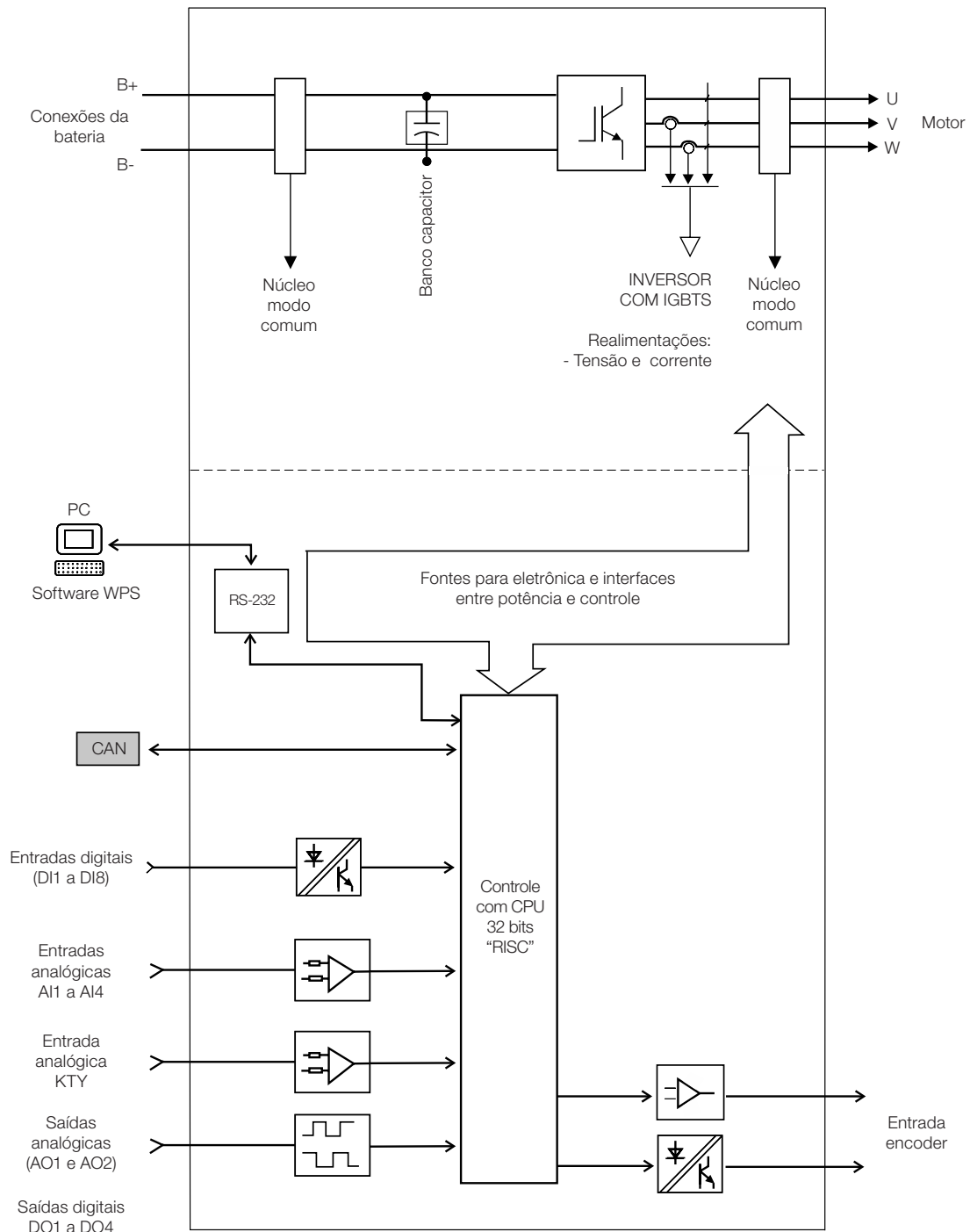
A parametrização e o controle do motor podem ser realizados de maneira flexível. O inversor permite configuração via software (WPS) ² e (WLP) ³, por meio de interface RS-232, e possui recursos como autoajuste e *Start-up* Orientado, que facilitam a identificação dos parâmetros elétricos do motor e aceleram o processo de comissionamento. Os parâmetros podem ser ajustados para rampas de aceleração/desaceleração, limites de torque, frequência de operação, além de incluir dados da transmissão, como a relação de engrenagens e diâmetro das rodas, possibilitando o cálculo direto da velocidade do veículo.

Outro aspecto relevante está nas interfaces de comunicação, para a integração do inversor ao sistema de gerenciamento do veículo. O CVW500 suporta os protocolos RS-232 (Modbus) e CAN automotivo, este último fundamental para a comunicação com a VCU. Através dessa interface, é possível enviar comandos ao inversor e monitorar variáveis em tempo real, como corrente, tensão, rotação e temperatura, garantindo o gerenciamento do *powertrain*. O diagrama geral do inversor é mostrado na Figura 13.

² Do inglês, *WEG Programming Software*.

³ Do inglês, *WEG Ladder Programmer*.

Figura 13 – Blocodiagrama do CVW500.



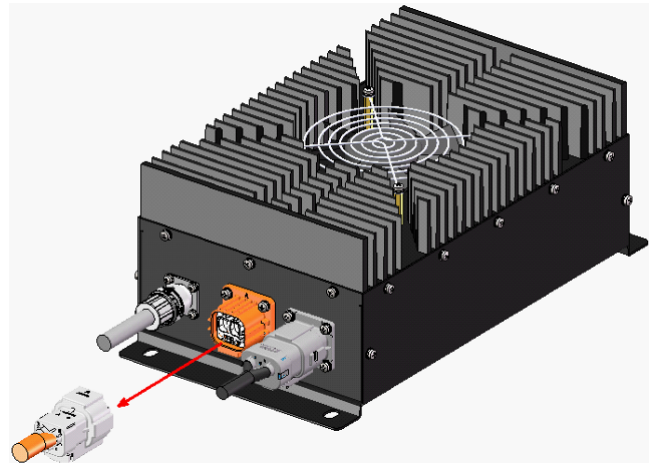
Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2016).

A escolha pelo inversor CVW500 se mostra adequada ao projeto. Do ponto de vista técnico, o equipamento atende às especificações de potência e corrente do motor de tração, além de oferecer um conjunto de proteções e recursos de controle que asseguram desempenho e confiabilidade na operação do veículo. Além disso, trata-se de uma solução fornecida por uma empresa brasileira, o que garante facilidade de suporte técnico, e disponibilidade de peças.

3.3 OBC

O carregador de bordo escolhido para o projeto é o OBCDA6K6M20C-360 da Dilong. Este modelo foi escolhido após uma análise de viabilidade que considerou custo, potência, modo de operação e compatibilidade com o projeto ELETRIFICA. As principais especificações técnicas do modelo são descritas na tabela 6.

Figura 14 – OBC Dilong DA6K6M20C-360C.



Fonte: DILONG NEW ENERGY TECHNOLOGY HEBEI (2023).

Tabela 6 – Especificações Técnicas Principais do OBC Dilong DA6K6M20C-360C.

Parâmetro	Valor
Potência de Saída Nominal	6,6 kW
Eficiência	94%
Modo de Operação	Monofásico
Tensão RMS Nominal de Entrada	220 V
Faixa de Tensão RMS de Entrada	85 V a 264 V
Corrente Máxima de Entrada	32 A
Tensão Nominal de Saída	360 V
Faixa da Tensão de Saída Contínua	250 V a 450 V
Corrente Nominal de Saída CC	18,3 A
Grau de Proteção	IP66

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O OBC opera com o protocolo de comunicação SAE J1939, que é baseado no padrão CAN 2.0B, permitindo a interação com o BMS. Sua taxa de transmissão CAN é autoadaptativa, suportando tanto 250 kbps quanto 500 kbps. O modelo conta com refrigeração a ar e integra algumas proteções:

- Elétricas: Inclui proteção contra sobretensão e subtensão nas entradas e saídas, sobrecorrente na saída, e curto-circuito na saída.

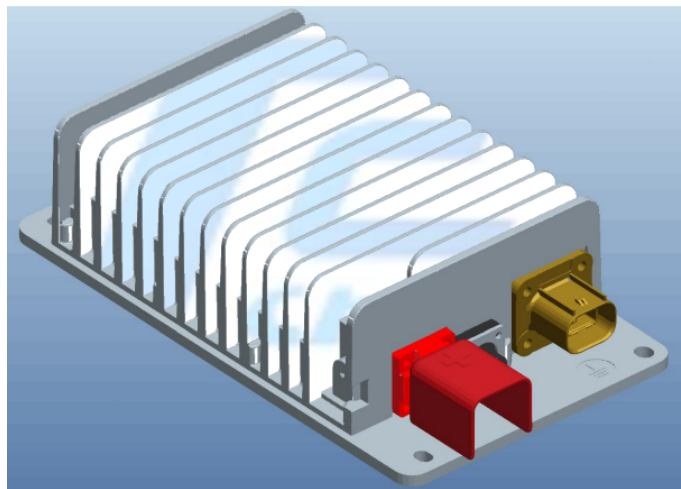
- Térmicas: Para evitar danos por superaquecimento, o OBC reduz sua potência de carga em 80°C (em uma taxa de 300 W por grau Celsius) e interrompe a operação se a temperatura atingir 90°C.

Para mais informações técnicas, análises de viabilidade e comparativos com outras opções de carregadores podem ser verificados no capítulo 4 do trabalho de conclusão de curso (NASCIMENTO, 2025).

3.4 APM

O APM selecionado é o TDC-IY-320-12, fabricado pela Tianjin Yidingfeng Powertrain Technology Co., Ltd. (EVPT). As especificações técnicas podem ser visualizadas na tabela 7.

Figura 15 – Conversor DCDC TDC-IY-320-12.



Fonte: Hangzhou Tiecheng Information Technology Co., Ltd (2019).

Tabela 7 – Especificações Técnicas e de Desempenho do APM TDC-IY-320-12.

Parâmetro	Valor
Potência Nominal	1 kW
Potência de Pico Suportada	1200 W (por até 6 minutos)
Máxima Eficiência	94%
Tensão Nominal de Entrada (AT)	320 Vcc
Faixa de Tensão de Entrada (AT)	220 Vcc a 450 Vcc
Tensão Nominal de Saída (BT)	14 Vcc
Faixa de Corrente de Saída	5 A a 72 A
Corrente Máxima de Pico (Medida)	85,4 A
Refrigeração	Natural (a ar)
Grau de Proteção	IP67
Densidade de Potência	0,40 kW/kg

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O modelo foi selecionado por apresentar o menor custo e a melhor densidade de potência entre as opções analisadas, além de oferecer proteção IP67 e ser menos restritivo quanto à umidade do ar. A arquitetura interna do APM possui isolamento galvânica e a topologia é composta por um inversor Full Bridge na entrada (lado de AT) e um Retificador Síncrono na saída (lado de BT).

O controle e a comunicação do APM também são realizados pelo protocolo SAE J1939, que utiliza CAN para trocar dados com a VCU. Por meio desse protocolo, o módulo monitora e transmite continuamente parâmetros como tensão e corrente de BT, temperatura do APM e sinaliza uma lista de 10 erros e avisos, como falha de superaquecimento e falha de intertravamento do conector do lado de AT (HVIL)⁴. O acionamento do módulo é controlado pelo cabo de enable, que exige uma tensão entre 6 V e 30 V para operar. A lógica implementada para o enable garante que o módulo só ligue se a tensão da bateria de BT estiver abaixo de 12 V e só desligue quando a corrente de carga estiver baixa, otimizando o ciclo de vida da bateria auxiliar.

A lógica de implementação e desenvolvimento do controle, assim como os dados técnicos de operação detalhados do conversor e a análise comparativa entre outros modelos disponíveis no mercado, podem ser consultados no trabalho de conclusão de curso (METZNER, 2025).

3.5 UNIDADE DE CONTROLE DO VEÍCULO - FT450

A VCU escolhida para o projeto é a FuelTech FT450, que faz parte da linha PowerFT, que também inclui os modelos FT550/FT550LITE e FT600.

Figura 16 – Unidade de Controle do Veículo - FT450.



Fonte: FuelTech (2024).

A linha PowerFT é a plataforma principal da FuelTech. Originalmente projetada como uma unidade de controle eletrônico para motores à combustão, a linha foi adaptada e atualizada com funções específicas para operar como a central em veículos elétricos e híbridos. Todas as VCUs dessa linha compartilham o mesmo software FTManager e têm mapas compatíveis, sendo diferenciadas principalmente pelo hardware (conectores, número de entradas/saídas e recursos integrados). As principais diferenças entre os modelos podem ser observadas através da tabela 8.

⁴ Do inglês, *High Voltage Interlock Loop*

Tabela 8 – Comparativo de Hardware da Linha PowerFT (FT450, FT550 e FT600).

Característica	FT450	FT550 / FT550LITE	FT600
Tipo de Gabinete	Plástico (IP67)	Plástico (IP67)	Alumínio
Conectores	1 (26 pinos)	2 (52 pinos)	2 (68 pinos)
Entradas Configuráveis	7	14	20
Saídas Configuráveis (Total)	10	24	32
Portas CAN	1	2	2
Acelerômetro e Giroscópio	Não	Sim	Sim
GearController Integrado	Não	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Apesar de a FT550 e a FT600 oferecerem mais entradas e recursos integrados, a FT450 é a escolha suficiente para a conversão da van, principalmente devido à sua relação custo-benefício e aos recursos necessários para a eletrificação, tendo como principais funções e características:

- Monitoramento em tempo real de parâmetros como tensão e temperatura das células da bateria;
- Controle de Torque e Regeneração, permitindo a configuração de tabelas programáveis de torque e regeneração;
- Função creeping, recurso que permite que o veículo avance suavemente logo após a liberação do pedal de freio;
- Configuração do OBC e APM, incluindo limites de carga/descarga;
- Permite alternar entre os modos Combustão, Elétrico (ocultando funções a combustão) e Híbrido (mantendo todas as funções ativas);
- Integra-se com os principais componentes de eletrificação através do protocolo CAN. Uma única porta é suficiente para gerenciar essa comunicação de dados;
- As 7 entradas e 10 saídas da FT450 cobrem as necessidades de monitoramento de sensores e acionamento dos relés essenciais (como o eletroventilador e a bomba d'água);
- Possui uma tela de 4.3" com touchscreen que atua como painel de instrumentos, permitindo a visualização de informações em tempo real. Inclui um painel de diagnóstico para verificar o estado das entradas, saídas e a rede CAN;
- Datalogger interno com capacidade de gravação de até 256 canais com taxa de amostragem de até 200Hz.

Além da FuelTech, o mercado oferece outros fabricantes de módulos de controle de veículos e sistemas completos que também atendem a projetos de eletrificação, como AEM EV e Ampere EV. No entanto, o detalhamento dessas outras opções não será abordado neste trabalho,

pois a FT450 demonstrou ser uma solução técnica e economicamente viável para o escopo e as necessidades do projeto da van.

3.6 CONSIDERAÇÕES

A seleção dos componentes descritos ao longo deste capítulo foi orientada pelas necessidades específicas do Projeto Eletrifica. Os componentes adquiridos mostraram-se adequados para a aplicação, atendendo às especificações de potência e robustez demandada.

Além do atendimento aos requisitos técnicos e da oportunidade de aproveitamento do material, a escolha das respectivas empresas, WEG e Fueltech, no fornecimento dos equipamentos, fundamenta-se em sua posição consolidada no mercado e na compatibilidade entre os produtos. Esse fator agrega vantagens adicionais ao projeto, como a facilidade de suporte técnico e a documentação em caso de necessidade.

4 IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo, detalha-se o processo de execução do projeto elétrico, abrangendo a forma como o sistema foi construído e implementado na bancada de testes. A implementação englobou a montagem física dos componentes e a integração dos circuitos de AT e BT, incluindo o *pack* de baterias, o *powertrain* e os sistemas auxiliares. Este processo visa estabelecer um sistema funcional que permita a validação e o comissionamento dos equipamentos.

4.1 ESTRUTURA

Para a implementação do sistema, foi construída uma bancada com dupla função. A estrutura serve para abrigar os equipamentos e, também, atua como mecanismo de içamento para a remoção e locomoção do *pack* de baterias. A estrutura foi desenvolvida pelo autor. O sistema de içamento pode ser visualizada na Figura 17.

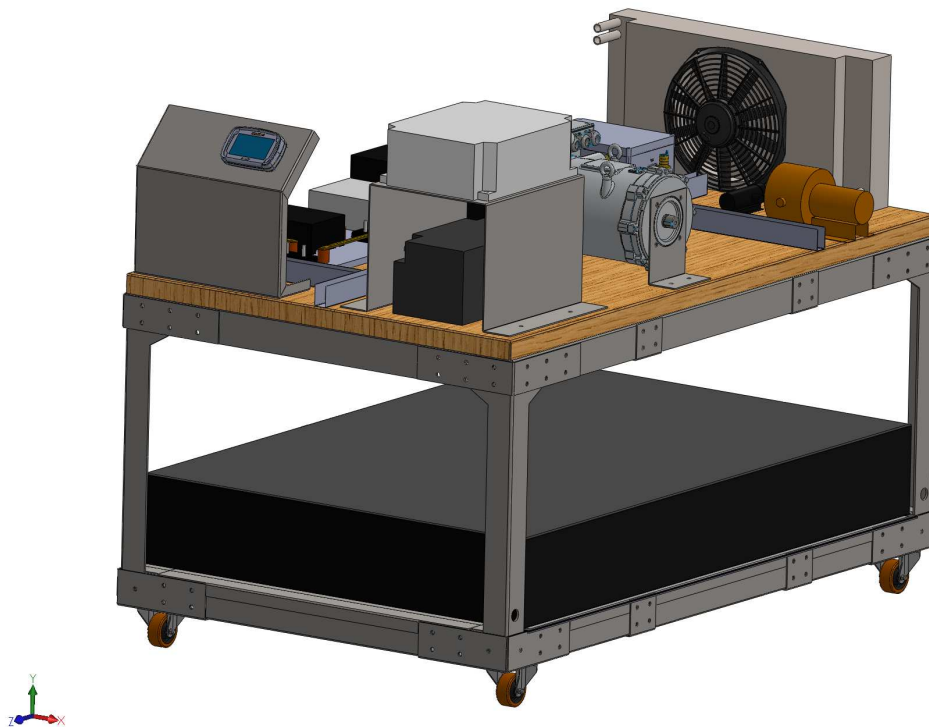
Figura 17 – Estrutura da bancada e içamento para o *pack* de baterias.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além disso, foi projetado os suportes de fixação do restante dos componentes que compõem o sistema. A concepção da bancada final é mostrada na Figura 18.

Figura 18 – Projeto da bancada.

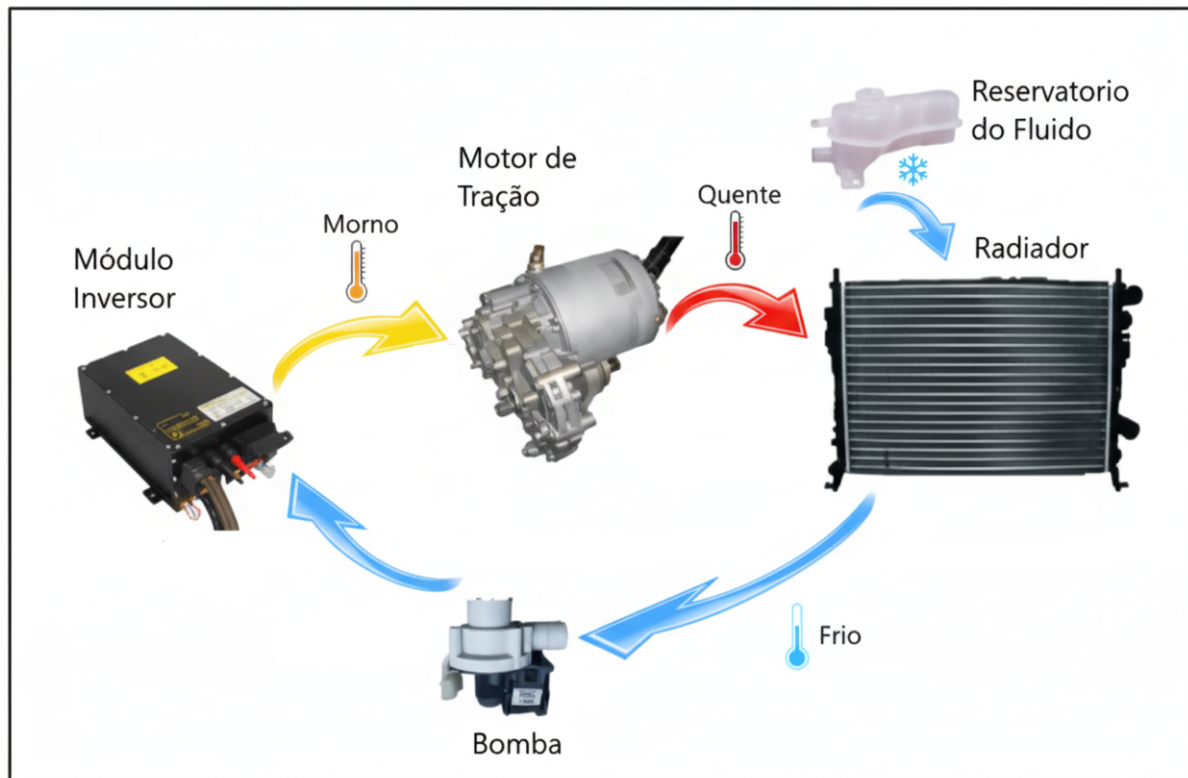


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2 SISTEMA DE ARREFECIMENTO

O *pack* de baterias, inversor e motor são refrigerados a líquido, e tem diferentes especificações para cada equipamento. Foi realizado um projeto de refrigeração convencional, como usado tanto em veículos a combustão quanto elétricos, tendo diversas maneiras de se elaborar o sistema. Uma das maneiras é mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Sistema de arrefecimento.



Fonte: Baseado em CASSANI (2018).

Sendo:

- Radiador: responsável pela troca térmica entre o fluido refrigerante e o ambiente, permitindo que o líquido retorne ao circuito em temperaturas mais baixas.
- Bomba de circulação: mantém o fluxo do fluido refrigerante através do motor e do radiador, assegurando a remoção do calor gerado.
- Trocadores de calor internos: podem estar embutidos na carcaça do motor ou envolver os enrolamentos do estator para otimizar a remoção do calor gerado.
- Reservatório de expansão: permite compensar variações no volume do fluido devido à dilatação térmica, conforme o aumento da temperatura.
- Tubulação e conexões: conduzem o fluido refrigerante entre os diferentes componentes do sistema.

Como a temperatura de operação do inversor é significativamente inferior à do motor, recomenda-se conectá-lo logo após a bomba de circulação e antes do motor no circuito de refrigeração. Essa disposição assegura que o fluido refrigerante chegue ao inversor em temperaturas mais baixas, prevenindo o superaquecimento do componente.

As especificações de refrigeração fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos estão apresentadas na tabela 9.

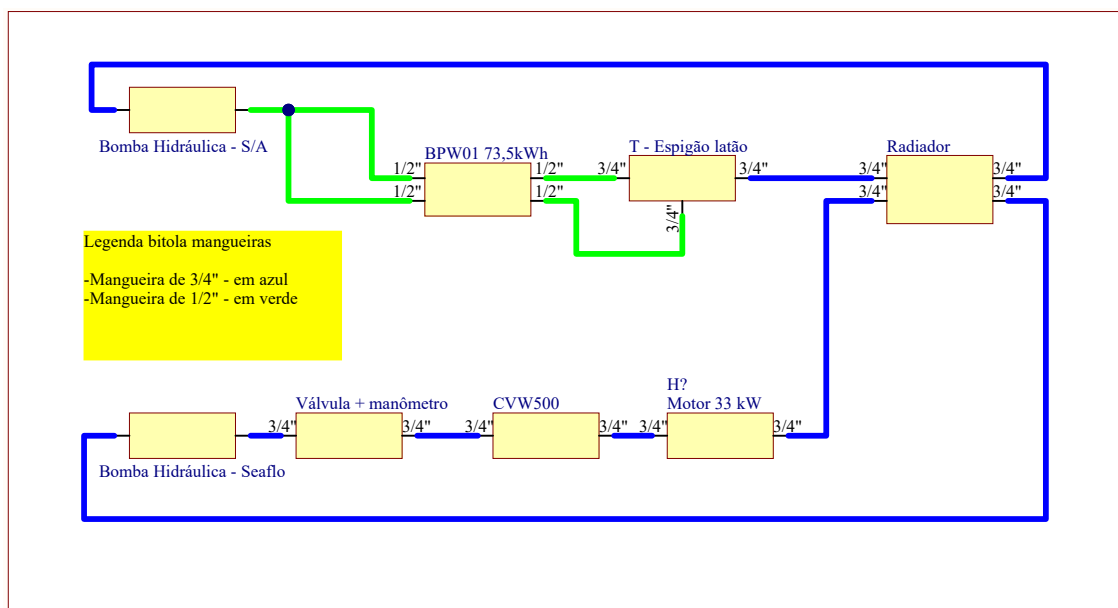
Tabela 9 – Especificações de Refrigeração do Sistema.

Especificações	BPW01	CVW500	Motor 33 kW
Vazão do Fluido	2,3 L/min em cada saída	Recomendado: 12 L/min Faixa: 8 a 20 L/min	Mínima: 18 L/min
Pressão do Sistema	2 bar em cada entrada	Máxima: 2,5 bar Recomendada: 0,5 a 2 bar	Máxima: 2 bar
Temperatura de Entrada do Fluido	22 a 25 °C	-25°C a 65 °C	Máxima de 50 °C
Potência Térmica Gerada	2,12 kW	1,75kW	4,36kW

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com base nos dados fornecidos, foi projetado o sistema de refrigeração, optando-se por dividi-lo em duas malhas devido à diferença nas vazões dos componentes. A primeira malha é destinada à refrigeração da bateria, que demanda uma vazão significativamente menor. A segunda malha é responsável pelo resfriamento do motor e do inversor, operando com uma vazão de 18 L/min, valor mínimo exigido pelo motor e dentro da faixa de operação do inversor (8 a 20 L/min). Todo o sistema utiliza um único radiador, projetado para dissipar o calor e realizar a troca térmica, resfriando a água proveniente dos equipamentos e realizando a manutenção térmica do conjunto.

Figura 20 – Esquema hidráulico do sistema de arrefecimento.

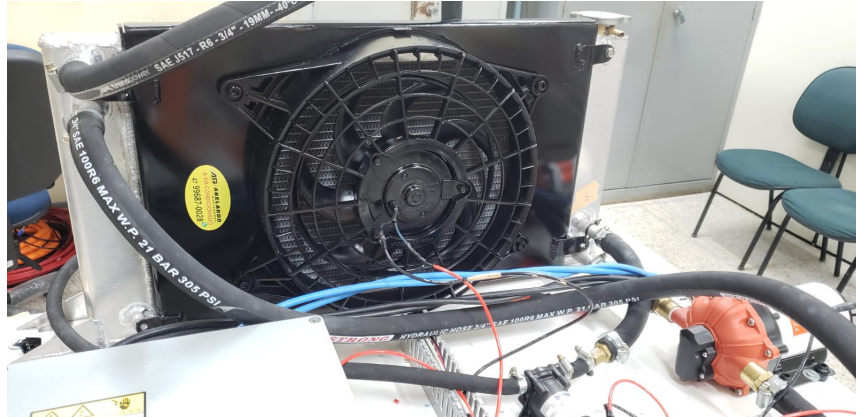


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Considerando que o estudo da troca térmica não constitui o foco principal deste trabalho,

o projeto do radiador foi desenvolvido em parceria com a empresa Abelardo Radiadores, responsável pelo projeto e fabricação de um modelo específico para esta aplicação. O radiador foi construído com aletas em formato de colmeia e reservatório de expansão integrado, incorporando a válvula de alívio na própria tampa do radiador.

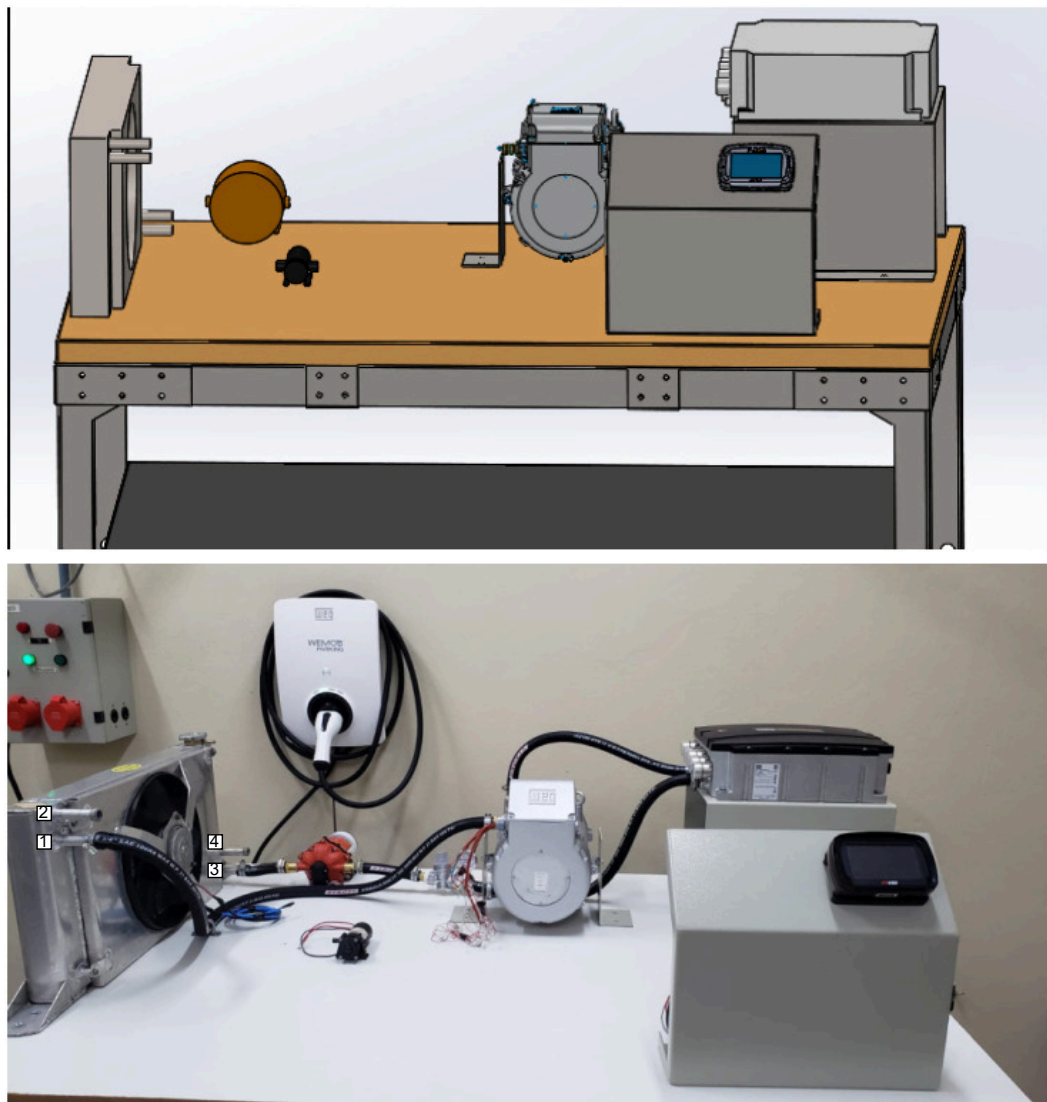
Figura 21 – Radiador com ventilação forçada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A montagem do sistema de arrefecimento é apresentado na Figura 22. O ponto 1 indica a entrada da água quente proveniente do inversor e do motor, enquanto o ponto 2 representa a entrada da água aquecida da bateria. Já os pontos 3 e 4 correspondem às respectivas saídas do fluido. Observa-se que, na figura, ainda não estavam instaladas as mangueiras de arrefecimento da bateria, adicionadas posteriormente.

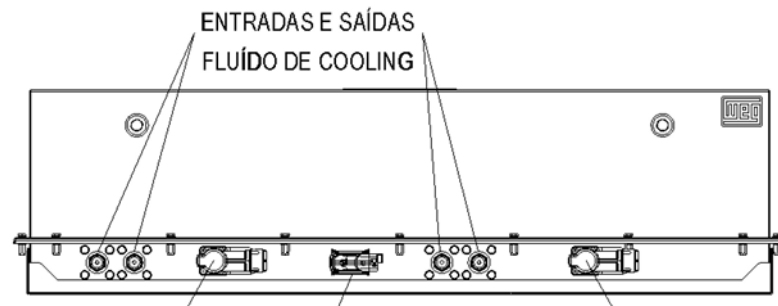
Figura 22 – Montagem do sistema de arrefecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

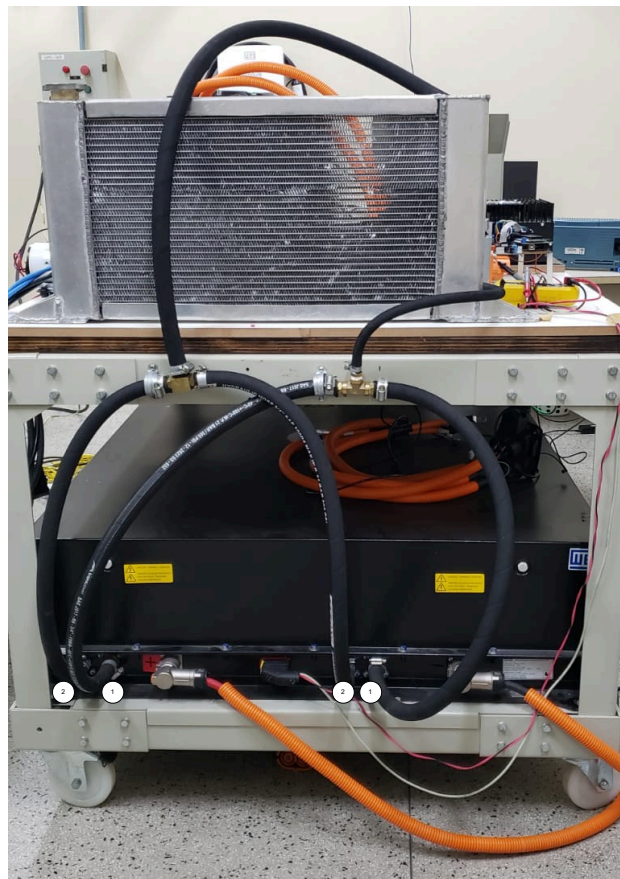
Na Figura 23 são apresentados os pontos de conexão ao *pack* de baterias, e em seguida, na Figura 24 é mostrado a montagem.

Figura 23 – Pontos de conexão da refrigeração do *pack* de baterias.



Fonte: WEG S.A. (2023).

Figura 24 – Montagem do sistema de refrigeração ao *pack* de baterias.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Sendo:

- Em 1 as entradas da água refrigerada ao *pack* de baterias;

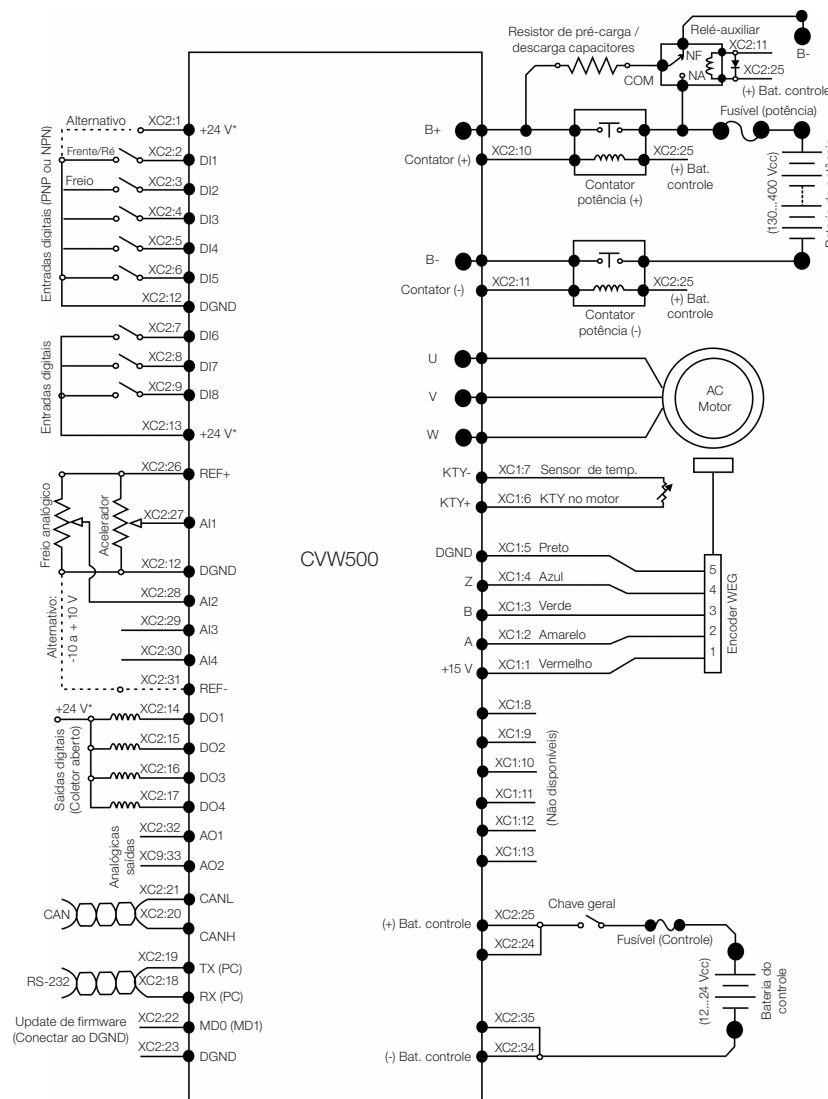
- Em 2 as saídas do *pack* retornando ao radiador.

As bombas foram dimensionadas de forma a atender as especificações da tabela 9. Sendo uma bomba para refrigerar o *pack* de baterias e outra para refrigerar o inversor e o motor. Com isso, o sistema de arrefecimento está completo.

4.3 SISTEMA ELÉTRICO

Para a realização das ligações, os circuitos foram organizados em duas partes: circuito de potência e circuito de baixa tensão. Neste capítulo, apresenta-se a forma como esses circuitos foram implementados, bem como o processo de montagem adotado. Na Figura 25, exemplifica as principais conexões do *powertrain* integrado ao *pack* de baterias com base no manual do fabricante.

Figura 25 – Diagrama de conexões.

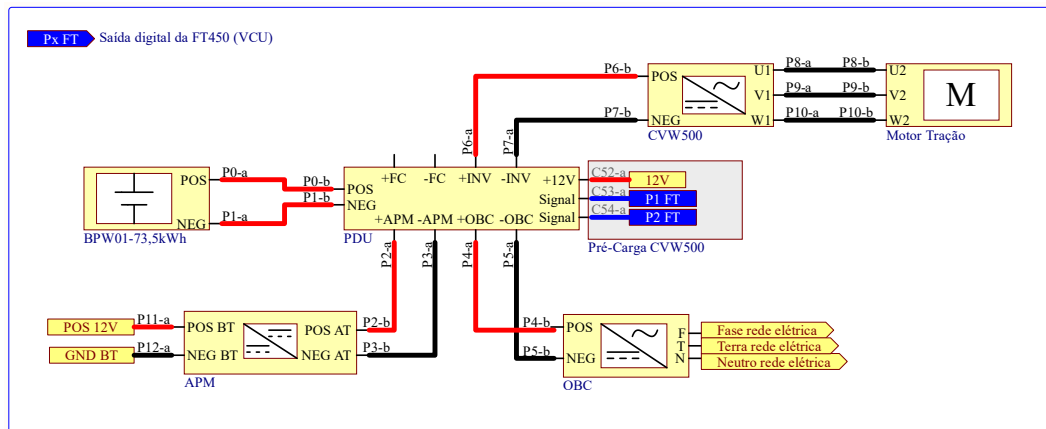


Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2016).

4.3.1 Circuito de Potência

Como o circuito de potência de um veículo elétrico abrange não apenas o conjunto do *powertrain*, mas também sistemas como o APM e o OBC. Diante disso, torna-se necessária a elaboração de uma unidade de distribuição de potência (PDU)¹, que atuará como barramento CC de alta tensão, incorporando as devidas proteções. O esquema elétrico geral do sistema de potência é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Esquema elétrico de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As principais conexões e componentes do circuito são:

- Pack de Baterias (BPW01)
- Inversor (CVW500)
- Motor de Tração (M)
- APM
- OBC
- Módulo de *Fast Charge* (FC): Carregamento rápido da bateria que ainda não foi implementado;
- Pré-carga: circuito de acionamento localizado na PDU, responsável por limitar a corrente de partida do inversor. Seu controle é realizado pelos pinos 1 e 2 da VCU, detalhados no próximo capítulo.

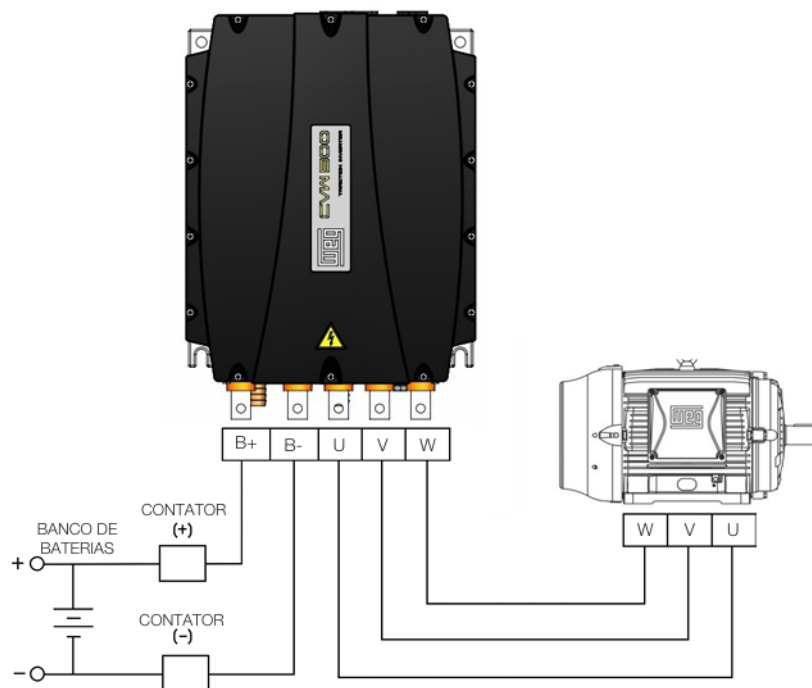
As ligações e os cabos utilizados foram dimensionados em conformidade com as recomendações dos manuais de instalação. Para o modelo de inversor CVW500A0550D2NBxx, as bitolas mínimas recomendadas são $50mm^2$ para os cabos do motor (U, V e W) e $70mm^2$ para

¹ Do inglês, *Power Distribution Unit*

os cabos da bateria (B+ e B-). Os cabos foram mantidos o mais curtos possível para minimizar perdas de potência. O manual recomenda o uso de cabos blindados, instalados próximos à estrutura metálica do veículo, para otimizar a compatibilidade eletromagnética. Entretanto, como havia disponibilidade de cabos de 70mm^2 no nPEE, provenientes de outras instalações, optou-se por utilizá-los tanto na ligação entre a PDU e o inversor quanto entre o inversor e o motor.

A ligação entre o inversor e o motor foram executadas conforme a Figura 27.

Figura 27 – Conexões de potência com a bateria e o motor.



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2016).

Além disso, foram empregados eletrodutos corrugados na cor laranja, a fim de identificar e sinalizar os condutores de alta tensão no interior do veículo. A montagem dos conectores é mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Conexão inversor-motor com a correção das fases.

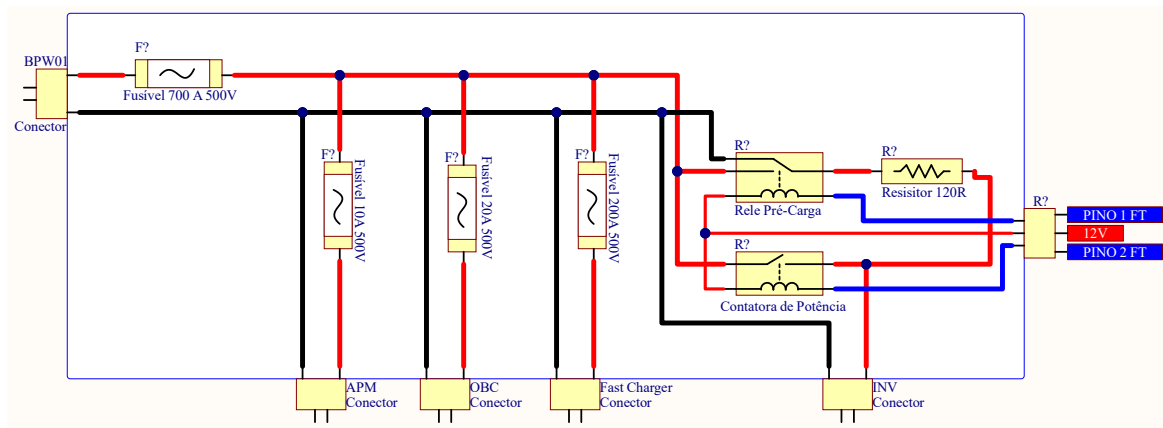


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.1.1 Unidade de Distribuição de Potência

O desenvolvimento da PDU incluiu a concepção do barramento CC responsável por alimentar as diferentes cargas, bem como a definição dos respectivos sistemas de proteção. O esquema elétrico apresentado na Figura 29 ilustra a arquitetura geral.

Figura 29 – Esquema elétrico da PDU.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

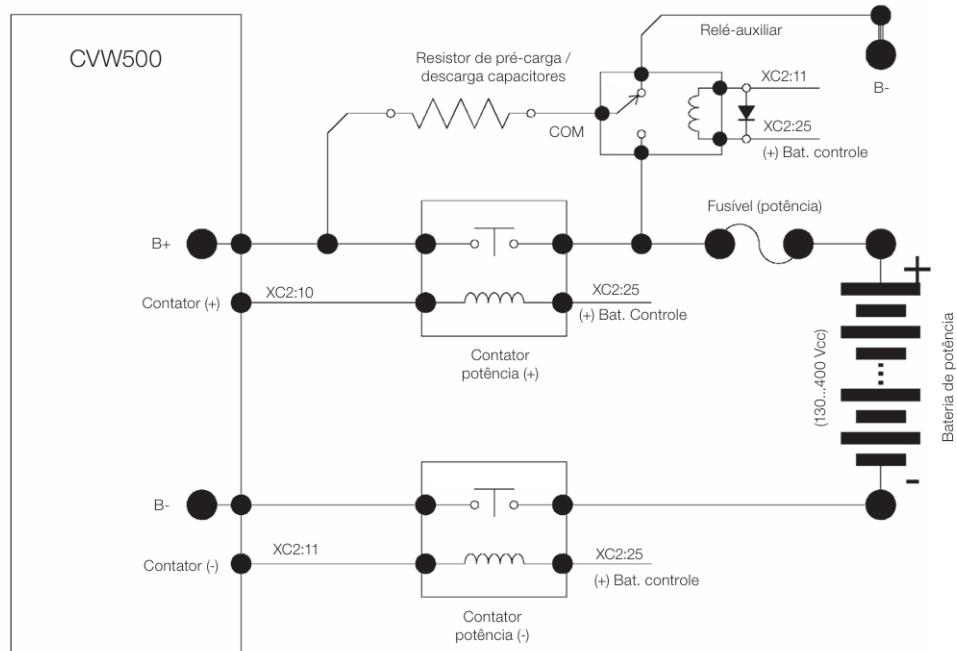
Sendo os principais componentes:

- Fusível AT : fusível de 700 A destinado à proteção da bateria de AT e do inversor, conforme especificado pelo fabricante;
- Fusíveis de baixa tensão (BT): fusíveis de 10 A e 20 A responsáveis pela proteção dos módulos APM e OBC, respectivamente;
- Conectores macho e fêmea: utilizados para as conexões entre a PDU e os demais componentes;
- Circuito de pré-carga do inversor.

A PDU foi desenvolvida pela empresa EVPT, a mesma fornecedora do módulo APM. Após a realização de um estudo de viabilidade técnica e econômica, concluiu-se que seria mais vantajoso e econômico realizar o desenvolvimento junto à EVPT do que fabricar internamente a unidade e importar componentes que não estão disponíveis no mercado nacional, como o fusível de 700 A.

Considerando que o processo de pré-carga do inversor ocorre de forma externa, optou-se por integrar esse circuito diretamente na PDU. O esquema elétrico do circuito de pré-carga é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Esquema Elétrico do circuito de pré-carga do inversor.



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2016).

Como o gerenciamento do sistema é realizado pela VCU, o acionamento da pré-carga também será controlado pela mesma, utilizando os pinos azuis 1 e 2, conforme indicado na Figura 29. Além disso, optou-se pela utilização de apenas um contator de potência, instalada no polo positivo do circuito.

De acordo com as recomendações do fabricante, deve-se empregar um relé auxiliar com isolamento mínima de 600 Vdc, compatível com a tensão da bateria da eletrônica (bobina de 12 ou 24 Vdc), para o acoplamento do resistor responsável pela função de pré-carga e/ou descarga do capacitor do barramento CC. Recomenda-se o uso de um resistor de pré-carga de aproximadamente 100Ω e 100 J de capacidade de energia. A capacitância de entrada do circuito de potência do inversor CVW500 é de $820\mu F$.

Para a contatora de potência, a WEG recomenda os modelos apresentados na Figura 31.

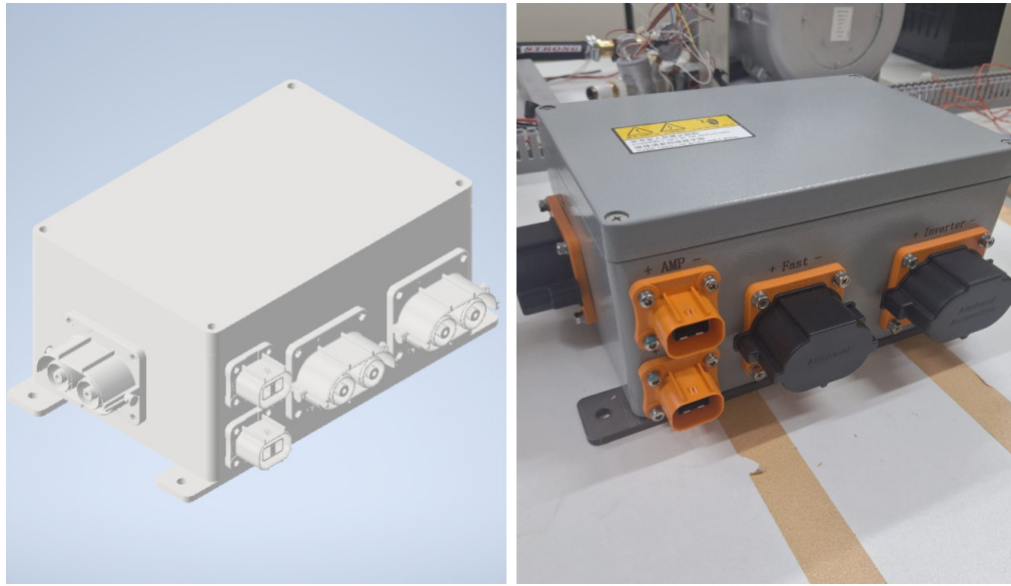
Figura 31 – Modelos de contatores sugeridos.

Modelo	Fabricante	Tensão de Bateria
LEV200A5ANA	Tyco Electronics	24 Vcc
LEV200A4ANA	Tyco Electronics	12 Vcc
EV200AAANA	Tyco Electronics	9...36 Vcc

Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2016).

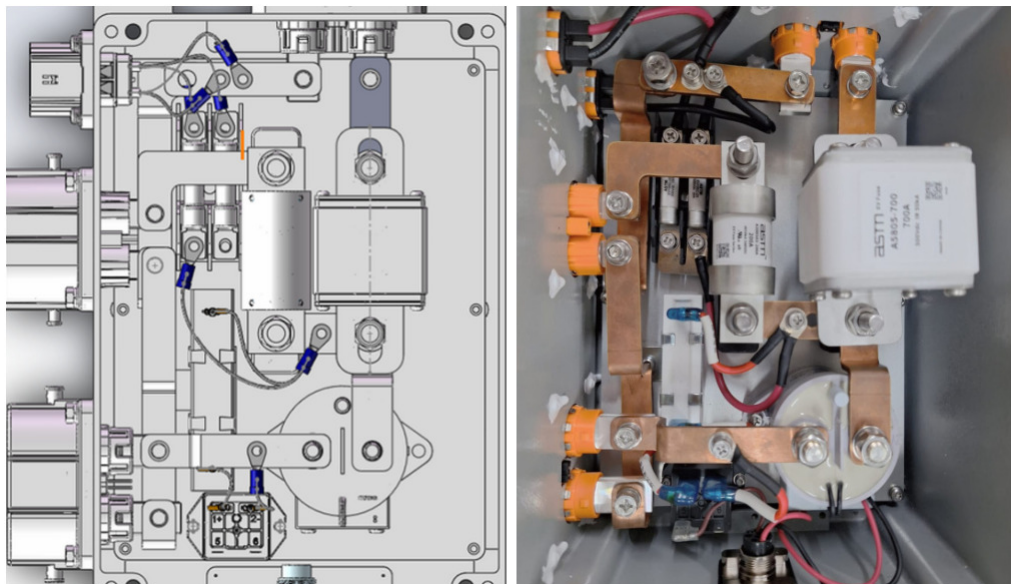
Todas as especificações técnicas foram repassadas à equipe da EVPT, responsável pelo projeto e montagem final da PDU. A unidade concluída pode ser visualizada nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Projeto da PDU realizado em parceria com a empresa EVPT - vista externa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 33 – Projeto da PDU realizado em parceria com a empresa EVPT - vista interna.

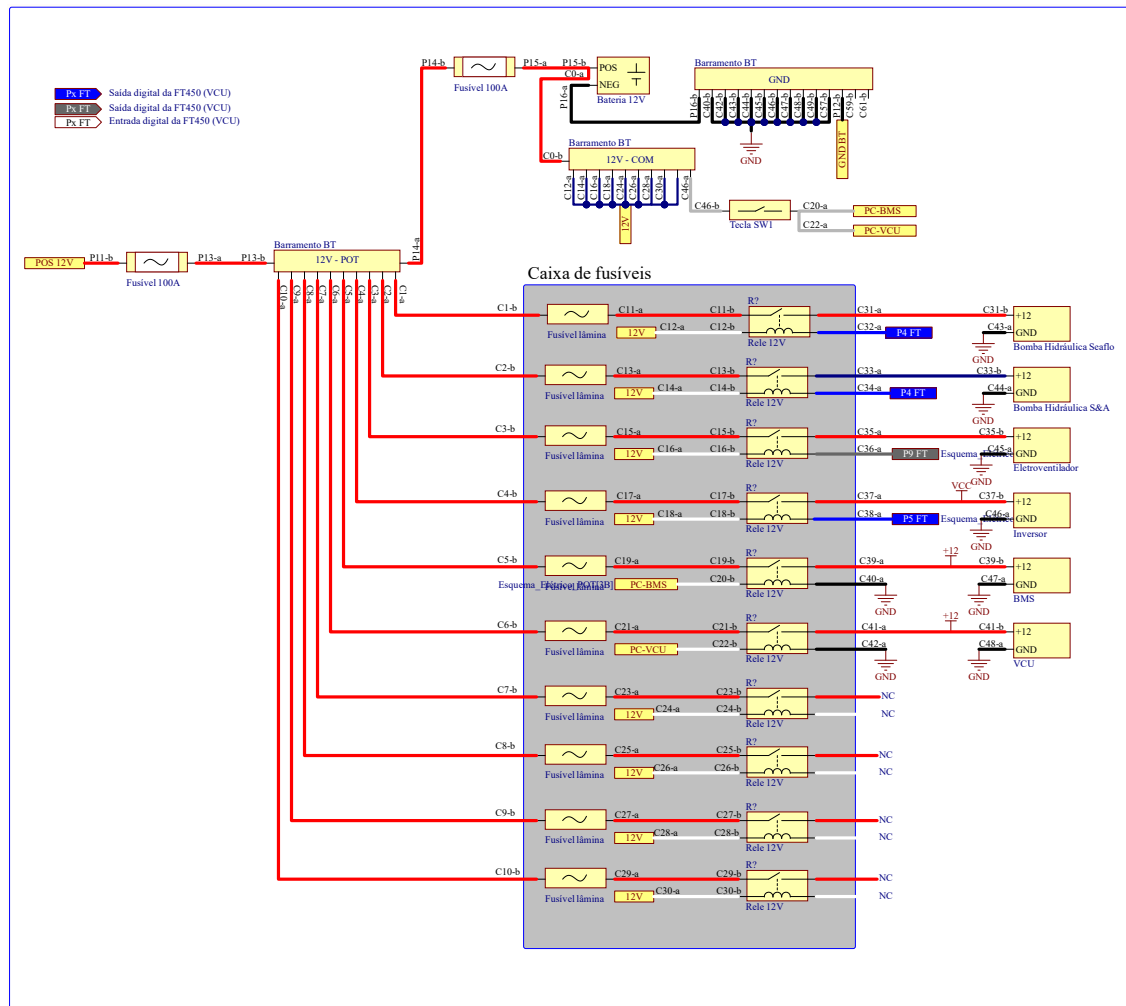


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.2 Circuito de Baixa Tensão

Para a alimentação dos circuitos auxiliares, comandos, bombas e do eletroventilador, foi utilizada uma caixa de fusíveis e relés, a fim de garantir uma melhor organização e proteção dos circuitos. Além disso, foi previsto três barramentos: um de *GND*, outro de *VCC* para as cargas maiores e um dedicado as cargas menores, como alimentação da bobina dos relés. O esquemático geral é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Esquema elétrico de BT.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os relés utilizados são do modelo DNI0118, que possuem diodo de proteção interno, responsável por dissipar a energia armazenada no indutor durante o desligamento. Todos operam em 12VDC, com capacidade de corrente de até 40A. As principais cargas e suas respectivas proteções estão apresentadas na Tabela 10.

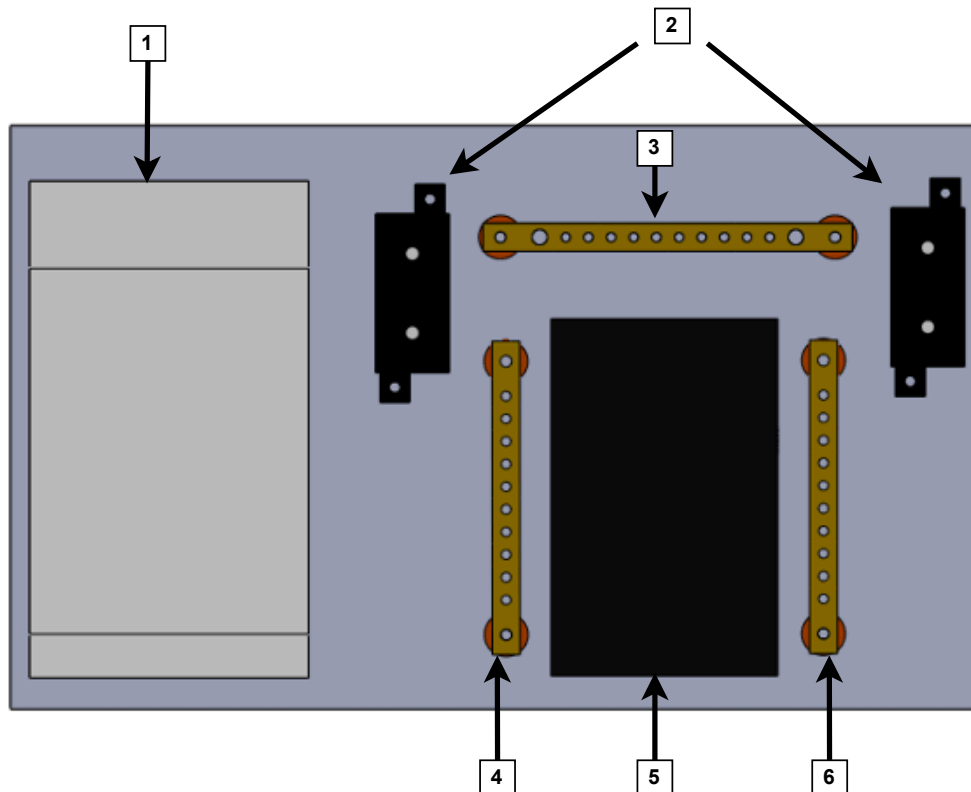
Tabela 10 – Cargas do circuito de baixa tensão e respectivos fusíveis de proteção.

Carga	Fusível de proteção
Bomba maior (100 W)	10 A
Bomba menor (36 W)	5 A
Eletroventilador (120 W)	20 A
Eletrônica do inversor	10 A
VCU	10 A
BMS da bateria	5 A

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A alimentação dessas cargas é proveniente de uma bateria de chumbo-ácido de 12V. A recarga dessa bateria é realizada por meio do APM. Como medida de proteção adicional, foram instalados dois fusíveis de 100A: um entre o APM e o barramento BT, e outro entre a bateria e o barramento. A construção física e disposição desses componentes são apresentadas nas figuras 35 e 36

Figura 35 – Modelagem esquema elétrico de BT.

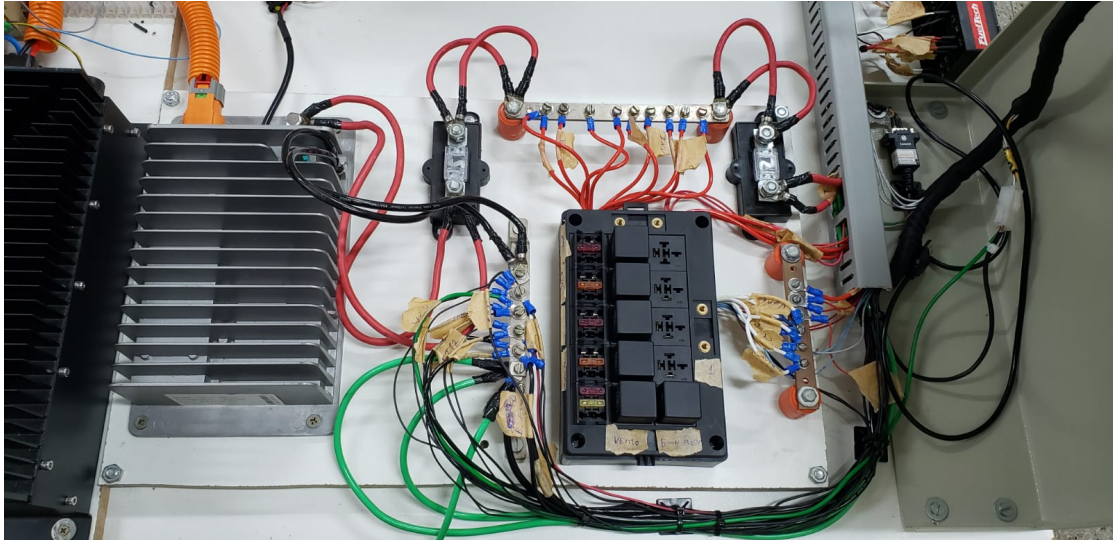


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Sendo:

- 1: Conversor APM;
- 2: Porta fusíveis para fusíveis de 100 A (APM e bateria de BT);
- 3: Barramento de potência (+12V);
- 4: Barramento GND
- 5: Caixa de fusíveis e reles;
- 6: Barramento de comando (+12V).

Figura 36 – Montagem esquema elétrico de BT.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4 PARAMETRIZAÇÃO E OPERAÇÃO

Para garantir o correto funcionamento do *powertrain* elétrico, o CVW500 utiliza um sistema de parametrização que define sua lógica de operação, os dados do motor, o modo de controle e as estratégias de comando. O ajuste e o monitoramento desses parâmetros são realizados através do software WPS, mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Interface para parametrização do inversor CVW500 .

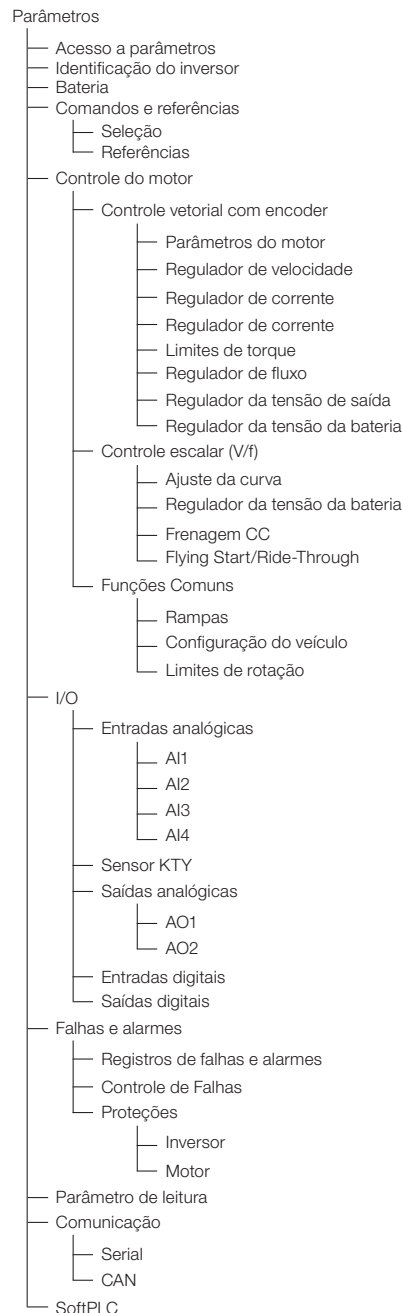
Parâmetro	Descrição	Offline	Online	Mínimo	Máximo	Ajustes de fábrica	Unidade	Tipo	Endereço
P0000	Senha de Acesso	0	0	0	9999	0		UINT	0
P0001	Referência de Rotação	0	0	0	18000	0		rpm	1
P0002	Rotação do Motor	0	0	0	18000	0		rpm	2
P0003	Corrente do Motor	0.0	0.0	0.0	600.0	0.0		A	3
P0004	Tensão da Bateria	0	0	0	1000	0		V	4
P0005	Frequência do Motor	0.0	0.0	0.0	500.0	0.0		Hz	5
P0006	Estado do Inversor	0: Subtensão	0: Ready (Pronto)	0	2000	0		V	6
P0007	Tensão de Saída (Motor)	0	0	0	2000	0		V	7
P0008	Velocidade do Veículo	0.0	0.0	0.0	200.0	0.0		km/h	8
P0009	Torque no Motor	0.0	0.0	-1000.0	1000.0	0.0		%	9
P0011	Coste da Saída	0.25	0.00	1.00	0.00	0.00			11
P0012	Estado das Entradas Digitais D18 a D11	☐ D11 ☐ D12 ☐ D13 ☐ D14 ☐ D15 ☐ D16 ☐ D17 ☐ D18	☐ D11 ☐ D12 ☐ D13 ☐ D14 ☐ D15 ☐ D16 ☐ D17 ☐ D18	0	255	0		UINT	12
P0013	Estado das Saídas Digitais DO4 a DO1	☐ DO1 ☐ DO2 ☐ DO3 ☐ DO4	☐ DO1 ☐ DO2 ☐ DO3 ☐ DO4	0	15	0		UINT	13
P0014	Valor da Saída Analógica AO1	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0		%	14
P0015	Valor da Saída Analógica AO2	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0		%	15
P0018	Valor da Entrada Analógica AI1	0.00	0.00	-100.00	100.00	0.00		%	18
P0019	Valor da Entrada Analógica AI2	0.00	0.00	-100.00	100.00	0.00		%	19
P0020	Valor da Entrada Analógica AI3	0.00	0.00	-100.00	100.00	0.00		%	20
P0021	Valor da Entrada Analógica AI4	0.00	0.00	-100.00	100.00	0.00		%	21
P0023	Versão de SW Controle	1.10	0.00	653.35	1.10	0.00		UINT	23
P0024	Versão de SW Potência	1.1	0.0	653.35	1.0	0.00		UINT	24
P0025	Factores Perdidos	0	0	65335	0	0		UINT	25
P0029	Configuração do Invt Potência	1: 130-400Vdc / 275.DA	0: Não Identificad.	1: 130-400Vdc / 275.DA	1: 130-400Vdc / 275.DA	0		UINT	29
P0030	Temperatura do IGBT Fase U	0.0	-30.0	150.0	0.0	0.0		°C	30
P0031	Temperatura do IGBT Fase V	0.0	-30.0	150.0	0.0	0.0		°C	31
P0032	Temperatura do IGBT Fase W	0.0	-30.0	150.0	0.0	0.0		°C	32
P0034	Temperatura Módulo de Controle	28.7	-30.0	150.0	0.0	0.0		°C	34
P0035	Temperatura Módulo de Potência	0.0	-30.0	150.0	0.0	0.0		°C	35
P0036	Temperatura do Motor	22	-30	200	0	0		°C	36
P0038	Velocidade do Encoder	0	0	18000	0	0		rpm	38

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4.1 Estrutura de Parâmetros e Configuração Inicial

O inversor possui mais de 1000 parâmetros, organizados em grupos funcionais para facilitar a navegação e a configuração. Estes grupos abrangem desde as especificações elétricas do motor até as configurações de comunicação e diagnóstico. A distribuição e hierarquia dos parâmetros podem ser visualizadas com mais detalhes na Figura 38.

Figura 38 – Estrutura de parâmetros do CVW500.



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2016).

4.4.1.1 Configurações essenciais da bateria e motor

A parametrização inicial do inversor começa pelo ajuste dos dados da fonte de alimentação e do motor utilizado. O ajuste pode ser visualizado nas figuras 39 e 40, respectivamente.

Figura 39 – Ajuste parâmetros da bateria no WPS.

Parâmetro	Descrição	Offline	Unidade
P0296	Tensão Nominal da Bateria	358	V
P0361	Corrente na Bateria	0.0	A
P0500	Valor de Sobre-tensão da Bateria	408	V
P0501	Valor de Subtensão da Bateria	336	V

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 40 – Ajuste parâmetros do motor no WPS.

Parâmetro	Descrição	Offline	Unida...
P0400	Tensão Nominal Motor	160	V
P0401	Corrente Nominal Motor	195.0	A
P0402	Rotação Nominal Motor	4480	rpm
P0403	Frequência Nominal Motor	153	Hz
P0404	Potência Nominal Motor	2: 33 kW	kW

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

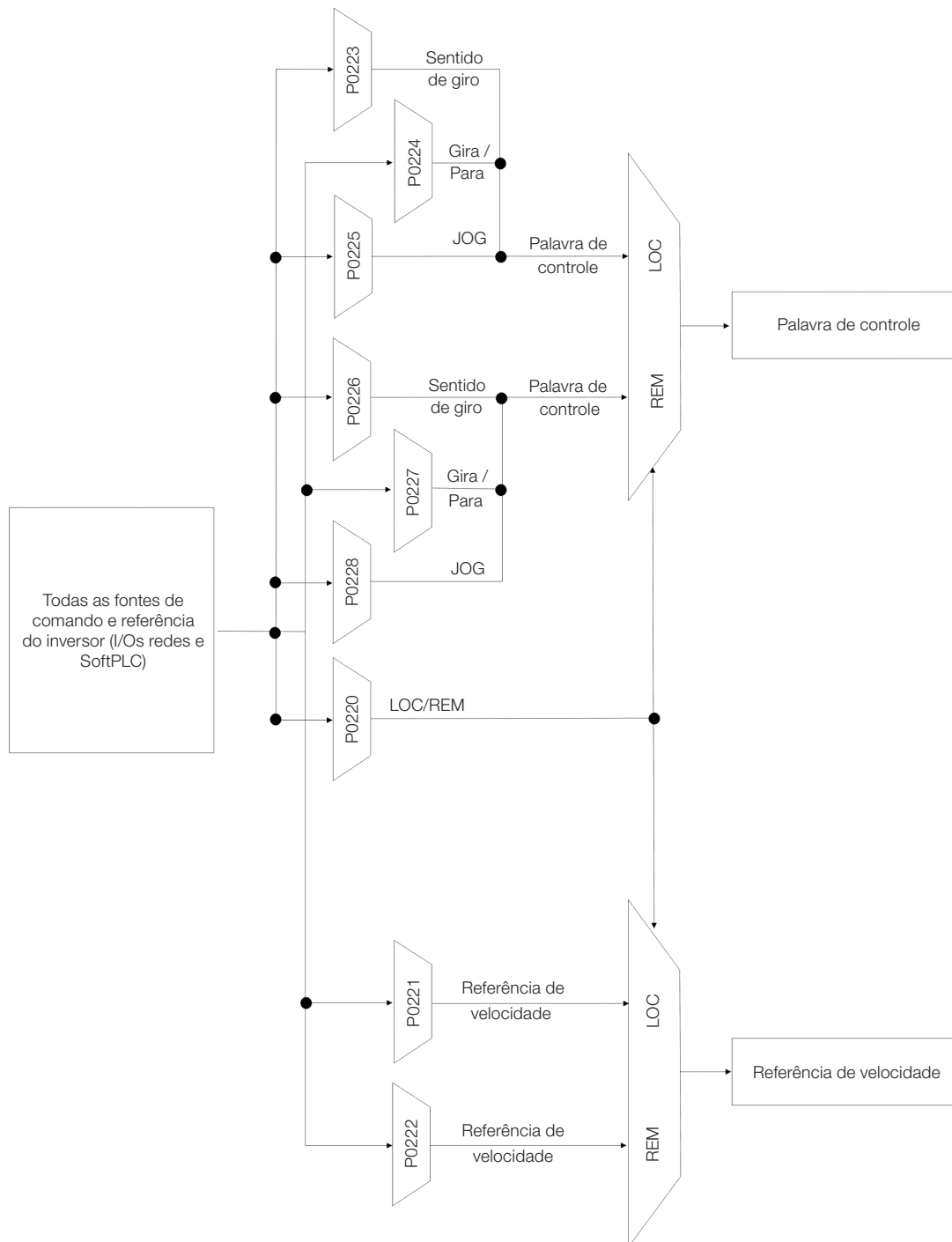
O parâmetro P0204 é utilizado para gerenciar o estado das configurações do inversor. Ao ajustar o "P0204 = 5" o inversor realiza um *reset* de fábrica e retorna para os valores pré-definidos de fábrica.

4.4.2 Estrutura de Comando e Estado Lógico

4.4.2.1 Estrutura de comando

A operação do inversor depende de uma palavra de comando que pode ser originada de diversas fontes, conforme ilustrado no bloco diagrama da Figura 41.

Figura 41 – Blocodiagrama geral para comandos e referências.



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2016).

Diferentemente de outros inversores da WEG que incluem uma Interface Homem-Máquina (IHM) física, o CVW500 foi projetado sem IHM, focando em aplicações onde o comando é externo.

Nesse contexto, os modos Local ou Remoto, definido pelo parâmetro P0220 (Modo Local = 0) / (Modo Remoto = 1), não se referem à operação física via IHM, mas sim a conjuntos de configurações de comando e referência distintos, pré-selecionados pelo usuário. Por exemplo:

- **Modo Local:** Permite ao usuário configurar uma fonte de comando (ex: entradas digitais) e uma fonte de referência (ex: analógica).
- **Modo Remoto:** Define uma outra fonte de comando e referência, por exemplo, configurado para uma comunicação principal com a VCU (via CAN ou serial)

A seleção entre esses modos de operação pode ser realizada dinamicamente através de uma entrada digital configurável, caso achar necessidade. Após, a escolha do modo de operação é necessário ajustar os parâmetros relacionados ao funcionamento da operação. Para que a potência seja liberada ao motor, é necessário acionar os comandos sequenciais:

- **Habilitar Geral (Enable):** É o comando principal que liga o circuito de potência do inversor. Sem ele, o drive permanece inoperante.
- **Gira/Para (Run/Stop):** Após o Habilitar Geral, este comando libera a execução da rampa de aceleração, permitindo que o motor atinja a velocidade de referência.
- **Sentido de Giro:** Define a direção de rotação do motor (horário ou anti-horário).
- **JOG (P0219):** Permite o acionamento momentâneo e de baixa velocidade do motor, para fins de teste, alinhamento ou posicionamento, sem utilizar a rampa de aceleração/desaceleração.

4.4.2.2 Estado lógico do inversor e SoftPLC

O parâmetro P0680 (Estado Lógico do Inversor) é um valor de leitura que permite o diagnóstico em tempo real do status operacional do equipamento. A figura 42 ilustra os principais estados.

Figura 42 – Parâmetro de leitura do estado lógico do inversor.

Parâmetro	Descrição	Offline
P0680	Estado Lógico	☐ Comando Gira ☐ Parada Rápida ☐ Sem Função ☐ Modo Config. ☐ Alarme ☐ Girando ☐ Habilitado ☐ Horário ☐ JOG ☐ Remoto ☐ Subtensão ☐ Sem Função ☐ Falha

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Um exemplo de operação é mostrado na tabela 11.

Tabela 11 – Exemplo de estados do inversor em uma operação.

Estado (Exemplo)	Significado
0 - Desabilitado	Inversor sem alimentação de potência ou comando de Habilitar Geral inativo.
1 - Pronto (Ready)	Inversor com Habilitar Geral ativo, pronto para receber o comando Gira/Para.
2 - Girando (Run)	Inversor em operação, aplicando frequência/tensão ao motor conforme a referência.
3 - Alarme	O inversor detectou uma condição anormal, mas pode continuar a operar ou parar com uma mensagem de aviso.
4 - Falha	O inversor detectou uma condição crítica (curto-circuito, sobrecorrente, ou algum outro problema) e desabilitou imediatamente a potência, exigindo uma reinicialização manual.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O inversor tem a função SoftPLC, que é um recurso que integra a funcionalidade de um Controlador Lógico Programável (CLP) ao inversor. Permite ao usuário desenvolver lógicas de controle em Linguagem Ladder utilizando o software WLP, com isso, é possível criar funções específicas que interagem com todas as entradas/saídas (I/Os) e parâmetros do inversor (incluindo os parâmetros P1010 em diante, que são reservados para uso exclusivo do usuário na lógica SoftPLC).

4.4.3 Configuração do Controle Vetorial com Encoder

O CVW500 suporta diferentes modos de controle. Para os testes em bancada foi realizado um controle vetorial com Encoder ($P0202 = 4$) que é o controle que será implementado na van posteriormente.

A estrutura de controle vetorial utilizada pode ser visualizada na Figura 43, que consiste em três malhas PI (velocidade, fluxo e corrente) operando em cascata.

Tabela 12 – Parâmetros do motor e valores encontrados.

Parâmetro	Descrição	Valor
P0409	Resistência do Estator (R_e)	0.007 Ohm
P0410	Corrente de Magnetização (I_μ)	90.3 A
P0411	Indutância de Dispersão ($L_{d\sigma}$)	0.06 H
P0412	Constante de Tempo do Rotor (T_r)	0.151 s
P0413	Constante de Tempo do Motor (T_m)	0.14 s

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os valores obtidos por P0409 a P0413 são a base para o cálculo dos ganhos proporcional (G_p) e integral (G_I) das malhas de corrente e velocidade, preenchendo automaticamente os parâmetros relacionados a esses ganhos.

Embora o Autoajuste forneça valores iniciais, é comum que seja realizado um ajuste fino na prática. As imprecisões do modelo matemático interno, podem gerar oscilações ou respostas lentas.

Neste projeto, observou-se que os ganhos automaticamente ajustados não resultaram em uma resposta satisfatória do motor, conforme confirmado por testes e suporte técnico do fabricante. Foi necessário realizar ajustes manuais, focando nos controladores principais:

- Regulador de velocidade (P0161 e P0162): O ganho proporcional (P0161) e o ganho integral (P0162) foram ajustados empiricamente para otimizar a resposta transitória (P0161) e eliminar o erro em regime permanente (P0162), garantindo que o motor seguisse a referência de velocidade sem oscilações excessivas.
- Corrente de magnetização (P0410): A corrente de magnetização foi ajustada para garantir que o motor atingisse sua tensão Nominal (165V) na velocidade base. A forma mais precisa de ajustar esta corrente é elevá-la até que a tensão de saída do inversor (P0003) se iguale à tensão nominal do motor (P0403) quando o motor estiver rodando em velocidade nominal.

Os parâmetros ajustados são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Principais parâmetros ajustados para operação do inversor com controle vetorial.

Parâmetro	Descrição	Valor
P0100	Tempo de aceleração	0.2 s
P0101	Tempo de desaceleração	0.3 s
P0161	Ganho proporcional do reg. de velocidade	0.2
P0162	Ganho integral do reg. de velocidade	0.044
P0165	Filtro de velocidade	0.012
P0167	Ganho proporcional do reg. de corrente	0.2
P0168	Ganho integral do reg. de corrente	0.044
P0169	Máxima corrente de torque +	125
P0170	Máxima corrente de torque -	125
P0175	Ganho proporcional do reg. de fluxo	0.2
P0176	Ganho integral do reg. de fluxo	0.044
P0178	Fluxo nominal	100%
P0188	Ganho proporcional do reg. de tensão do motor	0.2
P0189	Ganho integral do reg. de tensão do motor	0.044

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

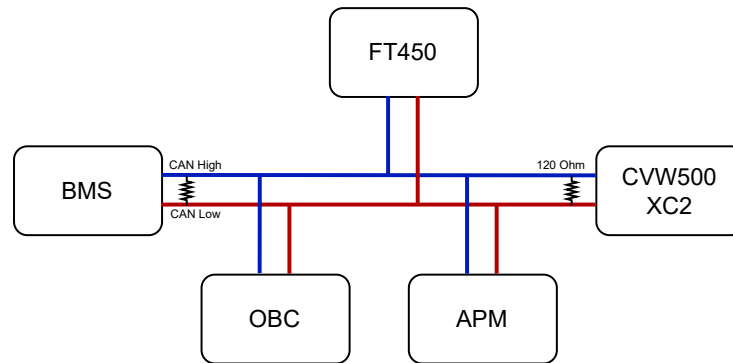
Com o ganho e os parâmetros dos controladores acertados, o inversor está pronto para operar com o motor, respondendo às referências de comando e velocidade conforme a parametrização definida. O inversor pode ser comandado via CAN, comunicação serial ou através de I/Os digitais e analógicas, de acordo com a configuração selecionada pelo usuário.

Nesta abordagem inicial, o controle vetorial por velocidade permitiu a obtenção dos dados de desempenho que serão apresentados no próximo capítulo. Em seguida, será detalhada a transição para a estratégia de controle por torque, para a integração final no veículo. Para isso, será abordada a integração e a devida parametrização do inversor para realizar o controle via CAN, utilizando a VCU FT450, que será a unidade de controle do veículo.

4.4.4 Rede can e integração com a VCU

Para a integração de todos os periféricos e a VCU foi necessário criar uma rede can para que todos possam se comunicar. A rede criada é exemplificada na figura 44.

Figura 44 – Diagrama da rede can instalada na bancada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nesse trabalho será abordado principalmente a integração da VCU com o powertrain e o pack de baterias que tem integração direta com a FT450, o OBC utiliza a rede CAN para se comunicar com a bateria e gerenciar o ciclo de recarga do pack, operando sem uma integração de comando direta com a VCU. Os detalhes da placa de comunicação desenvolvida para interligar a estação de recarga, o OBC e o pack de baterias podem ser consultados no trabalho de conclusão de curso de (NASCIMENTO, 2025). Similarmente, o APM compartilha o barramento para obter informações do pack de baterias, conforme detalhado no trabalho de (METZNER, 2025). A única integração direta da VCU com o APM ocorre para o acionamento do seu enable, iniciando a recarga da bateria auxiliar sob condições pré-ajustadas e monitoradas pela própria VCU. Por fim, a comunicação entre o pack de baterias, e o inversor tem integração direta com a VCU e depende essencialmente da rede can para o correto funcionamento.

4.4.4.1 Comunicação CAN do pack de baterias

Para a comunicação e comando com o pack de baterias, foi fornecido pelo fabricante o *frame* CAN do BPW01, mostrado na figura 45. A comunicação com o BMS é estabelecida com as seguintes especificações de protocolo:

- Protocolo: CAN com frame estendido de 29 bits;
- Formato de Dados: Big Endian;
- Velocidade: 250 kbps.

Figura 45 – Tabela de Frames CAN - Pack de baterias.

Battery Pack String																		
Telegrama	ID (hex)	DLC	BYTE 1		BYTE 2		BYTE 3		BYTE 4		BYTE 5		BYTE 6		BYTE 7		BYTE 8	
Tx	701	8	Allowed discharge current (0,1A)				Allowed regen current (0,1A)				Max charge current (0,1A)				Max charge voltage (0,1V)			
Tx	702	8	BMS STATE		IO_STATE		Avarage_cell_voltage (mV)				Max cell voltage (1mV)				Min cell voltage (1mV)			
Tx	703	8	SOC (1%)		SOH (1%)		Pack voltage (1V)				Pack current (0,1A)				Lowest temperature (1°C)		Higest temperature (1°C)	
Tx	704	8	Pack resistance (1 mΩ)				Cells connected				Highest cell voltage		Lowest cell voltage		LMU Highest temperature		LMU Lowest temperature	
Tx	705	8	Error Flags								Warning Flags							
Tx	706	8	Ah Summed (0,1Ah)				Remaning Wh (1Wh)								Remaning Charge time (1s)			
Tx	70a	8	LMU dataset		LMU PCB temp 1 (1°C)		LMU PCB temp 2 (1°C)		LMU BAT temp 1 (1°C)		LMU BAT temp 2 (1°C)							
Tx	70b	8	LMU Voltage cell 1 (1mV)				LMU Voltage cell 2 (1mV)				LMU Voltage cell 3 (1mV)				LMU Voltage cell 4 (1mV)			
Tx	70c	8	LMU Voltage cell 5 (1mV)				LMU Voltage cell 6 (1mV)				LMU Voltage cell 7 (1mV)				LMU Voltage cell 8 (1mV)			
Rx	601	8	CAN Charge Enable		CAN Discharge Enable		BMS Reset		Leak Disable						-		-	
Rx	602	8	Set SOC (0-99%)				-		-						-		-	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O protocolo de comunicação é organizado por endereços de identificação (IDs) que indicam o sentido da comunicação e a funcionalidade (leitura ou escrita) no barramento CAN:

Tabela 14 – Estrutura dos IDs de Comunicação CAN do Pack de Baterias.

Tipo de mensagem	Endereço (ID) começa com:	Descrição
Leitura (Tx)	Número 7 (ex: ID 701)	Variáveis de estado e leitura (ex: tensão e temperatura).
Escrita (Rx)	Número 6 (ex: ID 601)	Recebem comandos da VCU (ex: habilitar carga/descarga).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O segundo dígito do ID identifica a string de bateria, para quando se estiver operando com mais de um pack de baterias (0 para String 1, 1 para String 2, e assim por diante). O último dígito indica o tipo específico de mensagem a ser lida ou escrita.

A operação e o controle do pack de baterias são realizados através de um único ID de escrita (ex: ID 601 para a String 1), que aloca quatro variáveis em formato de bytes. Se ambos os bytes de ativação de carga e descarga estiverem em 0, o sistema entra em modo de espera. Se ambos estiverem em 1, a prioridade será do CAN Charge Enable.

O BMS é 100% integrável com a VCU, fornecendo as variáveis necessárias para o monitoramento e aceitando os comandos para sua correta operação.

4.4.4.2 Configuração do inversor

Para o correto funcionamento e integração da FT450 com o inversor, é necessário programar o configurador can do CVW500 para compatibilidade com a VCU. Para isso, com a ajuda do suporte técnico da Fueltech foram configurados os endereços CAN criados para a compatibilidade entre a FT450 e o CVW500, caso contrário a comunicação entre os dois seria inexistente. Os endereços criados são mostrados na figura 46.

Figura 46 – Endereços criados para comunicação entre a VCU e o inversor.

PACOTES TX DO INVERSOR					
ID	WORD 1	WORD 2	WORD 3	WORD 4	Período [ms]
0x13F810B2	1	2	3	4	15
0x13F810B3	7	9	10	11	50
0x13F810B4	12	13	18	19	100
0x13F810B5	30	31	32	34	500
0x13F810B6	48	49	6	680	500
0x13F810B7	402	403	-	-	500
PACOTES RX DO INVERSOR					
ID	WORD 1	WORD 2	WORD 3	WORD 4	
0x13F810B0	684	685	169	170	
0x13F810B1	178	-	-	-	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A configuração do CAN no CVW500 é realizada por meio do software WLP da WEG, como mostrado na figura 47.

Figura 47 – Configuração can no WLP.

Configurador CAN

☒ Habilita

Tipo do Telegrama CAN:
☐ Standard (11 bits)
☒ Extended (29 bits)

Formato dos Dados:
☒ Big Endian (Motorola)
☐ Little Endian (Intel)

Rx Timeout (ms):

Mensagem Tx : 6

COBID (Hex)	WORD1	WORD2	WORD3	WORD4	Period (ms)
13F810B2	1	2	3	4	15
13F810B3	7	9	10	11	50
13F810B4	12	13	18	19	100
13F810B5	30	31	32	34	500
13F810B6	48	49	6	680	500
13F810B7	402	403			500

Adicionar Deletar Sobe Desce

Mensagem Rx : 2

COBID (Hex)	WORD1	WORD2	WORD3	WORD4
13F810B0	684	685	169	170
13F810B1	178			

Adicionar Deletar Sobe Desce

OK Cancelar Ajuda

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Através desses endereços, a VCU obtém o estado real do inversor e envia os comandos necessários para o seu funcionamento, realizando o gerenciamento do sistema de propulsão.

A VCU também realiza o acionamento da pré-carga do inversor do seguinte modo:

1. A VCU aciona o relé de pré-carga;
2. O inversor possui um sensor que verifica a tensão do barramento CC e, ao carregar o capacitor, envia um sinal de confirmação à VCU via CAN, indicando que a pré-carga foi realizada através do parâmetro 13 (uma das saídas digitais deve ser configurado como "Pré-carga Ok", como mostrado na figura 48);
3. Após receber o sinal, a VCU aciona a contatora do lado positivo;

4. Envia um comando ao BMS para habilitar a descarga do banco de baterias (ajustando o Byte 1 do ID de Escrita);
5. Ajusta o parâmetro 684 para definir o estado lógico do inversor, conforme mostrado na figura 49;
6. Neste momento, o sistema está pronto para liberar torque para o motor.

Figura 48 – Exemplo de configuração para o processo de indicação da pré-carga.

P0013	Estado das Saídas Digitais DO4 a DO1	☐ DO1 ☐ DO2 ☐ DO3 ☒ DO4
P0278	Função da Saída DO4	9: Pre carga OK

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 49 – Controle lógico do inversor via can.

P0684	Controle via CAN	☐ Habilita Rampa ☐ Habilita Geral ☐ Girar Horário ☐ Habilita JOG ☐ Remoto ☐ Sem Função ☐ Parada Rápida ☐ Reset de Falha
-------	------------------	--

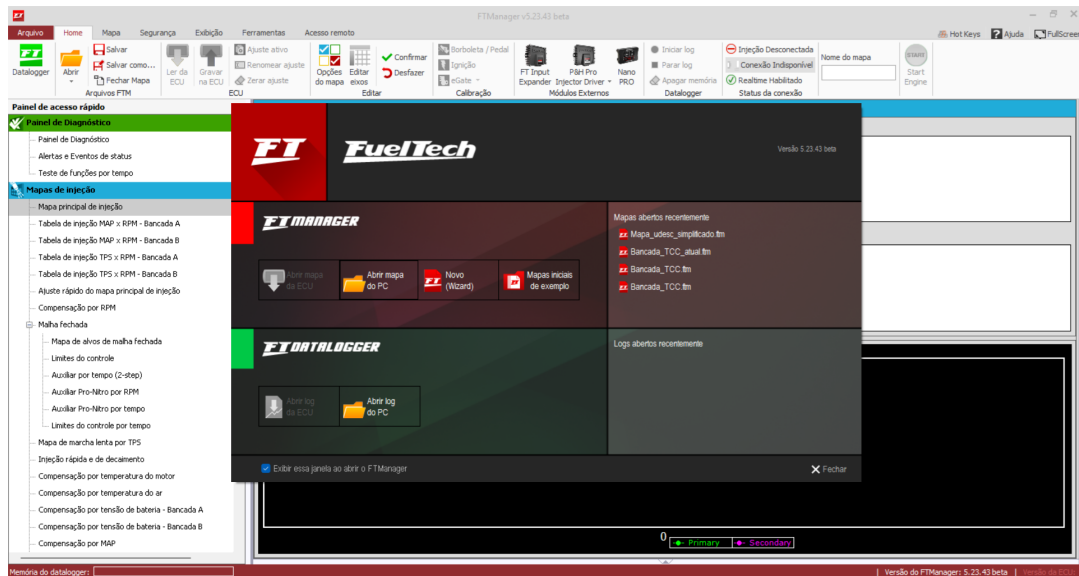
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para o correto funcionamento da rede CAN, é necessário a organização dos níveis de prioridade das mensagens e a compatibilidade entre todos os equipamentos. A Fueltech atua como um facilitador, organizando os comandos e realizando o gerenciamento necessário. Na próxima seção será mostrado a configuração na VCU para o correto funcionamento.

4.4.5 Configuração da FT450

A FT450 é uma unidade programável, cujo os ajustes e configurações dos mapas são realizados por meio do software FTManager. Este software atua como a principal interface para gerenciamento da VCU, abrangendo a configuração de entradas e saídas, calibração de sensores, configurações de interface, alertas, painel de diagnóstico (dashboard), visualização do datalogger e, o mais importante para este trabalho, a configuração da eletrificação do veículo.

Figura 50 – Interface FTManager.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Embora a FT450 possua diversas funções para otimizar a performance de veículos a combustão, para os testes em bancada, o foco foi concentrado na eletrificação e no comissionamento para o correto funcionamento e integração com o powertrain elétrico, além do acionamento dos periféricos necessários para o sistema de refrigeração.

4.4.5.1 Ajuste da eletrificação

Dentro do FTManager, a configuração do sistema elétrico é simplificada pela opção de Modo do Veículo, que pode ser definida como "Elétrico", ocultando funções não pertinentes à combustão e facilitando o uso do equipamento, como mostrado na figura 55. Na seção de eletrificação, o software oferece configurações pré-definidas para a integração com os principais componentes do powertrain elétrico, como:

- **Inversores de Frequência:** Permite selecionar o modelo do inversor de tração a ser utilizado, garantindo a compatibilidade de comunicação com a FT (no caso do projeto, o CVW500). O software é continuamente atualizado pela FuelTech, incorporando a integração com novos modelos de inversores.
- **BMS:** Similarmente, é possível configurar a comunicação com o BMS.
- **APM e OBC:** Também é possível selecionar o modelo a ser utilizado, caso disponível.

Figura 51 – Configuração inicial do FTManager.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nas figuras 52, 53 e 54 é possível verificar o ajuste rápido para a opção da eletrificação, onde é selecionado os principais componentes para a integração com a FT.

Figura 52 – Escolha do inversor a ser utilizado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 53 – Escolha do BMS e ajuste do pack de baterias.

Gerar mapa padrão - Características do controle de bateria

Características do controle de bateria
Selecione as opções conforme as características da bateria instalada.

Gerenciamento bateria HV

Modelo BMS
WEG S

DCL Fixo - Aplicação sem BMS
500 A

CCL Fixo - Aplicação sem BMS
250 A

Tempo Pré-carga do inversor
2000 ms

Energia da bateria
73 kWh

SOC mínimo permitir torque
10 %

Destacionamento para desligar a regeneração
100 %

SOC máximo permitir regeneração
90 %

Velocidade para desabilitar torque
10 km/h

Tensão mínima da bateria
336,0 V

Tensão nominal da bateria
358,0 V

Tensão máxima da bateria
408,0 V

Cancela < Anterior Próximo >

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 54 – Escolha do modelo do OBC a ser utilizado.

Gerar mapa padrão - Características do controle do OBC

Características do controle do OBC
Selecione as opções conforme as características do OBC instalado.

Controle de On-Board Charger

Modelo de OBC
Dilong DAK3K3M

Entrada para desligar o Carregador de bordo

☐ Botão do DashBoard

☐ Botão externo Desliga Carga

Ativação do botão de entrada Desliga Carga

☒ Ativado em 0V

☐ Ativado em 12V

Saída da trava do conector de carga

☒ Ativo em 0V

☐ Ativo em 12V (Somente c/ saídas amarelas)

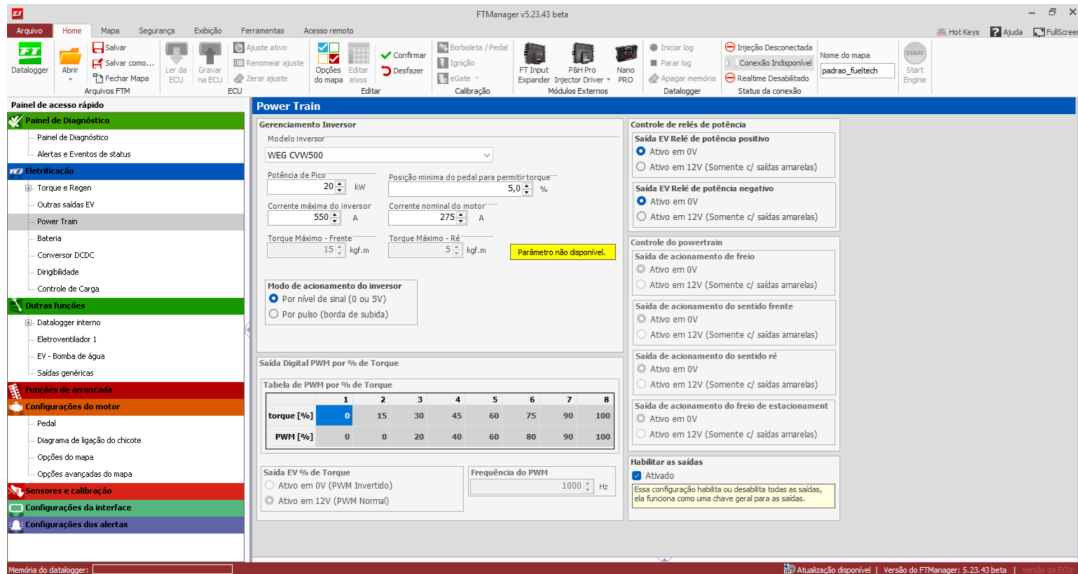
Cancela < Anterior Gerar

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A estrutura de menus e configuração criada pela FT é mostrada na figura 55, permitindo

o ajuste do mapa conforme a necessidade do projeto.

Figura 55 – Mapa gerado a partir das informações iniciais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para a correta operação da VCU, foi necessário a calibração dos sensores e a configuração dos protocolos de comunicação. O (TPS)², que atua como o acelerador do veículo, teve sua calibração ajustada. É importante que a VCU realize a calibração do acelerador para reconhecer corretamente as posições de 0% (repouso) e 100% (aceleração máxima), garantindo a entrega do torque.

Além do TPS, outros sensores do sistema, como os de temperatura, também foram ajustados e calibrados. No que tange à comunicação, o baud rate da rede CAN foi configurado para 250 kbps.

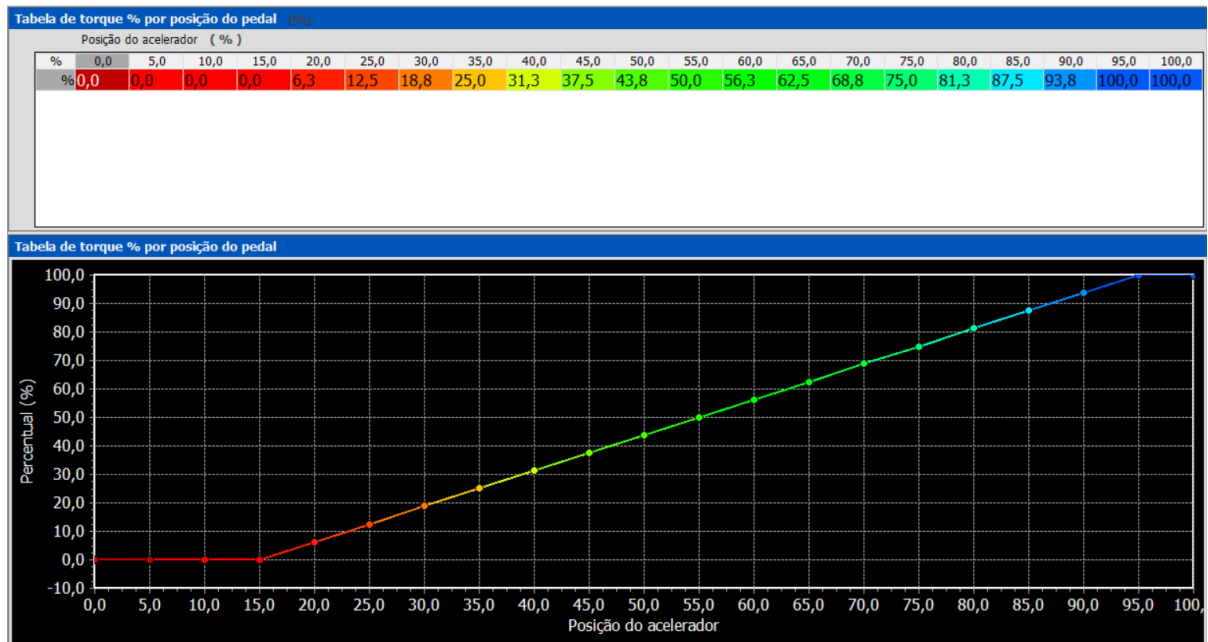
4.4.5.2 Mapa de torque

Um ajuste fundamental para a realização dos testes em bancada foi a calibração das curvas de demanda de torque e de regeneração do veículo. Estes mapas definem a relação de torque máximo (ou potência) que o sistema elétrico deve entregar com base em diferentes parâmetros.

O mapa da figura 56 define o torque do veículo conforme a posição do pedal do acelerador. Já na figura 57 ilustra a relação entre o torque e a rotação do motor. Como a rotação nominal é de 4480 rpm e a máxima é de 7600 rpm, a curva foi ajustada para que o torque comece a cair após a rotação nominal, respeitando o limite máximo do motor.

² Do inglês, *Throttle Position Sensor*

Figura 56 – Curva de torque por posição do pedal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

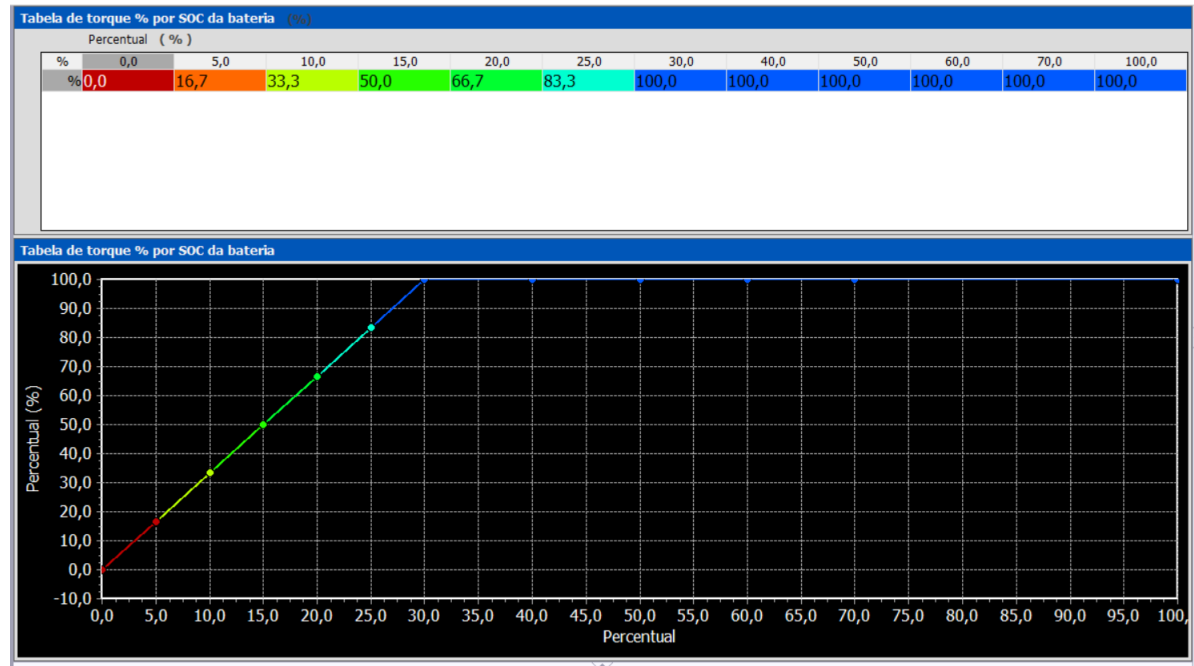
Figura 57 – Curva de torque por rpm.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

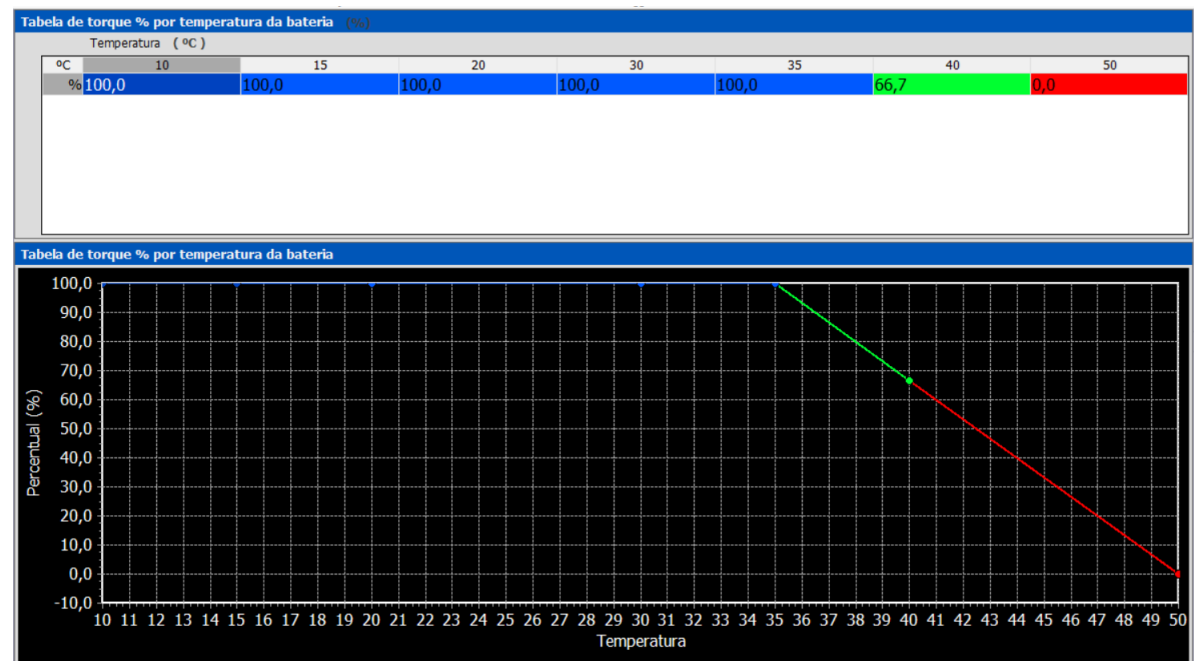
Para proteger a bateria em condições críticas de operação, foram definidos mapas que limitam o torque máximo com base no estado de carga e na temperatura da bateria. Na figura 58 estabelece as condições de torque do veículo em função do SOC da bateria. Já na figura 59 define as limitações de torque com base na temperatura da bateria.

Figura 58 – Curva de torque por SOC da bateria.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 59 – Curva de torque por temperatura da bateria.

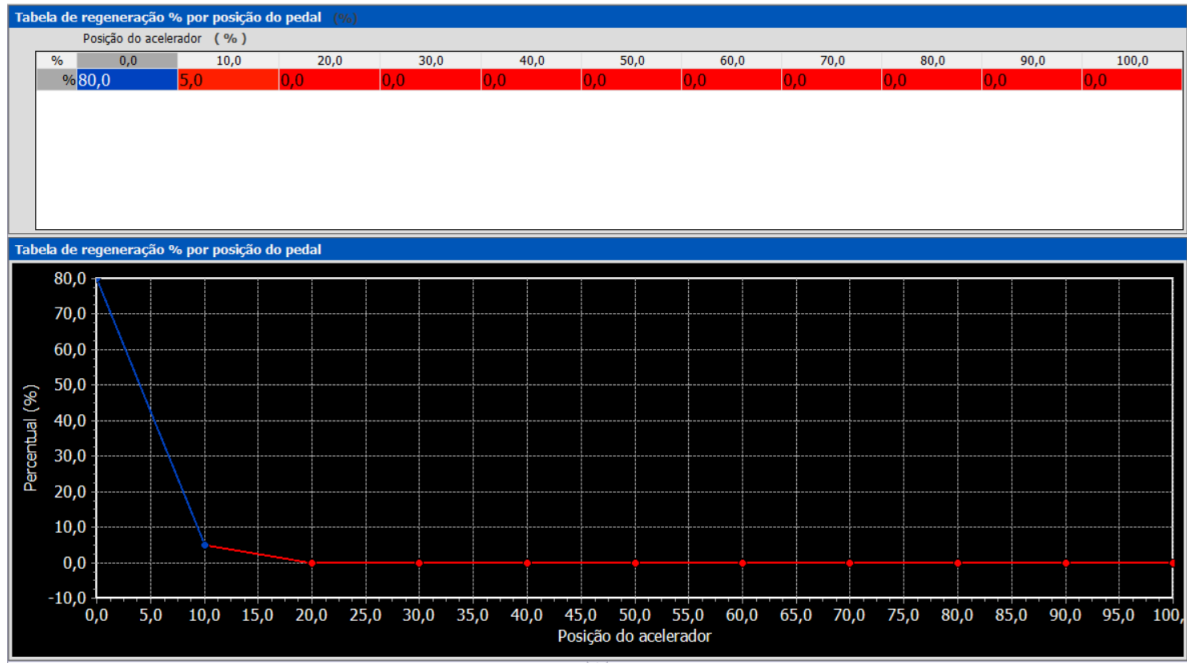


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os mapas de regeneração foram ajustados para definir as condições e intensidade da atuação do freio regenerativo. Os ajustes do mapa para condições de regeneração são mostrados na figura 60. O freio regenerativo foi configurado para atuar quando a posição do pedal estiver abaixo de 20%. Na figura 61 exibe o mapa de regeneração em função da rotação do motor.

A regeneração atua quando a rotação do motor estiver abaixo de 5000 rpm, atingindo sua capacidade máxima em 3000 rpm.

Figura 60 – Curva de regeneração por posição do pedal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 61 – Curva de regeneração por rpm.

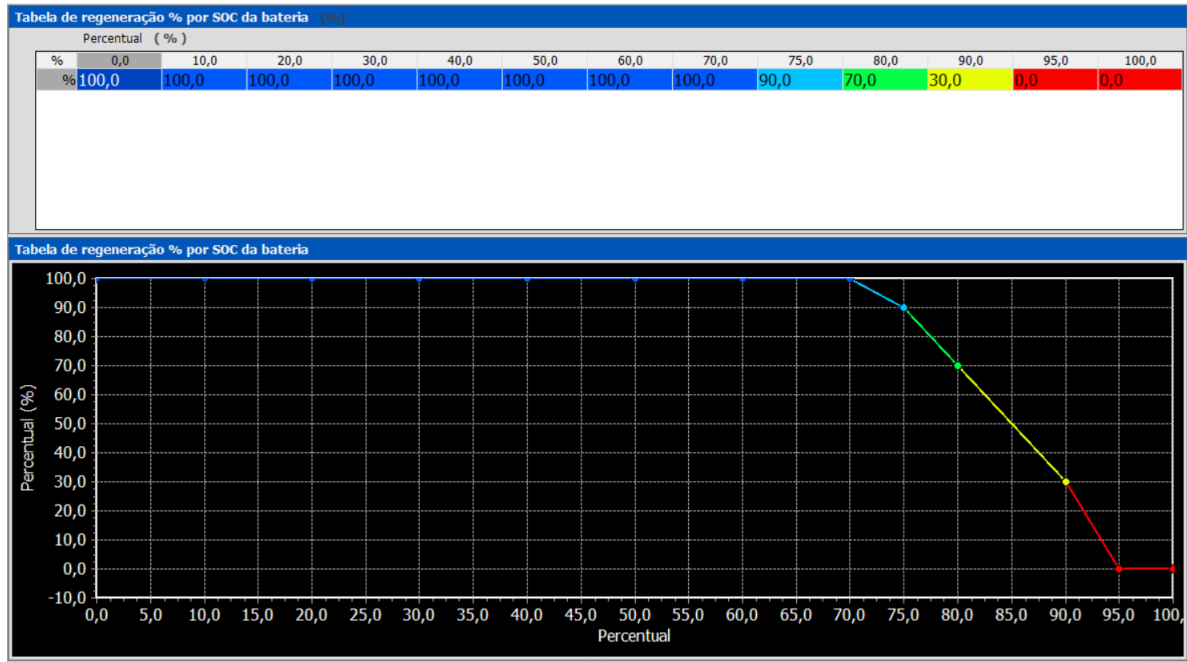


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De forma análoga aos limites de torque, a regeneração também possui restrições para proteção da bateria. O freio regenerativo não é ativado caso o SOC da bateria esteja acima

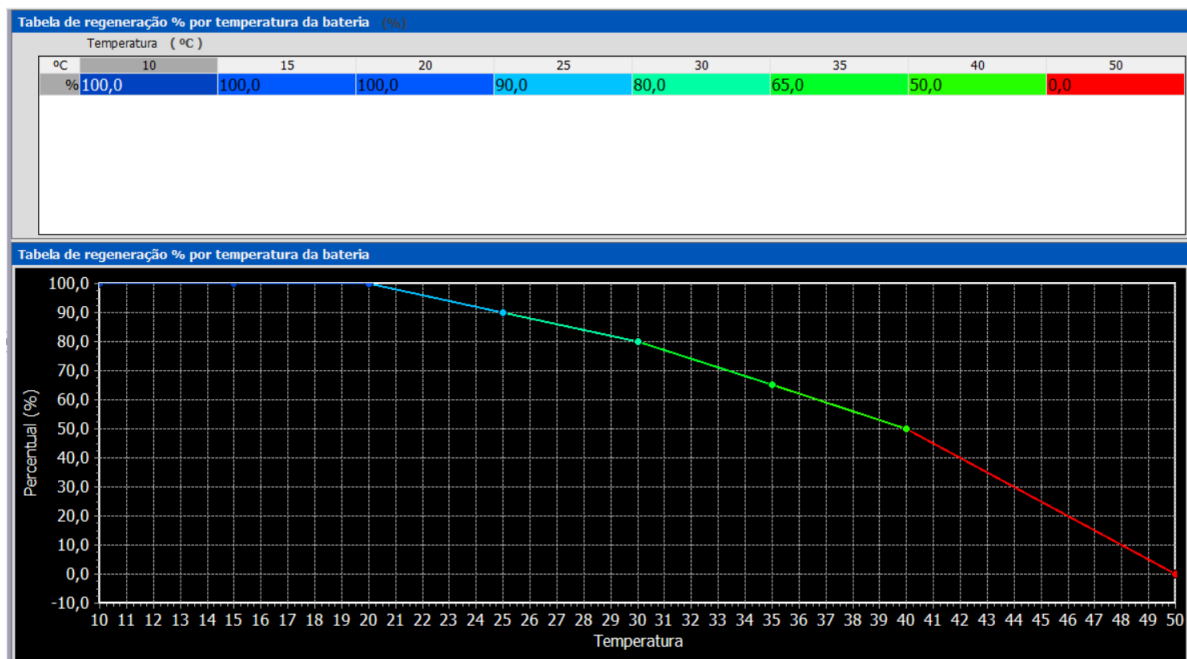
de 95%. A intensidade aumenta gradualmente à medida que o SOC cai para valores abaixo desse limite, conforme ilustrado na Figura 62. A regeneração também não é gerada quando a temperatura da bateria estiver acima de 50°C. A curva característica de regeneração com base na temperatura é apresentada na Figura 63.

Figura 62 – Curva de regeneração por SOC da bateria.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 63 – Curva de regeneração por temperatura da bateria.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4.5.3 Acionamento dos periféricos

Outra configuração a ser ajustada são as entradas e saídas para o acionamentos dos periféricos. Os ajustes realizados são mostrados nas figuras 64 e 65 respectivamente.

Figura 64 – Configuração das entradas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 65 – Configuração das saídas digitais.

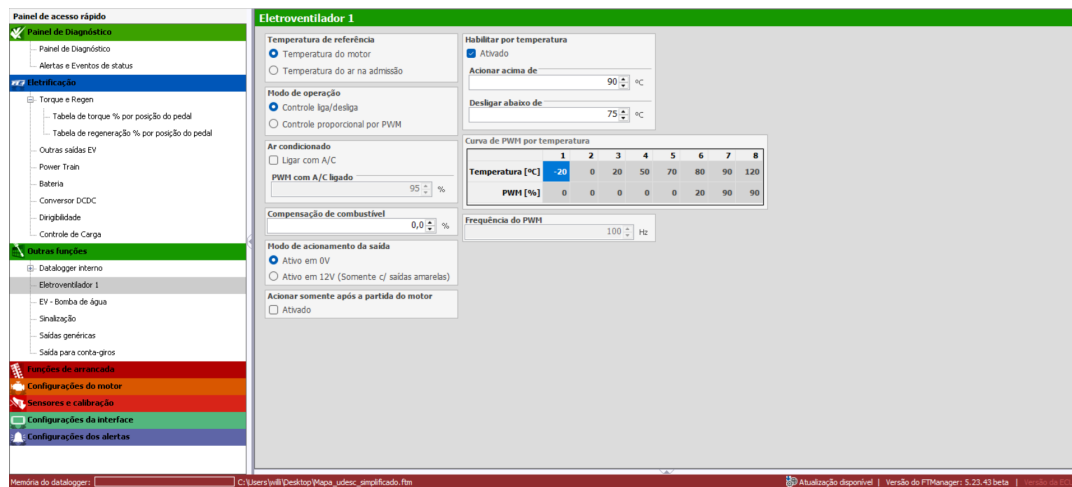
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Sendo,

- Entrada "EV Inversor ON/OFF": Designada para acionar (habilitar) ou desacionar o inversor de frequência

- Entrada "Frente/Ré": Utilizada para habilitar o sentido de giro do motor, permitindo que a VCU comande a inversão de fase (ou sentido de rotação) no inversor.
- As saídas digitais foram utilizadas para o acionamento das bombas e do eletroventilador, controlando a temperatura do sistema.
- A configuração dessas saídas é baseada em setpoints de temperatura, conforme ilustrado na figura 66.

Figura 66 – Ajuste controle térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

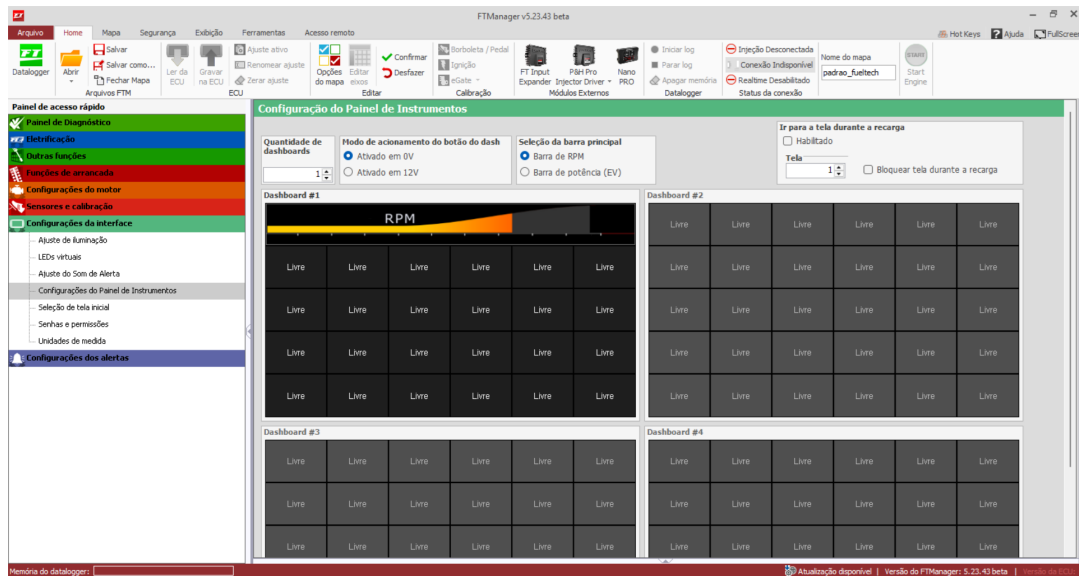
4.4.5.4 Painel de diagnóstico

O painel de diagnóstico (Dashboard), ilustrado na Figura 67, é uma das principais vantagens da FT450. Esta funcionalidade permite a visualização de dados em tempo real, importante para o monitoramento e a identificação de anomalias durante os testes.

O dashboard oferece flexibilidade de configuração, permitindo personalizar as grandezas exibidas conforme a necessidade de monitoramento. É possível apresentar informações como torque, rotação, tensões, temperaturas e o status geral do sistema.

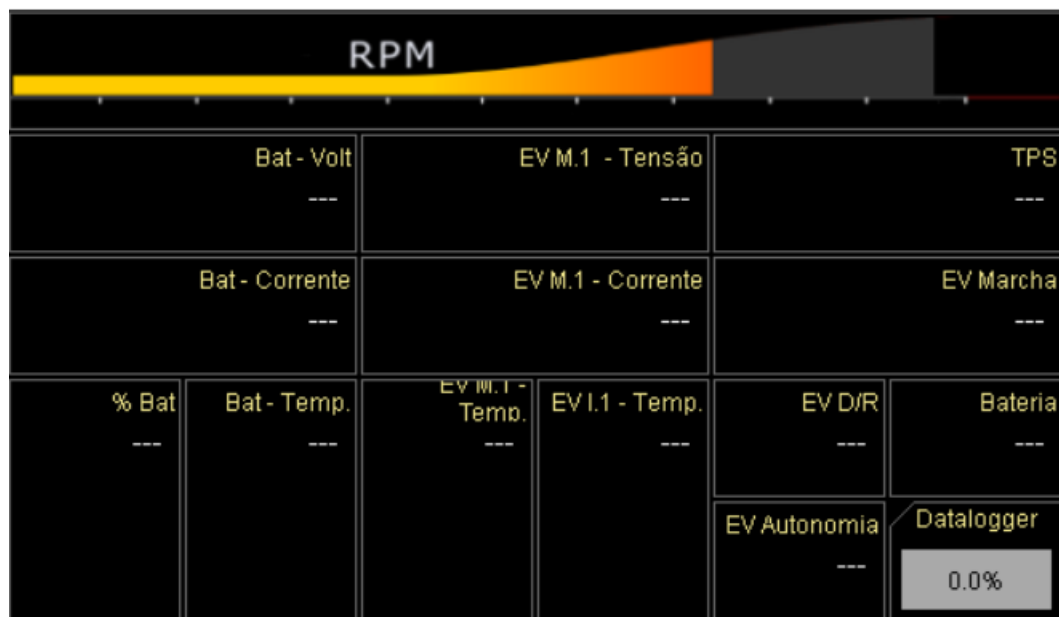
Além disso, a ferramenta suporta a criação e alternância entre múltiplos painéis de diagnóstico. A configuração específica do dashboard ajustada para os testes é detalhada na Figura 68.

Figura 67 – Configuração do dashboard da FT450.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 68 – Dashboard configurado para os testes em bancada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O recurso de Datalogger permite o registro de todos os dados monitorados em tempo real. Este recurso é importante para a análise pós-teste, possibilitando a revisão detalhada do comportamento do powertrain e dos periféricos.

Na figura 69 é mostrado os alertas configurados para o sistema, que disparam avisos na ocorrência de condições pré-determinadas (como sobretemperatura ou subtensão).

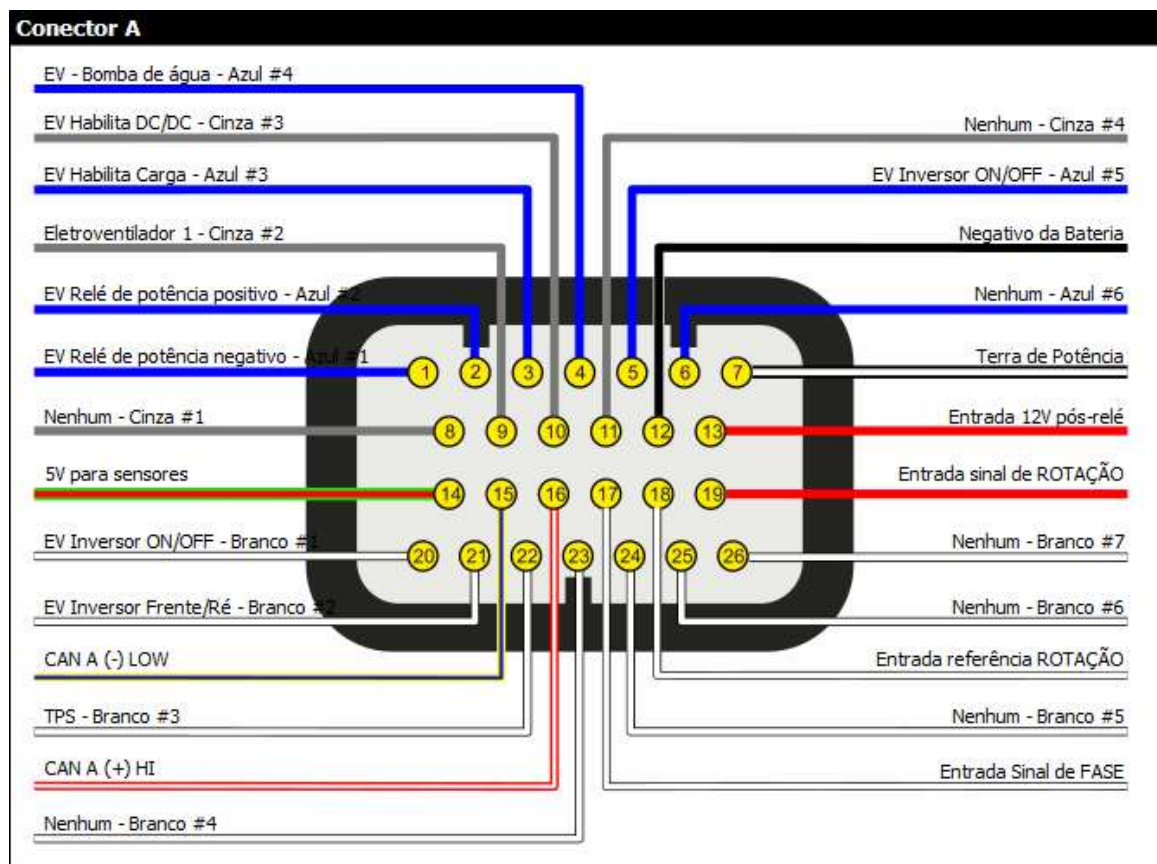
Figura 69 – Configuração dos alertas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com todos os ajustes configurados, é gerado o diagrama com as ligações entre a VCU e o restante dos equipamentos, mostrado através do esquema 70.

Figura 70 – Esquema de ligações com a VCU.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4.6 Ajuste dos parâmetros do inversor para comunicação via rede can

Para o correto funcionamento do inversor com a VCU via rede can, foi necessário ajustar novamente os parâmetros internos do inversor. Estes ajustes garantem que os comandos de referência (como o valor de torque solicitado) sejam aceitos via CAN. As configurações básicas incluem a seleção da taxa de comunicação, a habilitação do protocolo CAN e a definição de qual fonte será utilizada para os comandos e referências. Os ajustes são mostrados na figura 72.

Figura 71 – Ajuste de parâmetros para comunicação com a rede can.

P0202	Tipo de Controle	4: Encoder
P0204	Carrega/Salva Parâmetros	0: Sem Função
P0220	Seleção Fonte LOC/REM	1: Sempre REMOTO
P0221	Seleção Referência LOC	7: CAN
P0222	Seleção Referência REM	7: CAN
P0223	Seleção Giro LOC	10: CAN (AH)
P0224	Seleção Giro/Pára LOC	4: CAN
P0225	Seleção JOG LOC	5: CAN
P0226	Seleção Giro REM	10: CAN (AH)
P0227	Seleção Giro/Pára REM	4: CAN
P0228	Seleção JOG REM	5: CAN
P0229	Seleção Modo Parada	0: Por Rampa
P0700	Protocolo CAN Automotivo	1: CANBUS
P0701	Endereço CAN	63
P0702	Taxa Comunicação CAN	3: 250 Kbps
P0703	Reset de Bus Off CAN	1: Automático
P0705	Estado do Controlador CAN	0: Inativo
P0706	Telegramas CAN RX	0
P0707	Telegramas CAN TX	0
P0708	Contador de Bus Off	0
P0709	Mensagens CAN Perdidas	0
P1000	Estado da SoftPLC	3: Aplic. Parado
P1001	Comando para SoftPLC	1: Executa Aplic.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com isso, a VCU e o inversor estão prontos para a operação em conjunto com o powertrain e o resto do sistema em bancada.

Figura 72 – Montagem da VCU em bancada.

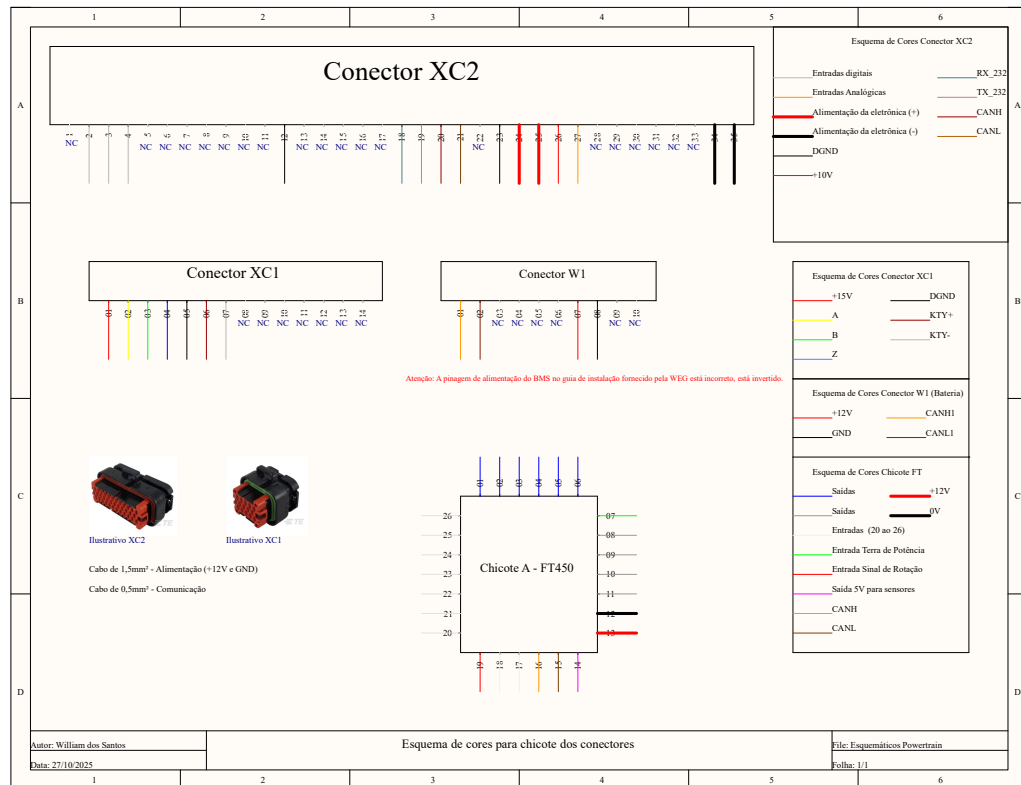


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4.7 Circuito e chicotes

Foram construídos 4 chicotes para a interligação de todos os componentes, cujo esquema é mostrado na figura 73.

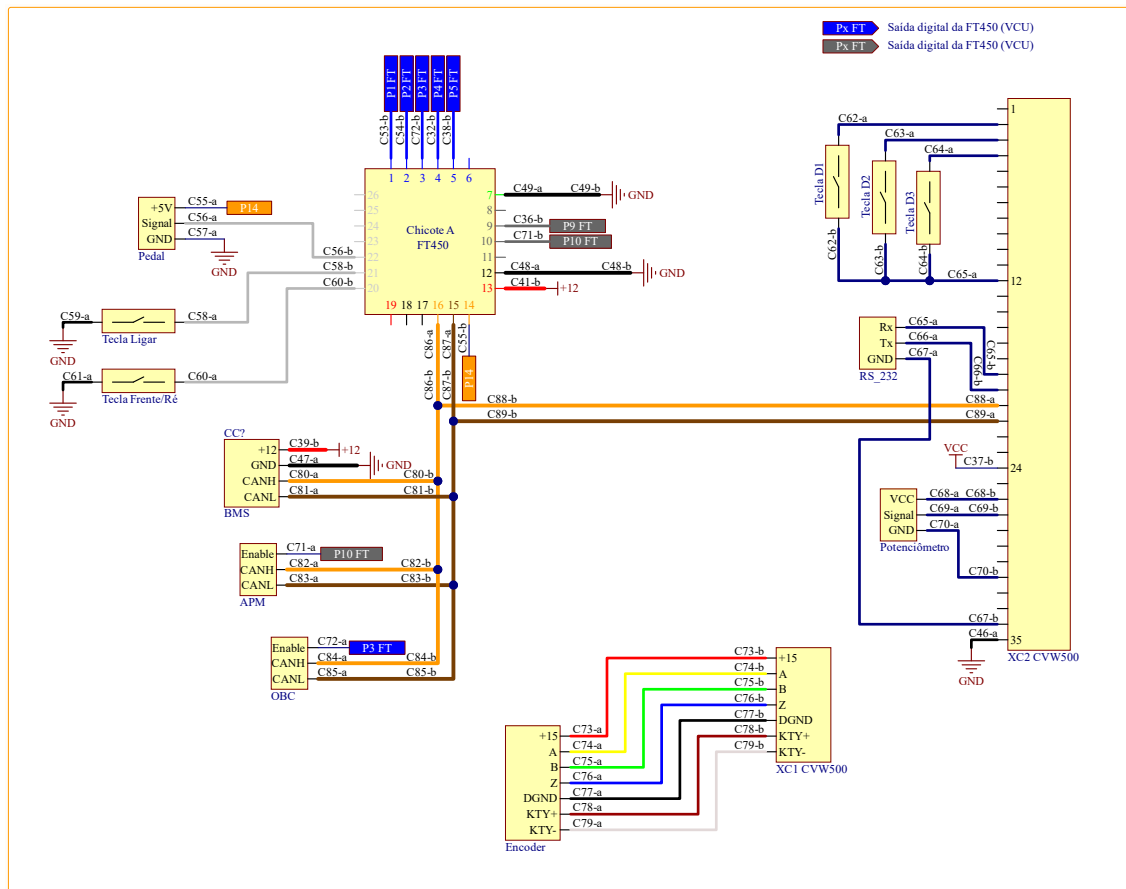
Figura 73 – Esquema de de chicotes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No setup atual foi instalado um sistema de controle duplo. A configuração principal utiliza a VCU FT450 para realizar um controle vetorial por torque, onde todos os comandos e o sinal de referência de torque são enviados via rede CAN a partir da leitura do pedal do acelerador. Uma configuração secundária foi mantida para fins de estudos e otimização do inversor, baseada em controle vetorial por velocidade, com comandos acionados através de entradas digitais e a referência de velocidade dada por uma porta analógica (potenciômetro). O esquema geral é mostrado na figura 74. O sistema está ajustado para operar prioritariamente com a VCU via CAN, e o controle por velocidade exigiria o reajuste dos parâmetros do inversor para receber comandos pelas respectivas portas digitais e analógica.

Figura 74 – Esquema elétrico dos comandos.

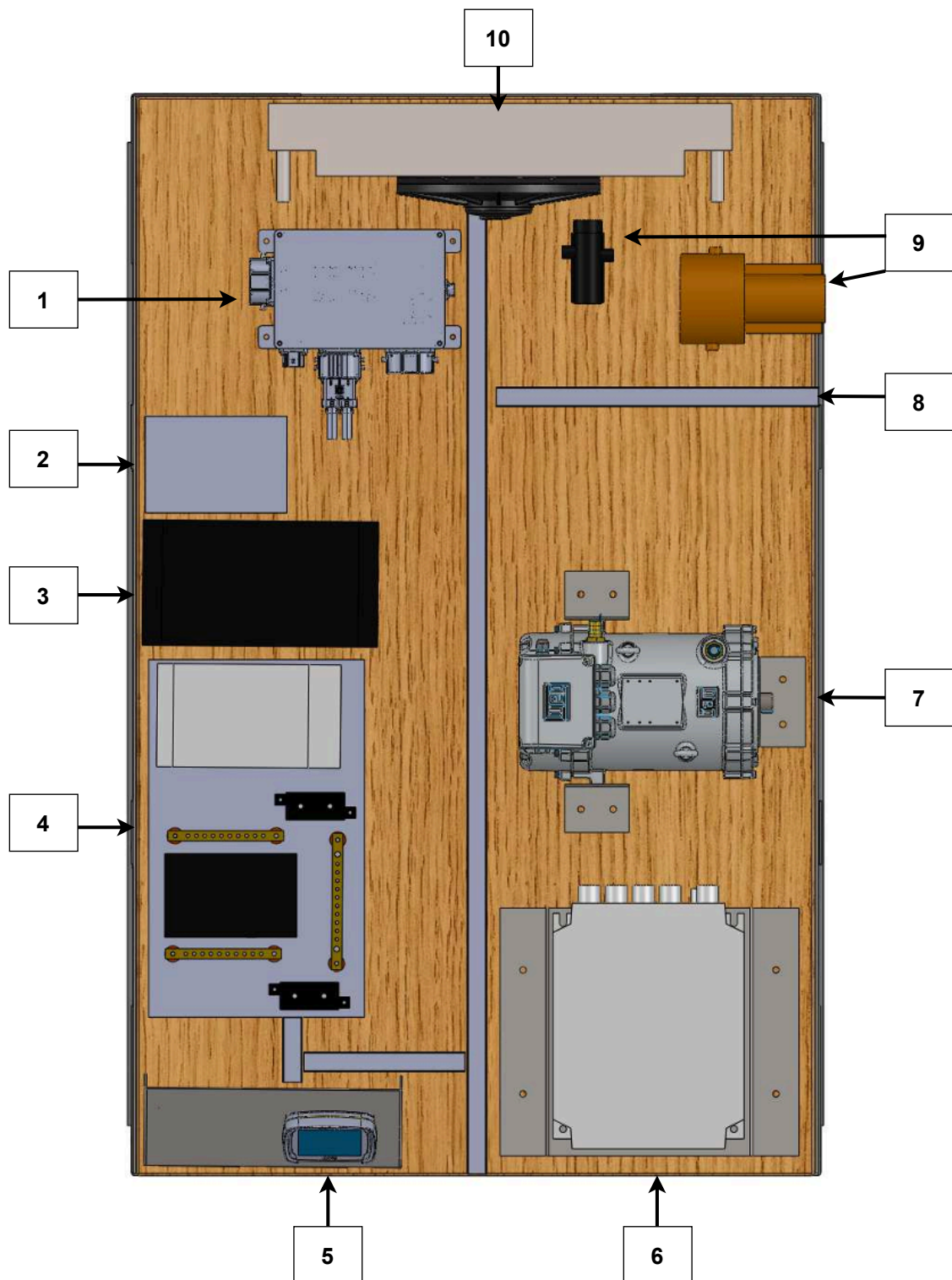


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Contudo, a integração e a parametrização dos componentes, especialmente a VCU e o inversor, foram concluídas, permitindo o comissionamento e o controle inicial do *powertrain* elétrico. O sistema está pronto para a etapa de testes. A configuração final e disposição dos equipamentos são ilustrados nas Figuras 75, 76 e 77.

Figura 75 – Modelagem geral - vista de cima.

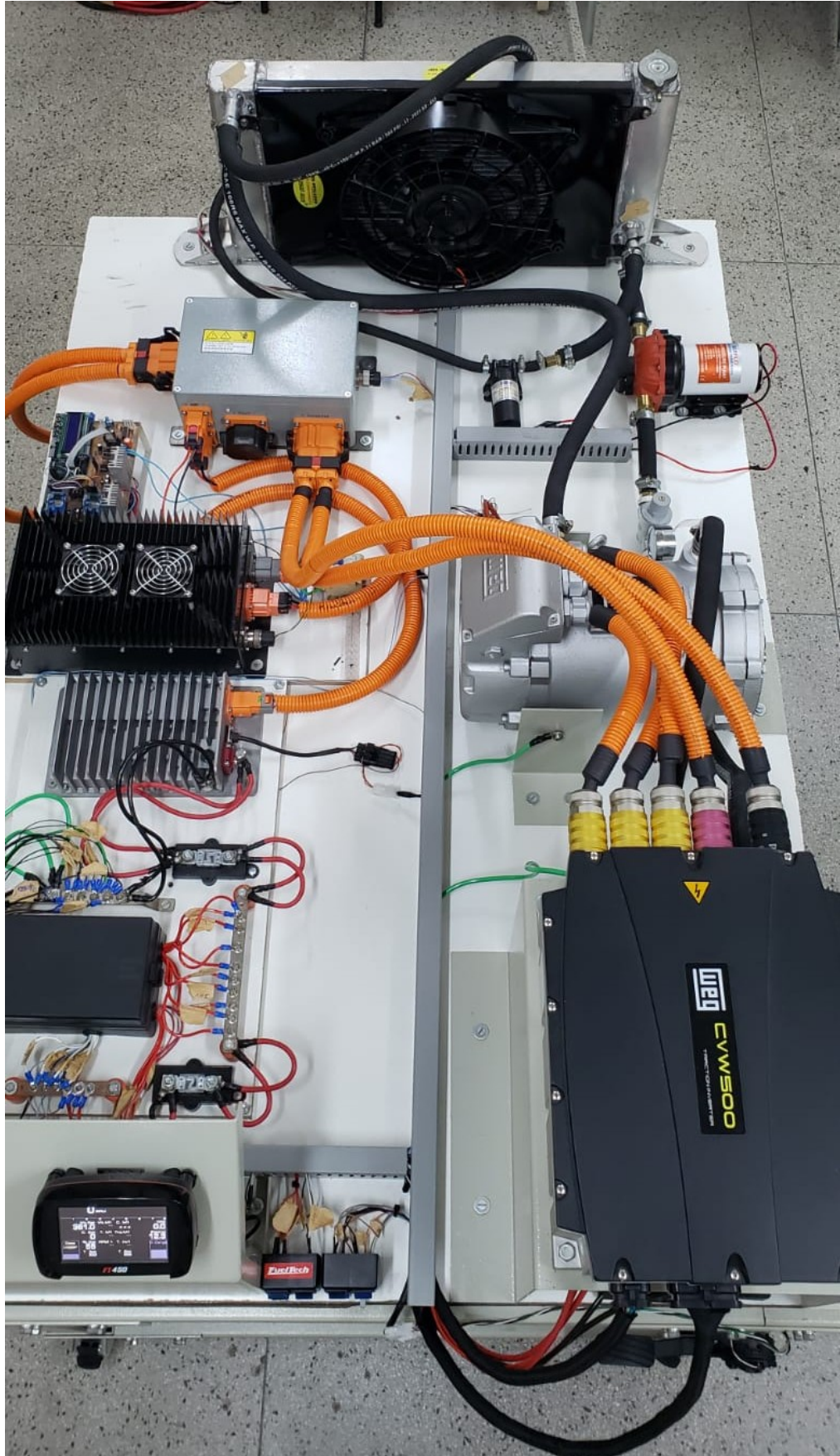


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Sendo:

- 1: PDU;
- 2: ECU auxiliar para comunicação da estação de recarga com o OBC);
- 3: Conversor OBC;
- 4: Montagem de BT
- 5: VCU FT450;
- 6: Parte superior: Inversor CVW500;
- 6: Parte inferior está alocado a bateria de BT;
- 7: Motor de indução trifásico;
- 8: Canaleta para passagem de cabos e rede can
- 9: Bomba hidráulica;
- 10: Radiador com ventilação forçada.

Figura 76 – Montagem geral - vista de cima.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 77 – Montagem final da bancada de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5 TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesse capítulo será abordado os testes realizados em bancada com o intuito de validar o sistema do *powertrain* elétrico e a integração dos dispositivos que posteriormente serão implementados na Van.

5.1 TESTES COM ENCODER INCREMENTAL

O motor em questão é equipado com um encoder incremental de 256 pulsos por rotação (PPR). Esse tipo de sensor gera sinais digitais proporcionais à rotação do eixo, permitindo determinar a velocidade e o sentido de giro. O encoder possui três canais principais:

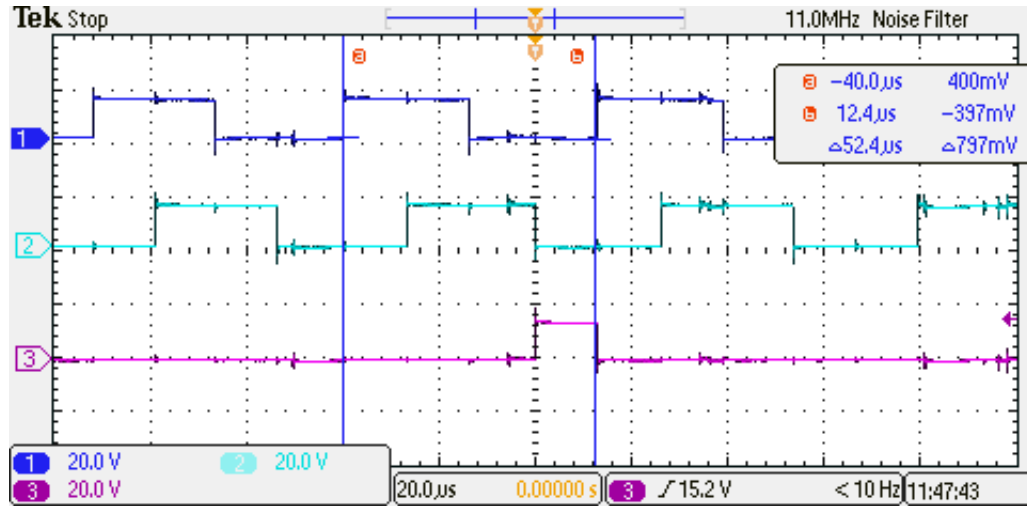
- Canal A e Canal B: geram ondas quadradas defasadas de 90° , cuja relação de fase indica o sentido de rotação (se A adianta B, o movimento é horário; se atrasa, é anti-horário);
- Canal Z: fornece um pulso de referência por rotação completa, utilizado para sincronismo e posicionamento.

A alimentação do encoder foi realizada externamente, por meio de uma fonte CC ajustada para 15 V. As medições foram conduzidas com o auxílio de um osciloscópio, utilizando três ponteiros conectadas aos canais A, B e Z. O controle do motor foi efetuado em modo V/F, que dispensa o uso do encoder para o funcionamento, permitindo avaliar seus sinais de forma isolada.

Durante os testes, foram realizadas medições simultâneas pelo software WPS e por um tacômetro óptico diretamente no rotor do motor, com o objetivo de comparar os valores obtidos por diferentes métodos. O primeiro ensaio foi realizado na rotação nominal do motor e no sentido horário, seguido de testes com metade da rotação nominal e, posteriormente, no sentido anti-horário, para verificação da coerência dos sinais.

Na Figura 78, observam-se as formas de onda registradas pelo osciloscópio: o canal A (amarelo), o canal B (azul) e o canal Z (lilás). Nota-se que a defasagem entre A e B confirma o sentido de rotação esperado. Além disso, foi possível determinar a frequência do sinal gerado.

Figura 78 – Leitura dos sinais do encoder em rotação nominal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A partir da leitura de Δ observado no canal A, conclui-se:

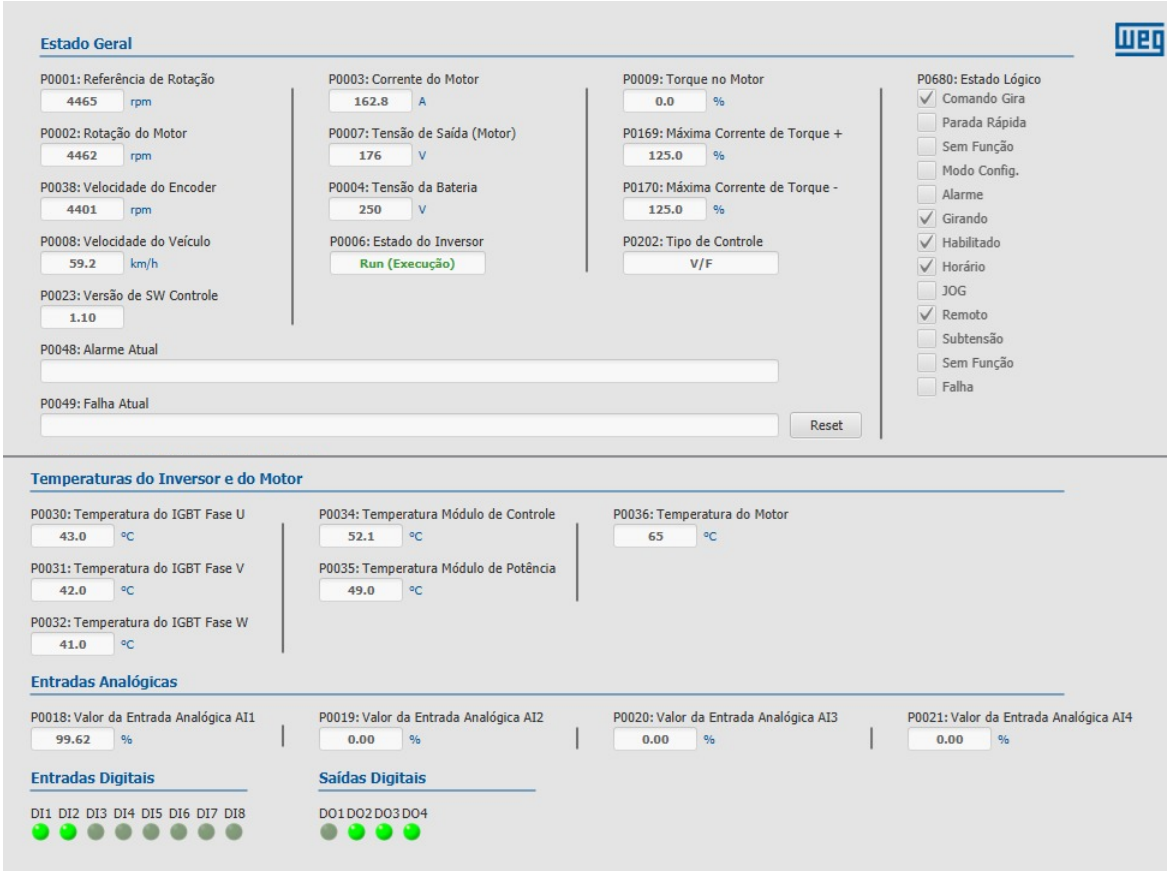
$$f = \frac{1}{52,4\mu} = 19084Hz \quad (1)$$

Sabendo-se que o encoder possui 256 PPR, a rotação do motor é calculada pela expressão:

$$Rota_{RPM} = \frac{f}{PPR} \cdot 60 = \frac{19084}{256} \cdot 60 \approx 4472rpm \quad (2)$$

O valor obtido está bem próximo com a rotação imposta ao motor, como evidenciado nas Figuras 79 e 80, que mostram as leituras realizadas pelo software WPS e pelo tacômetro, respectivamente.

Figura 79 – Leitura realizada através do software WPS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

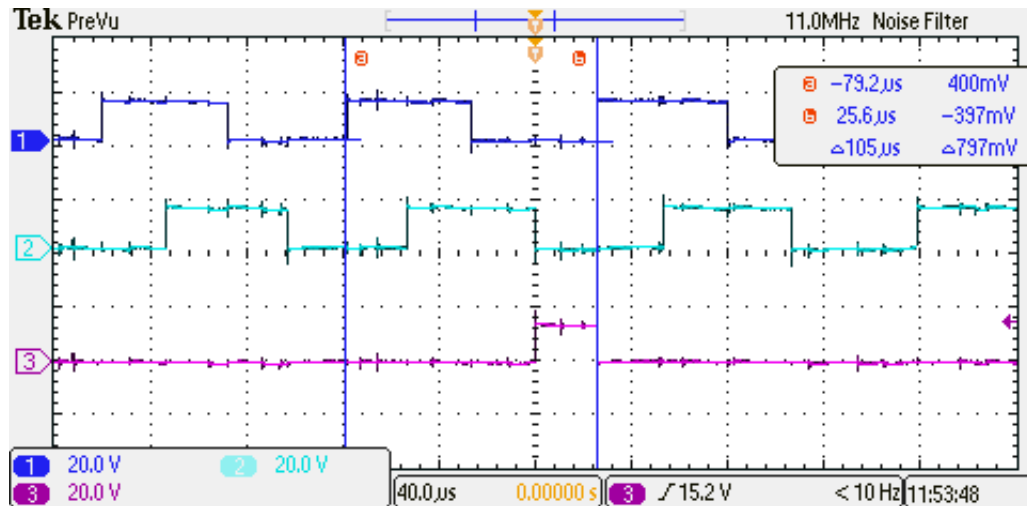
Figura 80 – Leitura realizada com tacômetro diretamente no rotor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em seguida, o teste foi repetido com o motor operando na metade da rotação nominal (aproximadamente 2240 RPM). A Figura 81 apresenta os sinais medidos no osciloscópio.

Figura 81 – Leitura dos sinais do encoder com metade da rotação nominal.



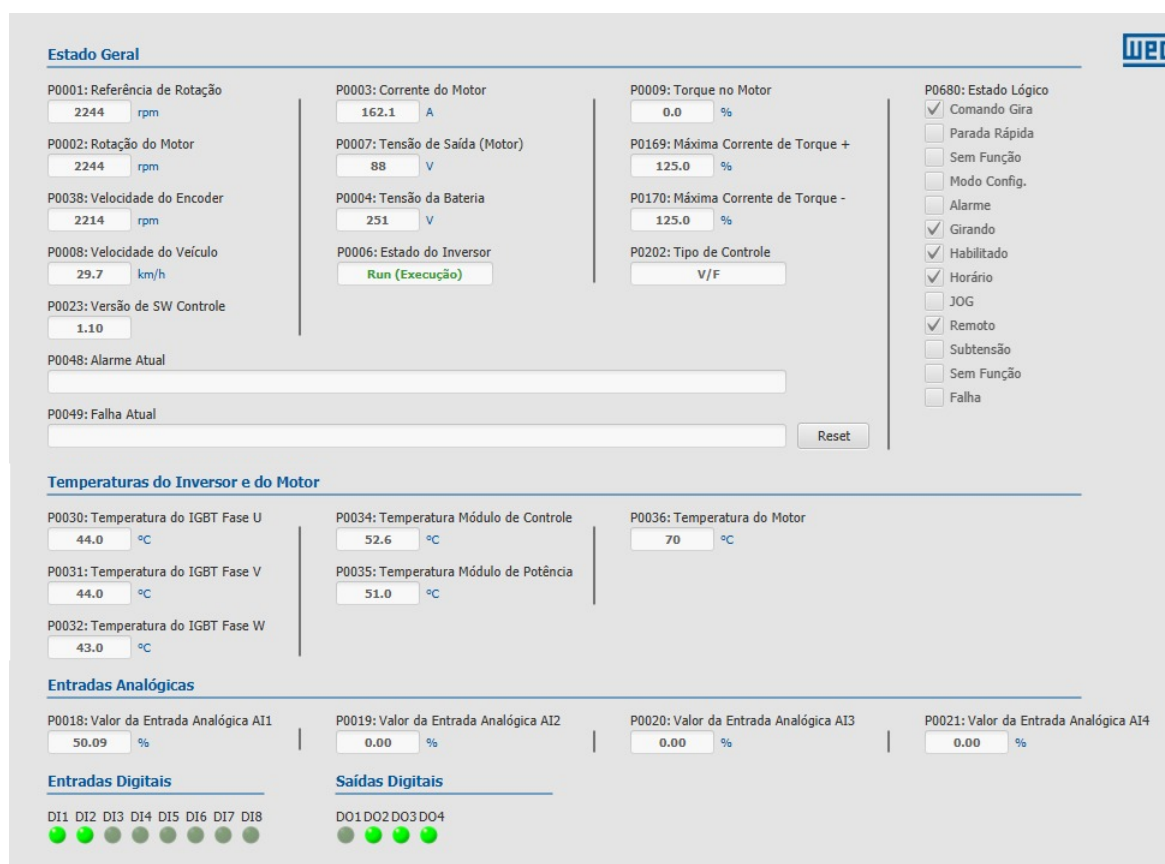
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A partir das medições, determina-se a rotação do motor

$$Rota_{RPM} = \frac{f}{PPR} \cdot 60 = \frac{9524}{256} \cdot 60 \approx 2232RPM \quad (3)$$

O resultado foi coerente com os valores obtidos no WPS e no tacômetro, conforme mostrado nas Figuras 82 e 83.

Figura 82 – Leitura realizada no software WPS.



The screenshot displays the WPS software interface, which is organized into several sections for monitoring and controlling a motor system. The top right corner features the 'WEG' logo.

Estado Geral (General Status):

- P0001: Referência de Rotação** (Reference Rotation): 2244 rpm
- P0002: Rotação do Motor** (Motor Rotation): 2244 rpm
- P0038: Velocidade do Encoder** (Encoder Velocity): 2214 rpm
- P0008: Velocidade do Veículo** (Vehicle Velocity): 29.7 km/h
- P0023: Versão de SW Controle** (Control SW Version): 1.10
- P0003: Corrente do Motor** (Motor Current): 162.1 A
- P0007: Tensão de Saída (Motor)** (Output Voltage (Motor)): 88 V
- P0004: Tensão da Bateria** (Battery Voltage): 251 V
- P0006: Estado do Inversor** (Inverter Status): Run (Execução)
- P0009: Torque no Motor** (Torque on Motor): 0.0 %
- P0169: Máxima Corrente de Torque +** (Maximum Torque Current +): 125.0 %
- P0170: Máxima Corrente de Torque -** (Maximum Torque Current -): 125.0 %
- P0202: Tipo de Controle** (Control Type): V/F
- P0680: Estado Lógico** (Logical Status):
 - ☒ Comando Gira
 - ☐ Parada Rápida
 - ☐ Sem Função
 - ☐ Modo Config.
 - ☐ Alarme
 - ☒ Girando
 - ☒ Habilitado
 - ☒ Horário
 - ☐ JOG
 - ☒ Remoto
 - ☐ Subtensão
 - ☐ Sem Função
 - ☐ Falha
- P0048: Alarme Atual** (Current Alarm): [Empty field]
- P0049: Falha Atual** (Current Fault): [Empty field]
- Reset** button

Temperaturas do Inversor e do Motor (Inverter and Motor Temperatures):

- P0030: Temperatura do IGBT Fase U** (IGBT Phase U Temperature): 44.0 °C
- P0031: Temperatura do IGBT Fase V** (IGBT Phase V Temperature): 44.0 °C
- P0032: Temperatura do IGBT Fase W** (IGBT Phase W Temperature): 43.0 °C
- P0034: Temperatura Módulo de Controle** (Control Module Temperature): 52.6 °C
- P0035: Temperatura Módulo de Potência** (Power Module Temperature): 51.0 °C
- P0036: Temperatura do Motor** (Motor Temperature): 70 °C

Entradas Analógicas (Analog Inputs):

- P0018: Valor da Entrada Analógica AI1** (AI1 Value): 50.09 %
- P0019: Valor da Entrada Analógica AI2** (AI2 Value): 0.00 %
- P0020: Valor da Entrada Analógica AI3** (AI3 Value): 0.00 %
- P0021: Valor da Entrada Analógica AI4** (AI4 Value): 0.00 %

Entradas Digitais (Digital Inputs):

- DI1 DI2 DI3 DI4 DI5 DI6 DI7 DI8: [8 indicator lights, all green]

Saídas Digitais (Digital Outputs):

- DO1 DO2 DO3 DO4: [4 indicator lights, all green]

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

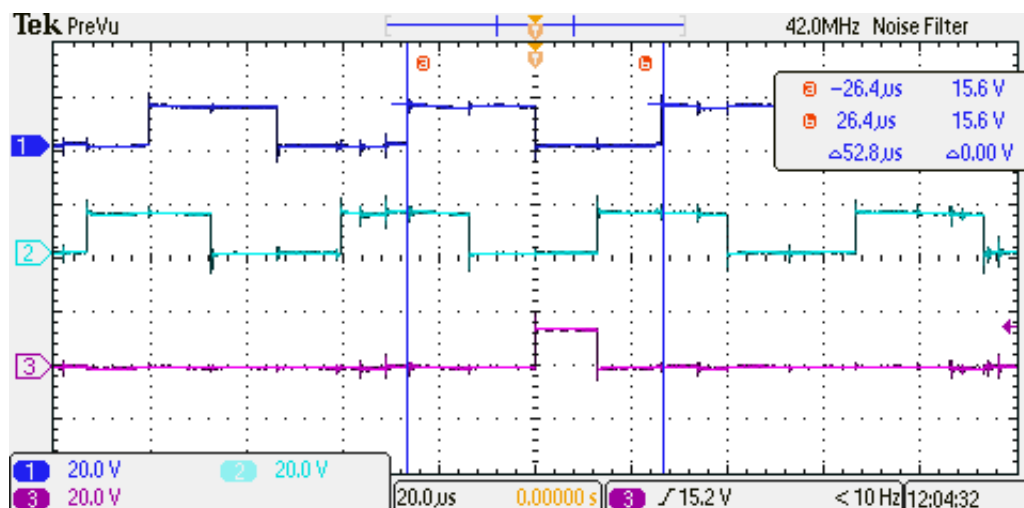
Figura 83 – Leitura realizada com tacômetro diretamente no rotor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por fim, foi testado o sentido de rotação anti-horário. Na Figura 84, observa-se que os canais A e B permanecem defasados, porém com a inversão de fase característica desse sentido de giro, confirmando o correto funcionamento do encoder em ambas as direções.

Figura 84 – Leitura dos sinais do encoder em rotação nominal com sentido de giro anti-horário.



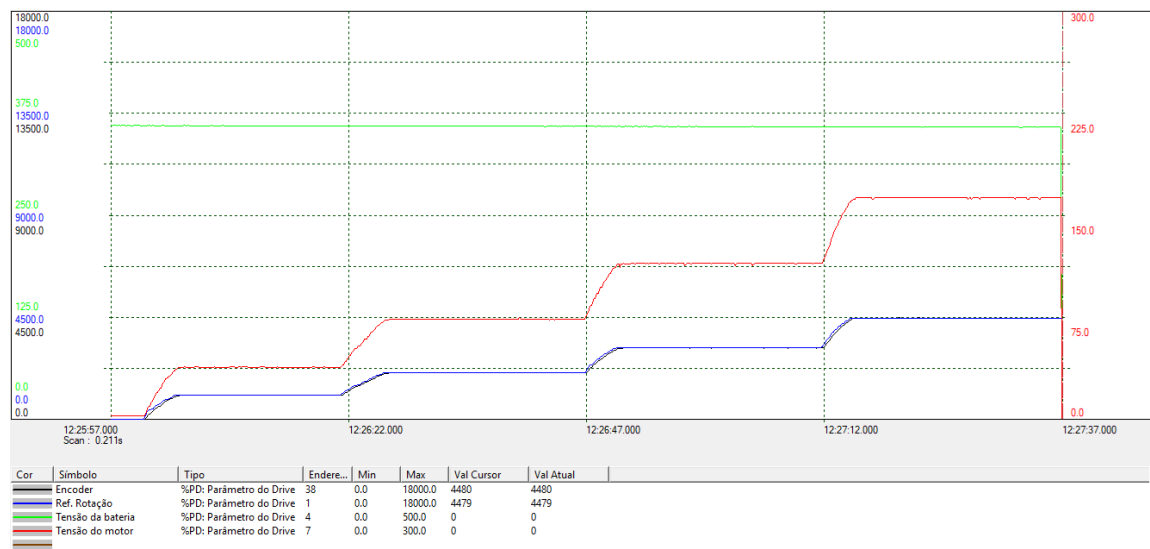
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2 TESTES REALIZADOS COM CONTROLE DE VELOCIDADE ATRAVÉS DO INVERSOR

Inicialmente, foram realizados testes para validar o controle e o funcionamento do inversor através do controle por velocidade. O controle foi acionado através da variação de um valor de referência por um potenciômetro em uma porta analógica, o que resultava na alteração da velocidade do motor.

Na Figura 85, é possível observar a resposta do motor a variações progressivas na referência de velocidade. A curva azul representa o sinal de referência de rotação (dada pelo potenciômetro), e a curva preta mostra a rotação do motor (Encoder), que segue a referência. A curva verde representa a tensão da bateria, que se mantém estável próxima ao seu valor nominal de 358,4 Vcc. A curva vermelha, que é a tensão de saída do motor, varia de forma proporcional à rotação. Atingindo a rotação nominal (4480 rpm), a tensão de saída do motor também alcança seu valor nominal de 165 V, conforme previsto pelas especificações do motor.

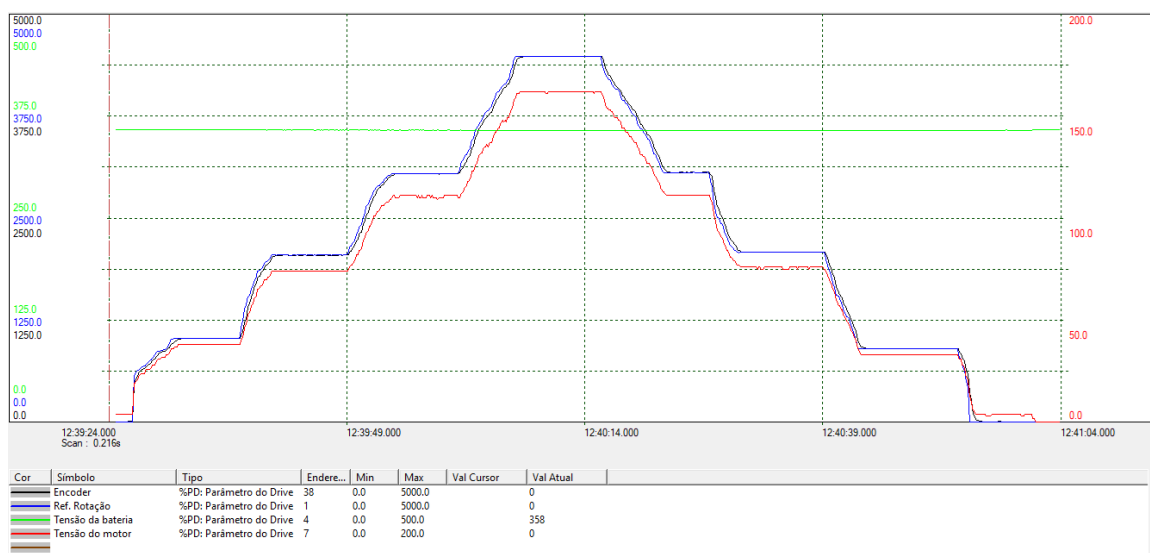
Figura 85 – Teste 1 do controle variando a velocidade a cada 1000 rpm até chegar na rotação nominal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

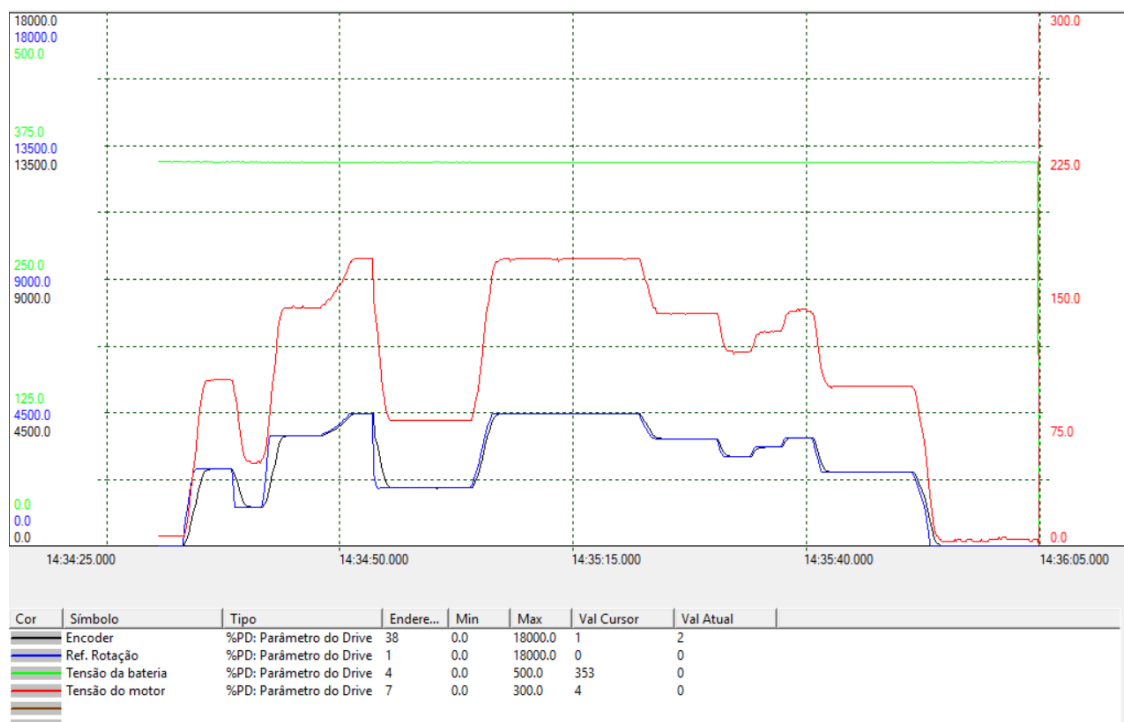
Na Figura 86 ilustra um teste de aceleração e desaceleração suave do motor, demonstrando a resposta transitória do controle de velocidade. Já a figura 87 apresenta testes onde o valor de referência é variado de forma mais abrupta, simulando mudanças rápidas na demanda de velocidade e confirmando a estabilidade e a coerência da resposta do controle vetorial.

Figura 86 – Teste 2 do controle aceleração e desaceleração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 87 – Teste 3 do controle variando a velocidade de forma abrupta.



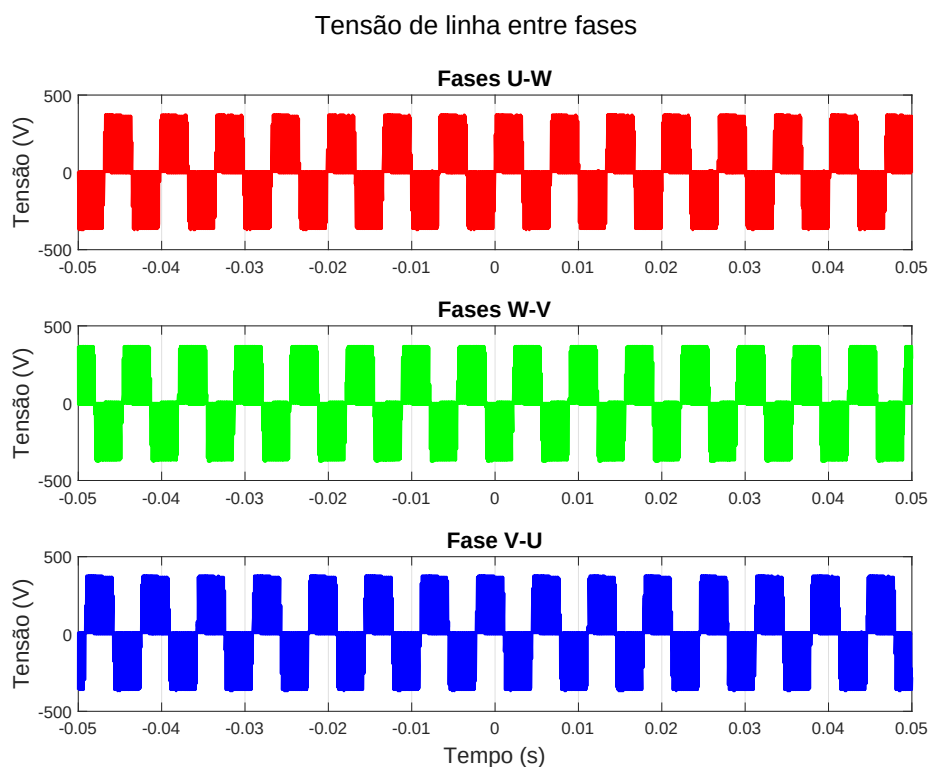
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em seguida, os sinais de tensão e corrente fornecidos ao motor foram verificados com o auxílio de um osciloscópio. Nas figuras 88 e 89, a tensão de linha entre as fases é visualizada com o motor operando na condição de rotação nominal.

- A figura 88 (plotada no Matlab) mostra as tensões U-W, W-V e V-U, confirmando a forma de onda modulada.
- A figura 89 mostra o sinal capturado no osciloscópio com um filtro, resultando em uma onda mais próxima da senoidal (que é o resultado da filtragem da onda modulada quadrada), onde o valor RMS de 166V confirma a tensão nominal do motor.

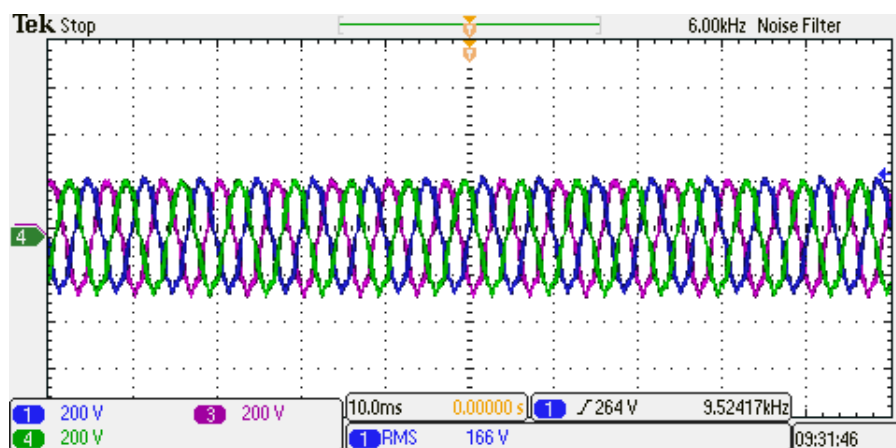
Na sequência foram realizados os mesmos testes mas com o motor operando com metade da rotação nominal (aproximadamente 2240 rpm). Os resultados apresentados nas figuras 90 e 91, confirmam que a tensão caiu em aproximadamente metade da tensão nominal, como esperado.

Figura 88 – Tensão de linha entre as fases plotado no matlab através dos pontos capturados no osciloscópio com motor operando em rotação nominal.



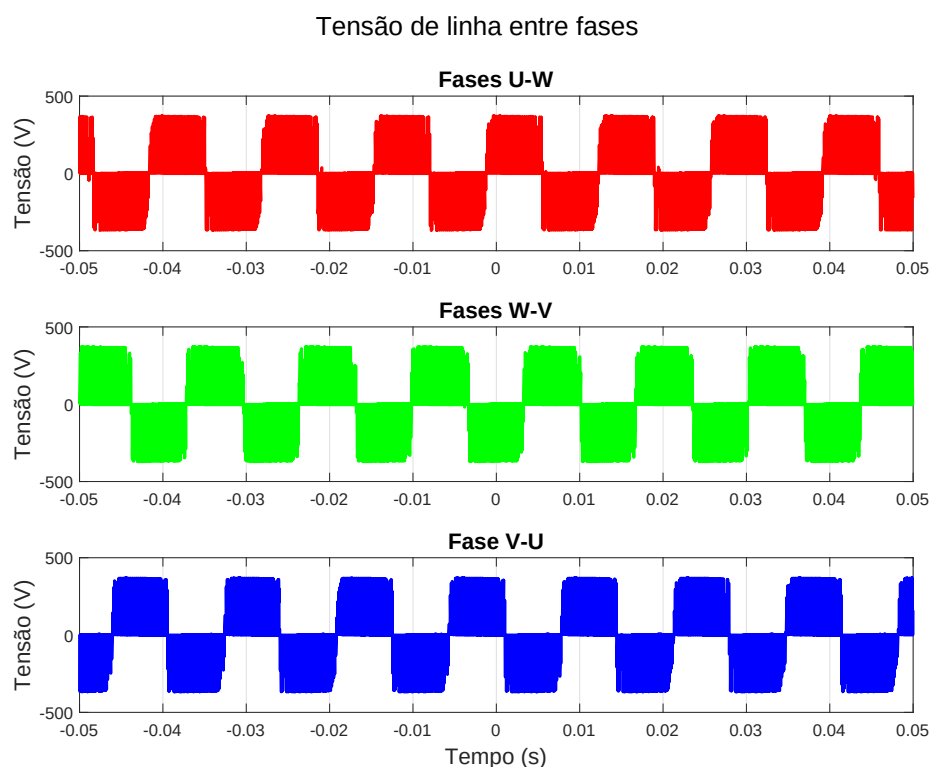
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 89 – Tensão de linha entre as fases utilizando filtro do osciloscópio para suavização com motor operando em rotação nominal.



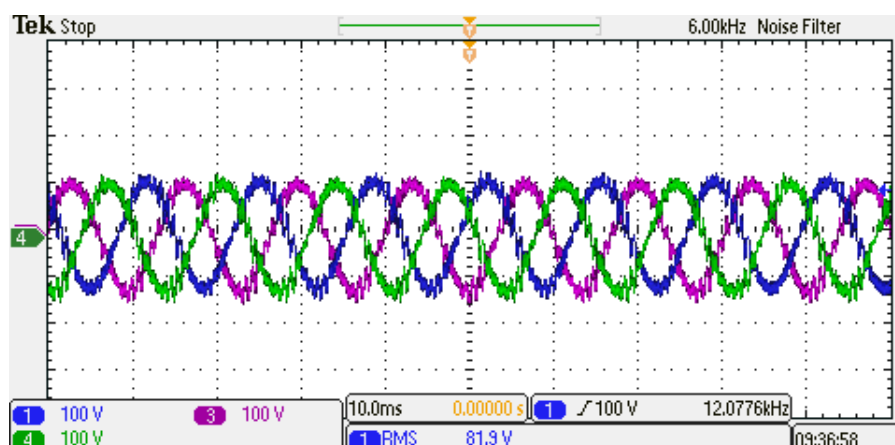
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 90 – Tensão de linha entre as fases plotado no matlab através dos pontos capturados no osciloscópio com motor operando com metade da rotação nominal.



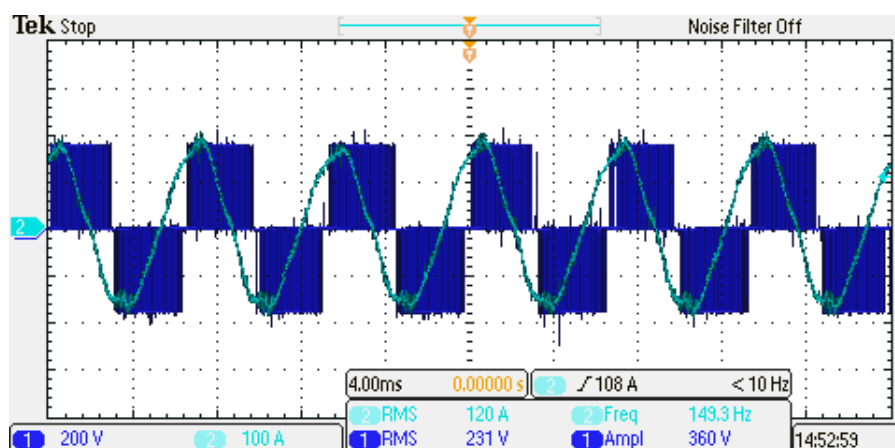
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 91 – Tensão de linha entre as fases utilizando filtro do osciloscópio para suavização com motor operando com metade da rotação nominal.



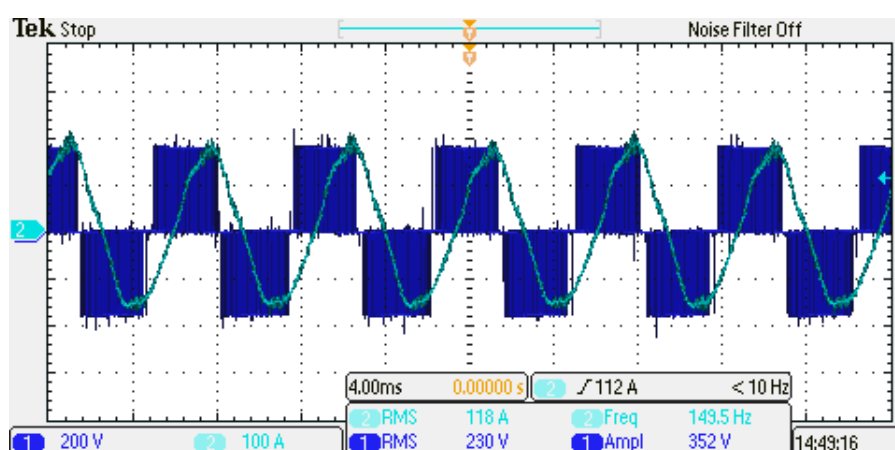
Para a validação da corrente, foi aferida a defasagem entre a tensão de linha e a corrente nas fases. Nas figuras 92, 93 e 94, é possível visualizar a defasagem de aproximadamente 120° entre as correntes das fases, o que é a característica esperada para um motor de indução trifásico.

Figura 92 – Tensão entre as fases V e W e corrente na fase W.



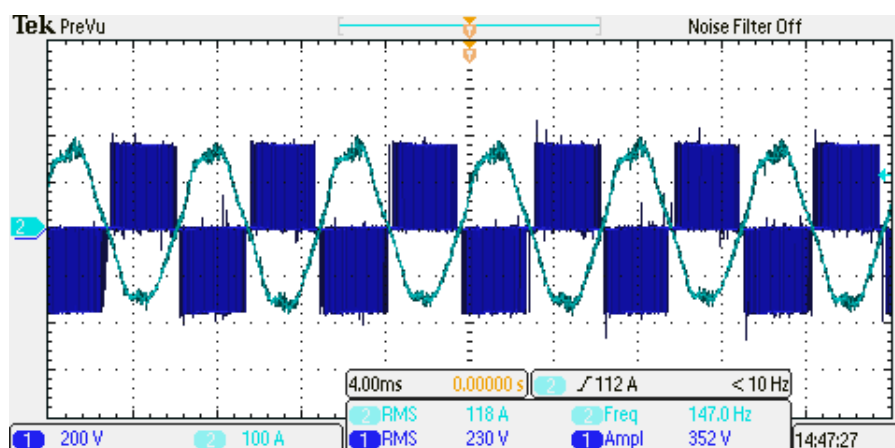
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 93 – Tensão entre as fases V e W e corrente na fase V.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

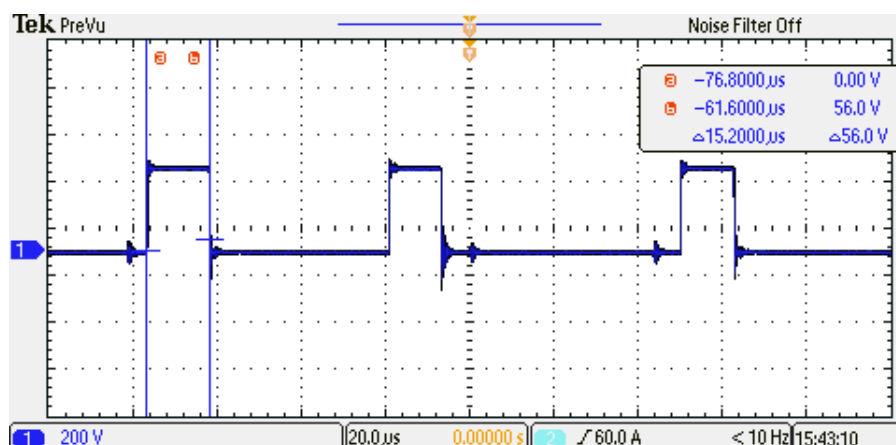
Figura 94 – Tensão entre as fases V e W e corrente na fase U.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

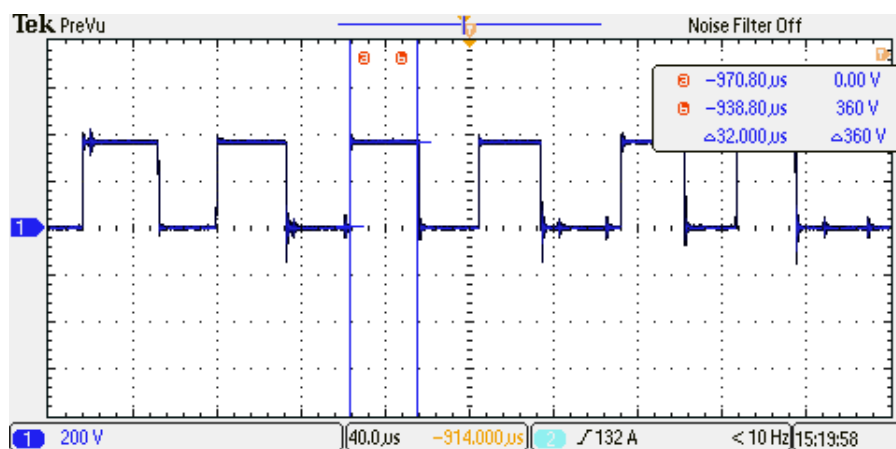
As figuras 95 e 96 ilustram a modulação PWM do inversor. Com metade da rotação nominal o duty cycle é aproximadamente metade de quando o motor está operando em rotação nominal, o que é o comportamento esperado para manter a relação V/f constante.

Figura 95 – Modulação PWM com motor em metade da rotação nominal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 96 – Modulação PWM com motor em rotação nominal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3 TESTES REALIZADOS COM A VCU

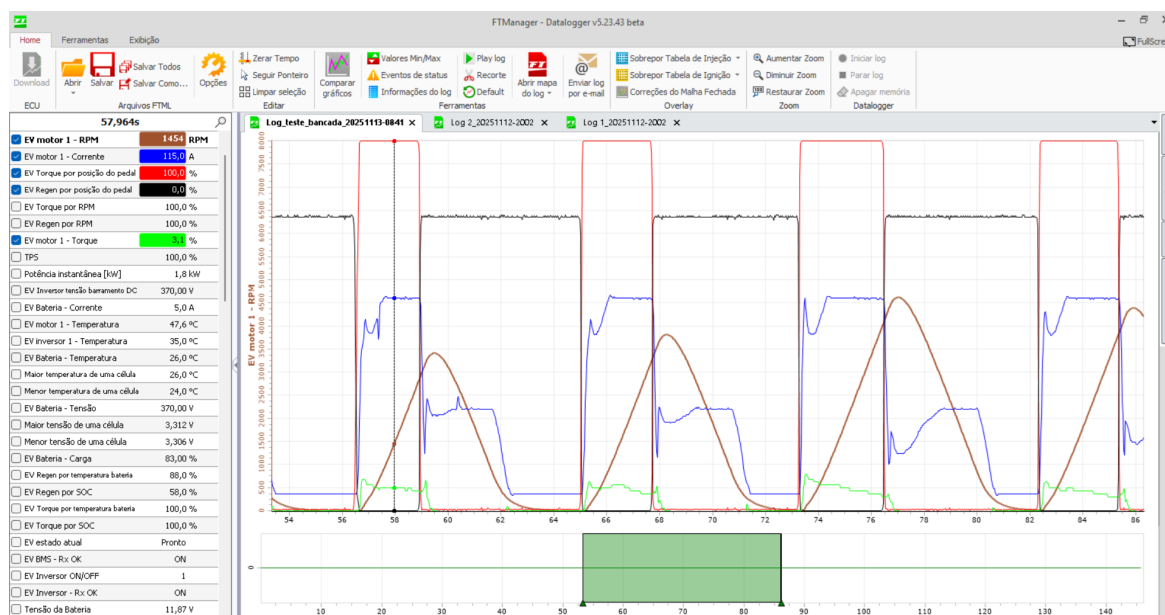
Foram realizados testes iniciais com a FT450 para validar a configuração das curvas de torque de tração e freio regenerativo. Devido à operação do motor estar a vazio, a coleta de dados ficou limitada, pois não houve a necessidade de o motor entregar seu torque máximo para vencer uma carga significativa.

O comportamento do powertrain ao longo da operação é monitorado e registrado através do datalogger da VCU. Para garantir a relevância da análise, a concentração de dados focou nas operações de envio de torque e freio regenerativo, validando sua conformidade com as curvas de

operação previamente configuradas e mostradas no capítulo anterior, principalmente nas figuras 56, 57, 60 e 61.

A figura 97 exibe um registro de operação onde o pedal do acelerador foi acionado a 100% (solicitação máxima de torque). O torque entregue ao motor é visualizado através da curva destacada em verde, correspondendo a 3,1% do torque nominal de 7,17 kgfm do motor.

Figura 97 – Registro de dados da operação, evidenciando o comando de torque com o motor a vazio e a limitação do torque entregue pela rampa de aceleração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O torque entregue ao motor foi limitado pela rampa de aceleração configurada no inversor. Essa rampa foi implementada justamente para prevenir que o motor acelerasse de forma excessivamente brusca. Dada a baixa inércia do conjunto em bancada e a ausência de carga, o que causaria falhas por sobrecorrente ou sobrevelocidade. O torque de 3,1% foi, portanto, o valor necessário para vencer a inércia e acelerar o motor dentro da taxa permitida pela rampa.

Após a desativação do acelerador (pedal em 0%), o freio regenerativo é acionado. A figura 98 ilustra esse processo. A confirmação da regeneração é visualizada pelo torque negativo, destacado em verde.

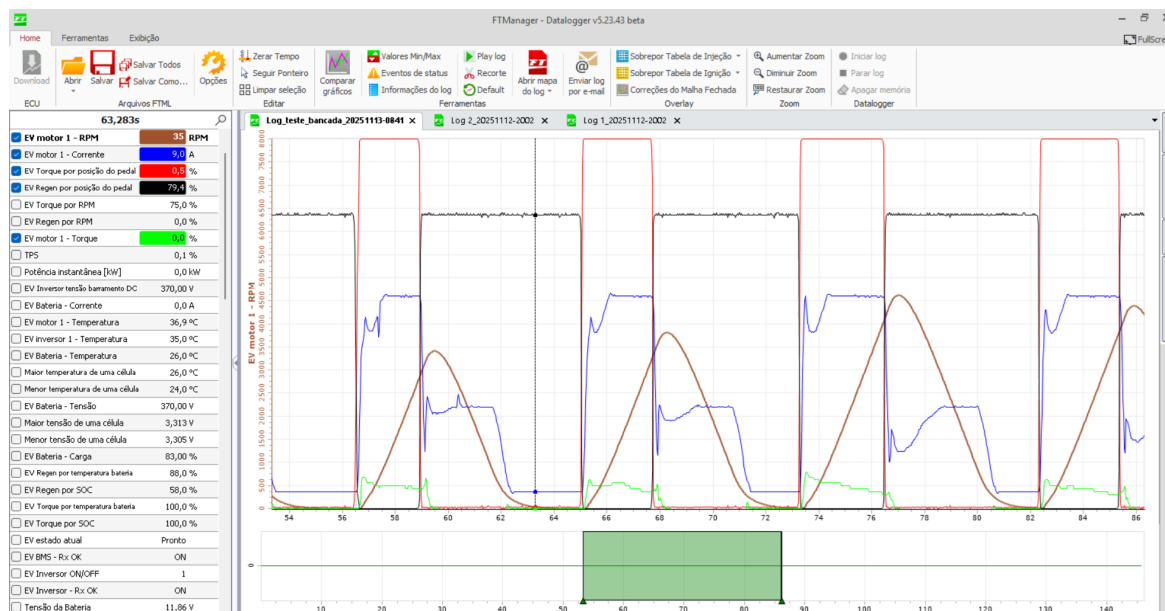
A figura 99 confirma o limite de segurança configurado no mapa de regeneração por RPM (figura 61). Quando a rotação do motor está inferior a 1000 rpm, o torque de regeneração é zero. Neste caso, o inversor cessa o envio de torque negativo para a bateria, garantindo que a regeneração seja desativada em baixas velocidades.

Figura 98 – Registro de dados da operação, ilustrando a transição do torque de tração para o freio regenerativo após a desativação do comando do acelerador.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 99 – Registro de dados da operação, demonstrando a desativação do freio regenerativo em conformidade com o mapa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além das curvas de operação, o log de dados permite visualizar diversas outras variáveis do sistema, como temperatura das células da bateria, Estado de Carga (SOC) e o status ativo do inversor.

A figura 100 exibe o Dashboard da FT450 em operação, permitindo a visualização em tempo real dos parâmetros configurados. As variáveis são detalhadas na tabela 15.

Figura 100 – Dashboard da FT450 com sistema em operação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 15 – Descrição dos Parâmetros Monitorados no Dashboard da FT450 (Sistema em Operação).

Campo no Dashboard	Variável Monitorada	Unidade/Descrição
Vit. Bat	Tensão da Bateria	Volt (V)
C. Bat	Corrente da Bateria	Ampere (A)
Vit. M1	Tensão do Motor 1	Volt (V)
C. M1	Corrente do Motor 1	Ampere (A)
TPS	Sensor de Posição do Acelerador	Percentual (%)
EV Marcha	Sentido de Giro/Marcha	Frente (D) / Ré (R)
% Bat	Estado de Carga da Bateria (SOC)	Percentual (%)
T. Bat	Temperatura da Bateria	Celsius (°C)
T. M1	Temperatura do Motor	Celsius (°C)
T. Inv1	Temperatura do Inversor	Celsius (°C)
EV Potência	Potência Elétrica de Tração/Regen	Quilowatts (kW)
CCL Bateria	Limite Máximo de Corrente de Carga (Charging Current Limit)	Ampere (A) (Regeneração)
DCL Bateria	Limite Máximo de Corrente de Descarga (Discharging Current Limit)	Ampere (A) (Tração/Torque)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.4 CONSIDERAÇÕES

A conclusão dos ensaios em bancada, conforme detalhado neste capítulo, permitiu a confirmação preliminar da integração e da coerência funcional entre os componentes do *powertrain*. A comunicação via CAN entre a VCU FT450 e o inversor foi estabelecida com êxito, demonstrando que os comandos de tração e regeneração definidos nos mapas são consistentemente interpretados pelo inversor. Os testes de controle de velocidade confirmaram a observância do princípio da relação V/f constante na operação do motor, indicando que a proporcionalidade entre a tensão de saída e a frequência de rotação foi mantida.

Ademais, a lógica de controle da VCU foi validada em ambiente sem carga, onde o sistema demonstrou capacidade de gerenciar o torque de vazio e de acionar e desativar o freio regenerativo de forma previsível e segura, seguindo as estratégias de limitação configuradas.

Em suma, esta fase de testes validou a integração lógica, elétrica e de segurança do sistema em condições controladas. Contudo, para que a calibração do sistema se adeque de maneira otimizada com as exigências dinâmicas e de inércia da carga real (a van), e para que se alcance a máxima eficiência do veículo em operação, torna-se fundamental que os ajustes finos dos mapas de controle sejam realizados em um dinamômetro, simulando o comportamento do veículo sob carga total.

Para uma demonstração visual da operação da bancada e dos testes realizados, um vídeo está disponível para visualização no seguinte endereço: Vídeo operação bancada.

6 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu o estudo aprofundado, a implementação e a validação em bancada da arquitetura de controle e powertrain elétrico para a conversão de uma van da UDESC em um veículo híbrido *Through-The-Road*. Durante o desenvolvimento, foi possível compreender a fundo as exigências de controle dinâmico e os princípios de eletrônica de potência aplicados ao *powertrain*. Além disso, foram projetados e implementados todos os sistemas periféricos indispensáveis à operação segura e funcional do conjunto, como o sistema de arrefecimento de duas malhas e o circuito de distribuição de potência.

A fundamentação teórica desenvolvida auxiliou na compreensão das topologias de veículos híbridos, culminando na seleção do arranjo TTR e na análise dos componentes críticos do VE, como o motor de indução, o inversor CVW500 e o pack de baterias. Também possibilitou a descrição detalhada das curvas de torque e regeneração necessárias para o controle dinâmico do motor elétrico.

O desenvolvimento do projeto foi descrito nos Capítulos 3 e 4, nos quais é detalhado o processo de montagem da bancada que integra o motor, o inversor, o pack de baterias e os módulos OBC/APM. Foi detalhada a parametrização do inversor CVW500 e, principalmente, a configuração da VCU FT450 como unidade de controle do veículo. Este processo envolveu a comunicação CAN, a calibração de sensores e o ajuste dos mapas de demanda de torque e freio regenerativo.

No Capítulo 5, foram descritos os testes realizados para validação da integração e do controle. As análises confirmaram a coerência dos princípios elétricos, como a proporcionalidade V/f na operação do inversor e a correta resposta da lógica de controle da VCU. Os logs de dados demonstraram que o sistema respeita os comandos de tração e ativa os mecanismos de segurança (limitação de torque a vazio e corte de regeneração em baixa RPM).

A etapa em bancada valida a segurança e a integração lógica e elétrica de todo o powertrain. Como continuidade deste trabalho, sugere-se a instalação física e o comissionamento do sistema na van e o ajuste fino dos mapas de torque e regeneração em dinamômetro. Destaca-se também a necessidade de desenvolver e implementar a lógica de coordenação do sistema híbrido TTR (coexistência entre o motor a combustão e o motor elétrico), estabelecendo a melhor estratégia de partição de potência.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR IEC 61851-1. **ABNT NBR IEC 61851-1:2021 — Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos – Parte 1: Requisitos gerais**. 2021. <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/33080/abnt-nbriec61851-1-sistema-de-recarga-condutiva-para-veiculos-eletricos-parte-1-requisitos-gerais>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 26.
- ABNT NBR IEC 62196-2. **NBR IEC 62196-2:2021 - Conectores para veículos elétricos**. 2021. <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/33704/abnt-nbriec62196-2-plugues-tomadas-tomadas-moveis-para-veiculo-eletrico-e-plugues-fixos-para-veiculos>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 26.
- AGARWAL, Vipul; DEV, Mayank. Introduction to hybrid electric vehicles: State of art. In: **2013 Students Conference on Engineering and Systems (SCES)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. Citado na página 20.
- ARANZABAL, Itxaso et al. Comparison of the heat transfer capabilities of conventional single- and two-phase cooling systems for an electric vehicle igbt power module. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 34, n. 5, p. 4185–4194, 2019. Citado na página 33.
- BELLUR, Dakshina M.; KAZIMIERCZUK, Marian K. Dc-dc converters for electric vehicle applications. In: **2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 286–293. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- BLAABJERG, Frede et al. Reliability of power electronic systems for ev/hev applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 6, p. 1060–1076, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- BLOOMBERGNEF. **Média dos preços de baterias de íons de lítio (pacote e célula), 2013-2024**. 2024. Dados citados em diversos artigos e relatórios. Consulte o relatório anual da BloombergNEF sobre preços de baterias. Gráfico. Preços em USD/kWh. Inclui dados de 343 pontos referentes a carros de passeio, ônibus, veículos comerciais e armazenamento estacionário. Os preços históricos foram atualizados para refletir os preços reais em dólares em 2024. Citado na página 25.
- CAO, Zhi et al. An overview of electric motors for electric vehicles. In: **2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 17, 31 e 33.
- CASSANI, Uilli. **User Manual: Installation guide of Electric Powertrain MES-DEA**. [S.l.], 2018. 72 p. Citado na página 50.
- CHAU, K.T; WONG, Y.S. Overview of power management in hybrid electric vehicles. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 15, p. 1953–1968, 2002. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890401001480>>. Citado na página 16.
- CHENG, Rui. **Modeling and simulation of plug-in hybrid electric powertrain system for different vehicular applications**. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- DEEPAK, Kritika et al. In-wheel motor drive systems for electric vehicles: State of the art, challenges, and future trends. **Energies**, v. 16, n. 7, 2023. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/7/3121>>. Citado na página 31.

DILONG NEW ENERGY TECHNOLOGY HEBEI. **Specification Sheet**. 2023. Citado na página 43.

EHSANI, Mehrdad et al. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-4987-3788-7. Citado na página 19.

EHSANI, Mehrdad et al. State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 6, p. 967–984, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 28.

EMADI, A. et al. Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 54, n. 3, p. 763–770, 2005. Citado na página 22.

FuelTech. **FuelTech PowerFT Series User Manual: FT450, FT550, FT550LITE, FT600**. [S.l.], 2024. Manual do Usuário. Versão da ECU: 5.2. Versão do FTManager: 5.2. Disponível em: <<https://www.fueltech.com.br>>. Citado na página 45.

GUARNIERI, Massimo. Looking back to electric cars. In: **2012 Third IEEE HISTory of EElectro-technology CONference (HISTELCON)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6. Citado na página 16.

Hangzhou Tiecheng Information Technology Co., Ltd. **1KW DC/DC Converter TDC-IY Series User Manual**. Hangzhou, China, 2019. Documento técnico. Revisão B. Código 201907 Ver. B. Disponível em: <<https://www.tccharger.com/>>. Citado na página 44.

HESLA, Erling. Electric propulsion [history]. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 15, n. 4, p. 10–13, 2009. Citado na página 17.

IEA. **Global EV Outlook 2024**. Paris, France: [s.n.], 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

INMETRO. **Relatório sobre Conectores para Carregamento de Veículos Elétricos**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/regulamentacao/analise-de-impacto-regulatorio/realizadas/2024/conectores-para-carregamento-de-veiculos-eletricos-plug-in/relatorio>>. Citado na página 27.

International Electrotechnical Commission. **IEC 61851-1: Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements**. 2017. <<https://webstore.iec.ch/publication/33644>>. Acesso em: jun. 2025. Citado na página 26.

KAMPKER, Achim et al. Cost optimal design strategy of electric drivetrains for medium heavy-duty vehicles based on product development and production costs. In: **2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–8. Citado na página 34.

KHALIGH, Alireza; LI, Zhihao. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 59, n. 6, p. 2806–2814, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 24, 27 e 28.

KUMAR, Pulkit; CHANNI, Harpreet Kaur; SINGH, Harvinder. A comprehensive review of electrical motors for electric mobility. In: **2024 IEEE International Conference for Women in Innovation, Technology Entrepreneurship (ICWITE)**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 130–135. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.

LI, Mei; XIE, Xuliang. Overview of the thermal management system of new energy vehicles. In: **2024 4th International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE)**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1431–1434. Citado na página 33.

LIN, Chiang-Lung et al. Drivetrain and powertrain thermal analyses of a tesla model 3 electric vehicle. **Sensors and Materials**, MYU, SCIENTIFIC PUBLISHING DIVISION 1-23-3-303 SENDAGI, TOKYO, 113-0022, JAPAN, v. 35, n. 12, p. 4131–4140, 2023. Citado na página 31.

METZNER, José Victor Scherer. **Estudo e Implementação de um Módulo Auxiliar de Potência (APM) para Veículo Elétrico**. Joinville, SC, 2025. Orientador: Prof. Dr. Marcello Mezaroba. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 73.

NAQVI, Syed Shehryar Ali et al. Evolving electric mobility energy efficiency: In-depth analysis of integrated electronic control unit development in electric vehicles. **IEEE Access**, v. 12, p. 15957–15983, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 30.

NASCIMENTO, Lucas Silva Sales do. **Estudo e Implementação de um Carregador Embarcado para Veículos Elétricos**. Joinville, SC, 2025. 105 p. Orientador: Prof. Dr. Marcello Mezaroba. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 73.

PASCA, Andrea. **"Through The Road"Hybrid configurations for Service Vehicles: modelling and analysis**. Tese (Doutorado) — Politecnico di Torino, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.

PENINA, Natalia; TURYGIN, Yury V.; RACEK, Vladimir. Comparative analysis of different types of hybrid electric vehicles. In: **13th Mechatronika 2010**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 102–104. Citado na página 17.

PESARAN, Ahmad A. Lithium-ion battery technologies for electric vehicles: Progress and challenges. **IEEE Electrification Magazine**, v. 11, n. 2, p. 35–43, 2023. Citado na página 25.

REN, Q.; CROLLA, D.A.; MORRIS, A. Effect of transmission design on electric vehicle (ev) performance. In: **2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1260–1265. Citado na página 34.

RIND, Saqib Jamshed et al. Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review. **Chinese Journal of Electrical Engineering**, v. 3, n. 3, p. 1–17, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

SCHAIBLE, U.; SZABADOS, B. A torque controlled high speed flywheel energy storage system for peak power transfer in electric vehicles. In: **Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**. [S.l.: s.n.], 1994. v. 1, p. 435–442 vol.1. Citado na página 28.

SELVAKUMAR, Sessa Gopal. Electric and hybrid vehicles – a comprehensive overview. In: **2021 IEEE 2nd International Conference On Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

SETHURAMAN, Rajesh; RUDHRAMOORTHY, Mageshvaran. Performance of bidirectional on-board charger in electric vehicle: A review. **e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, v. 8, p. 100613, 2024. ISSN 2772-6711. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671124001931>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 29.

SITU, Lixin. Electric vehicle development: The past, present future. In: **2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–3. Citado na página 17.

SONG, Li; YI, Yu; XIAOLIANG, Zhang. Research on energy management strategy for electric vehicles based on flywheel energy storage. In: **2024 IEEE 2nd International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT)**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 205–210. Citado na página 28.

SUN, Xiaoli et al. Technology development of electric vehicles: A review. **Energies**, v. 13, n. 1, 2020. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/1/90>>. Citado na página 26.

TOMAR, Harshit et al. Design and analysis of thermal management systems for an electric vehicle battery. In: **2025 First International Conference on Advances in Computer Science, Electrical, Electronics, and Communication Technologies (CE2CT)**. [S.l.: s.n.], 2025. p. 320–324. Citado na página 33.

WANG, Tiecheng; YU, Haifang; ZHU, Chunbo. Hybrid energy sources for hybrid electric vehicle propulsion. In: **2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–4. Citado na página 24.

WEG. **Guia de Especificação de Motores Elétricos**. 09/2024. ed. Jaraguá do Sul, SC, Brasil, 2024. Código: 50032749, Rev: 27. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Citado na página 39.

WEG Equipamentos Elétricos S.A. **Inversor de Frequência CVW500: Manual do Usuário**. Jaraguá do Sul, SC, Brasil, 2016. Documento n.º 10003961609/00. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6c/he7/WEG-manual-do-usuario-CVW500-10003961609-r00-pt.pdf>>. Citado 8 vezes nas páginas 40, 42, 55, 57, 60, 65, 67 e 70.

WEG S.A. **Folha de Dados - Motor Trifásico de Indução Rotor de Gaiola, 33 kW**. 2021. Documento técnico interno. Revisão 0. Código 083103/2021. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

WEG S.A. **Manual Operação Pack de Baterias WEG**. [S.l.], 2023. Versão V00. Disponível em: <<https://www.weg.net>>. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 54.

YILDIRIM, Merve; POLAT, Mehmet; KÜRÜM, Hasan. A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles. In: **2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 218–223. Citado na página 31.