

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

JOSÉ VICTOR SCHERER METZNER

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MÓDULO AUXILIAR DE POTÊNCIA (APM)
PARA VEÍCULO ELÉTRICO

JOINVILLE

2025

JOSÉ VICTOR SCHERER METZNER

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MÓDULO AUXILIAR DE POTÊNCIA (APM)
PARA VEÍCULO ELÉTRICO**

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

JOINVILLE

2025

Orientador:

Membros:

Marcello Mezaroba, Dr. Eng.

Universidade do Estado de Santa Catarina

Yales Rômulo de Novaes, Dr. Eng.

Universidade do Estado de Santa Catarina

Marcos Vinicius Bressan, Dr. Eng.

Universidade do Estado de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por sempre ouvir minhas preces e estar ao meu lado nos momentos difíceis.

Agradeço à Universidade do Estado de Santa Catarina por me proporcionar um ensino de excelência durante esses cinco anos.

Agradeço aos meus pais, Marcio e Fabiana, por me educarem da melhor maneira possível, pelo apoio e incentivo incondicional ao longo da vida e por não permitirem que eu desistisse do curso de Engenharia Elétrica após um primeiro ano diferente das minhas expectativas para uma faculdade de Engenharia. Agradeço a eles também por sempre exigirem o meu melhor, acreditando no meu potencial. Mesmo que, em alguns momentos, eu reclamasse, hoje reconheço que essa cobrança me lapidou para que eu me tornasse quem sou.

Agradeço à minha namorada, Pietra, que esteve comigo durante toda a minha trajetória na universidade, e a quem sempre recorri quando precisei de apoio emocional e incentivo. Agradeço também por sempre acreditar em mim — na maioria das vezes, mais do que eu mesmo acreditava.

Agradeço à minha irmã, Cecília, pela “rivalidade” entre irmãos, que me impulsionou a buscar ser melhor a cada dia.

Agradeço também ao professor Marcello Mezaroba pela orientação nesses dois anos e meio de iniciação científica e durante este trabalho.

Agradeço, em especial, aos meus amigos Lucas Sales, William e Jhon, que participaram ativamente do desenvolvimento deste projeto. Agradeço também aos demais amigos, pois cada um contribuiu, de alguma forma, para a minha formação pessoal e construção de caráter.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo e a implementação de um Módulo Auxiliar de Potência (APM) para aplicação em veículos elétricos (do inglês *Electric Vehicles* - EVs), com foco na eletrificação de uma van de transporte de passageiros da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc). Inicialmente, são abordadas as principais topologias de veículos elétricos e os critérios essenciais para a escolha de um conversor adequado à aplicação. Em seguida, é realizada uma análise dos principais componentes de um veículo elétrico. O projeto envolveu a seleção técnica e econômica do conversor, o desenvolvimento de sistemas periféricos como: a Unidade de Distribuição de Potência (PDU), caixa de fusíveis, circuitos de acionamento e a interface de monitoramento. O conversor selecionado, modelo TDC-IY-320-12, foi integrado à bancada de testes da van e teve seu desempenho validado por meio de testes experimentais. Os resultados demonstram o correto funcionamento do APM, tanto em condições básicas quanto em operação sob carga máxima, evidenciando sua viabilidade técnica para alimentar as cargas auxiliares do veículo.

Palavras-chave: Módulo Auxiliar de Potência. Veículo Elétrico. Eletrificação Automotiva. Protocolo CAN. Conversor CC-CC.

ABSTRACT

This work presents the study and implementation of an Auxiliary Power Module (APM) for application in electric vehicles (EVs), focusing on the electrification of a passenger transport van at the State University of Santa Catarina (Udesc). Initially, the main topologies of electric vehicles are discussed, along with the essential criteria for selecting a suitable converter for the application. Then, an analysis of the main components of an electric vehicle is carried out. The project involved the technical and economic selection of the converter, as well as the development of peripheral systems such as: the Power Distribution Unit (PDU), fuse box, actuation circuits, and the monitoring interface. The selected converter, model TDC-IY-320-12, was integrated into the van's test bench and had its performance validated through experimental tests. The results demonstrate the correct functioning of the APM, both under basic conditions and at full load, confirming its technical feasibility to supply the vehicle's auxiliary loads.

Keywords: Auxiliary Power Module. Electric Vehicle. Automotive Electrification. CAN Protocol. DC-DC Converter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Van do projeto ELETRIFICA.	19
Figura 2 – Diagrama de Blocos BEV.	21
Figura 3 – Diagrama de Blocos HEV Paralelo.	22
Figura 4 – Diagrama de Blocos HEV Série.	23
Figura 5 – Diagrama de Blocos HEV TTR.	23
Figura 6 – Diagrama de Blocos PHEV Paralelo.	24
Figura 7 – Diagrama de Blocos PHEV Série.	24
Figura 8 – Diagrama de Blocos PHEV TTR.	25
Figura 9 – Tendências globais da frota de carros elétricos, de 2014 a 2025.	25
Figura 10 – Registros e vendas de EVs por regiões, de 2018 a 2024.	26
Figura 11 – Registros e vendas de EVs no Brasil, de 2020 a 2025.	26
Figura 12 – Origem dos veículos elétricos em diversos países.	27
Figura 13 – Funcionamento básico de um EV genérico.	28
Figura 14 – Disposição dos componentes de um EV.	28
Figura 15 – VCU e seus principais componentes controlados.	29
Figura 16 – Veículo Elétrico Comum.	29
Figura 17 – Estrutura básica bateria de chumbo-ácido.	32
Figura 18 – Carga da bateria por corrente em duas etapas.	33
Figura 19 – Carga da bateria por tensão constante.	34
Figura 20 – Carga da bateria em duas etapas.	34
Figura 21 – Conversor DAB.	37
Figura 22 – Topologias de entrada.	38
Figura 23 – Topologias de saída.	39
Figura 24 – Retificador síncrono.	40
Figura 25 – 7 camadas do modelo OSI.	41
Figura 26 – Cabos CANH e CANL.	42
Figura 27 – Barramento CAN.	42
Figura 28 – Lógica diferencial CAN.	43
Figura 29 – Ruído na rede CAN.	43
Figura 30 – <i>Frame</i> CAN.	43
Figura 31 – Estrutura do CAN ID SAE J1939.	46
Figura 32 – DE1000S9G-360S14RC.	49
Figura 33 – TDC-IY-320-12.	50
Figura 34 – Conversor da <i>Delta</i>	51
Figura 35 – Diagrama de blocos simplificado do conversor TDC-IY-320-12.	57
Figura 36 – Esquemático da saída do conversor TDC-IY-320-12.	58
Figura 37 – Entrada e saída do conversor TDC-IY-320-12.	58

Figura 38 – Esquemático PDU.	60
Figura 39 – Dimensões projeto PDU.	61
Figura 40 – Lista de componentes PDU.	61
Figura 41 – Imagens do projeto PDU.	61
Figura 42 – Fotos da PDU.	62
Figura 43 – Fotos da PDU.	62
Figura 44 – Caixa de fusíveis.	64
Figura 45 – Esquemático da caixa de fusíveis.	64
Figura 46 – Estrutura da Fuse Box (projeto 3D e montagem).	65
Figura 47 – Estrutura da bancada (projeto 3D e montagem).	66
Figura 48 – Elementos da IHM.	67
Figura 49 – APM em operação.	68
Figura 50 – APM desligado.	68
Figura 51 – Tela com erros detectados.	68
Figura 52 – Tela de erro - Superaquecimento	69
Figura 53 – Tela de erro - Sobre corrente na entrada.	69
Figura 54 – Tela fim dos erros detectados.	69
Figura 55 – Tela de últimos erros - Falha HVIL.	70
Figura 56 – Tela de últimos erros - Falha de <i>Hardware</i>	70
Figura 57 – Tela fim da memória de erros.	70
Figura 58 – Exemplo de tela de valores de operação.	71
Figura 59 – Circuito interno do <i>enable</i>	71
Figura 60 – Funcionamento do circuito de acionamento do <i>enable</i>	72
Figura 61 – Topologia interna do CI SN7417N.	72
Figura 62 – Circuito simulado.	73
Figura 63 – Tensão em <i>EN_EXIT</i>	73
Figura 64 – Circuito para acionamento do APM via <i>enable</i>	74
Figura 65 – Diagrama da montagem do teste 1.	76
Figura 66 – Medição da entrada do APM.	76
Figura 67 – Medição da corrente de saída do APM.	76
Figura 68 – Diagrama da montagem do teste 2.	78
Figura 69 – Medições iniciais de saída do teste 2.	78
Figura 70 – Leitura de dados brutos por byte da comunicação.	78
Figura 71 – Gráfico Tensão, Corrente e Temperatura x Tempo - Teste 2.	79
Figura 72 – Diagrama da montagem do teste 3.	80
Figura 73 – Gráfico Tensão x Tempo — Teste 3.	81
Figura 74 – Gráfico Corrente x Tempo — Teste 3.	82
Figura 75 – Aproximações em 14,5 A.	82
Figura 76 – Outras aproximações.	83

Figura 77 – Medições de quedas de corrente no osciloscópio.	83
Figura 78 – Gráfico Temperatura e Corrente x Tempo — Teste 3.	84
Figura 79 – Gráfico Tensão e Corrente x Tempo — Teste 3.	85
Figura 80 – Aproximações no início e fim da carga.	85
Figura 81 – Montagem física do teste 4.	88
Figura 82 – Diagrama da montagem do teste 4.	88
Figura 83 – Gráfico Tensão x Tempo — Teste 4.	89
Figura 84 – Gráfico Corrente x Tempo — Teste 4.	89
Figura 85 – Medições de corrente em cada componente no teste 4.	90
Figura 86 – Resposta ao degrau de carga.	91
Figura 87 – Gráfico Temperatura x Tempo — Teste 4.	91
Figura 88 – Gráfico Tensão e Corrente x Tempo — Teste 4.	92
Figura 89 – Diagrama da montagem do teste 5.	94
Figura 90 – Gráfico Tensão e Corrente de saída x Tempo — Teste 5.	95
Figura 91 – Gráfico Corrente de entrada e de saída x Tempo — Teste 5.	95
Figura 92 – Corrente de entrada do APM no complemento do Teste 5.	96
Figura 93 – Gráfico Corrente de entrada x Tempo – Complemento do Teste 5.	96
Figura 94 – Gráfico Corrente de saída x Tempo – Complemento do Teste 5.	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição das camadas do modelo OSI.	41
Quadro 2 – Função de cada campo do <i>frame</i> CAN.	44
Quadro 3 – Lista de erros do APM.	56
Quadro 4 – Cargas da PDU.	59
Quadro 5 – Corrente máxima das cargas de BT.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Corrente máxima das cargas de BT conforme os respectivos <i>datasheets</i>	48
Tabela 2 – Características do conversor DE1000S9G-360S14RC.	49
Tabela 3 – Características do conversor TDC-IY-320-12.	50
Tabela 4 – Características do conversor da <i>Delta</i>	51
Tabela 5 – Características do conversor RD1P2360.	52
Tabela 6 – Comparativo Tamanho e Peso.	53
Tabela 7 – Comparativo Limites de Temperatura e Umidade do Ar.	53
Tabela 8 – Comparativo de Proteções Garantidas.	54
Tabela 9 – Comparativo de Preços e Garantia.	55
Tabela 10 – Tempos de carga e descarga da bateria de BT.	84
Tabela 11 – V_{in} e SOC da bateria de AT — início e fim do teste 5.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Anti-lock Braking System</i>
ACK	<i>Acknowledge</i>
APM	<i>Auxiliary Power Module</i>
AT	Alta Tensão
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
BT	Baixa Tensão
BYD	<i>Build Your Dreams</i>
CA	Corrente Alternada
CAN	<i>Control Area Network</i>
CAN FD	<i>CAN bus with flexible data-rate</i>
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DAB	<i>Dual Active Bridge</i>
DP	<i>Data Page</i>
DLC	<i>Data Length Code</i>
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>
EOF	<i>End of Frame</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
EV	<i>Electric Vehicle</i>
EVPT	<i>Tianjin Yidingfeng Powertrain Technology</i>
FB	<i>Full-Bridge</i>
FBCD	<i>Full Bridge Current Doubler</i>
GHG	<i>Greenhouse Gases</i>
HB	<i>Half-Bridge</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i>
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
HVIL	<i>High Voltage Interlock Loop</i>

ID	<i>Identificator</i>
IDE	<i>Identifier Extension Bit</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
Kbps	Quilo <i>bits</i> por segundo
LIN	<i>Local Interconnect Network</i>
NFS	<i>Network File System</i>
OBC	<i>On Board Charger</i>
OBD2	<i>On-board diagnostics</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OCV	<i>Open-Circuit Voltage</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PF	<i>Protocol Data Unit Format</i>
PDU	<i>Power Distribution Unit</i>
PGN	<i>Parameter Group Number</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
PS	<i>Protocol Data Unit Specific</i>
RPM	Rotações por minuto
RTR	<i>Remote Transmission Request</i>
SA	<i>Source Address</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SMB	<i>Server Message Block</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
SOF	<i>Start of Frame</i>
SOH	<i>State of Health</i>
SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
SPN	<i>Suspect Parameter Number</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TTR	<i>Through-the-Road</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>

Udesc	Universidade do Estado de Santa Catarina
VCU	<i>Vehicle Control Unit</i>
ZVS	<i>Zero-voltage Switching</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Rendimento do conversor	%
I_{bat}	Corrente na bateria de baixa tensão	A
I_{bomb}	Corrente na bomba d'água maior	A
I_{BT}	Corrente do sistema de baixa tensão	A
I_{eq1}	Corrente do sistema BT sem a bomba d'água maior e o eletroventilador	A
I_{in}	Corrente de entrada do conversor APM	A
I_{out}	Corrente de saída do conversor APM	A
$I_{outpico}$	Valor de pico da corrente de saída do conversor APM	A
I_{r1}	Corrente na resistência equivalente 1	A
I_{r2}	Corrente na resistência equivalente 2	A
P_{BT}	Potência do sistema de baixa tensão	W
P_{in}	Potência de entrada do conversor APM	W
P_{out}	Potência de saída do conversor APM	W
$P_{outpico}$	Valor de pico da potência na saída do conversor APM	W
P_{r1}	Potência dissipada pela resistência equivalente 1	W
R_1	Valor calculado para a resistência equivalente 1	Ω
r_1	Valor utilizado para a resistência equivalente 1	Ω
V_{BT}	Tensão do sistema de baixa tensão	V
V_{in}	Tensão de entrada do conversor APM	V

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVO GERAL	20
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	20
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	21
2.1.1	Veículo Elétrico a Bateria - BEV	21
2.1.2	Veículo Elétrico Híbrido - HEV	22
2.1.2.1	<i>Veículo Elétrico Híbrido Paralelo</i>	22
2.1.2.2	<i>Veículo Elétrico Híbrido Série</i>	22
2.1.2.3	<i>Veículo Elétrico Híbrido Through-the-Road</i>	23
2.1.3	Veículo Elétrico Híbrido plug-in - PHEV	24
2.1.3.1	<i>Veículo Elétrico Híbrido plug-in Paralelo</i>	24
2.1.3.2	<i>Veículo Elétrico Híbrido plug-in Série</i>	24
2.1.3.3	<i>Veículo Elétrico Híbrido plug-in Through-the-Road</i>	25
2.2	MERCADO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	25
2.3	COMPONENTES DE UM VEÍCULO ELÉTRICO	27
2.3.1	Unidade de Controle do Veículo - VCU	28
2.3.2	Bateria de Tração	29
2.3.3	<i>Battery Management System - BMS</i>	30
2.3.4	<i>On Board Charger - OBC</i>	30
2.3.5	Sistema de <i>Powertrain</i>	30
2.3.6	Bateria Auxiliar	31
2.3.7	Módulo Auxiliar de Potência - APM	31
2.3.8	Unidade de Distribuição de Potência - PDU	31
2.4	BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO	32
2.4.1	Relaxamento de Tensão	32
2.4.2	Técnicas de Carregamento de Baterias de Chumbo-Ácido	33
2.4.2.1	<i>Carregamento por Corrente em Duas Etapas</i>	33
2.4.2.2	<i>Carregamento por Tensão Constante</i>	34
2.4.2.3	<i>Carregamento em Duas Etapas</i>	34
2.5	ASPECTOS ESSENCIAIS PARA UM CONVERSOR APM	35
2.5.1	Alta potência e corrente de saída	35
2.5.2	Alta Confiabilidade	35
2.5.3	Alta Eficiência	36

2.5.4	Alta Densidade de Potência	36
2.5.5	Variações na Tensão de Entrada e Saída	36
2.5.6	Isolação Galvânica	36
2.5.7	Operação Bidirecional	36
2.6	CONVERSORES MAIS COMUNS	36
2.6.1	Aplicação Bidirecional	37
2.6.2	Aplicação Unidirecional	38
<i>2.6.2.1</i>	<i>Topologia de Entrada</i>	38
<i>2.6.2.2</i>	<i>Topologia de Saída</i>	38
<i>2.6.2.3</i>	<i>Conversor Final Unidirecional</i>	40
2.7	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO	40
2.7.1	Modelo OSI	40
2.7.2	Protocolo CAN	41
<i>2.7.2.1</i>	<i>SAE J1939</i>	44
2.8	COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO	46
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO PARA IMPLEMENTAR O APM	47
3.1	ESCOLHA DO MÓDULO AUXILIAR DE POTÊNCIA - APM	47
3.1.1	Levantamento de cargas	47
3.1.2	Busca no Mercado Nacional	48
3.1.3	Principais Modelos Encontrados	48
<i>3.1.3.1</i>	<i>Dilong</i>	48
<i>3.1.3.2</i>	<i>Tianjin Yidingfeng Powertrain Technology Co., Ltd. - EVPT</i>	50
<i>3.1.3.3</i>	<i>Delta</i>	51
<i>3.1.3.4</i>	<i>OVAR</i>	52
3.1.4	Comparativo entre os Modelos	52
<i>3.1.4.1</i>	<i>Dimensões e Peso</i>	53
<i>3.1.4.2</i>	<i>Limites de Temperatura e Umidade do Ar</i>	53
<i>3.1.4.3</i>	<i>Proteção</i>	54
<i>3.1.4.4</i>	<i>Preço e Garantia</i>	54
<i>3.1.4.5</i>	<i>Constatações Adicionais</i>	55
3.1.5	Escolha Final	55
3.1.6	Características do conversor TDC-IY-320-12	55
<i>3.1.6.1</i>	<i>Comunicação e comando</i>	55
<i>3.1.6.2</i>	<i>Topologia do conversor</i>	57
3.2	DESENVOLVIMENTO DA UNIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA - PDU	58
3.2.1	Especificação da PDU	58

3.2.2	Projeto da PDU	60
3.2.3	Desenvolvimento da Caixa de Fusíveis	62
<i>3.2.3.1</i>	<i>Especificação da caixa de fusíveis</i>	63
<i>3.2.3.2</i>	<i>Projeto da caixa de fusíveis</i>	63
3.3	DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITOS AUXILIARES PARA O FUNCIO- NAMENTO DO APM	67
3.3.1	Interface Homem-Máquina (IHM)	67
3.3.2	Identificação dos elementos da IHM	67
3.3.3	Telas da IHM	68
3.3.4	Circuito de acionamento do <i>enable</i>	71
3.4	COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO	74
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	75
4.1	TESTE 1: FUNCIONAMENTO BÁSICO DO CONVERSOR	75
4.2	TESTE 2: ESTABELECIMENTO DA COMUNICAÇÃO CAN	77
4.3	TESTE 3: CICLO DE CARGA E DESCARGA DA BATERIA DE BT	79
4.4	TESTE 4: OPERAÇÃO DO APM COM CAPACIDADE MÁXIMA DO SISTEMA	86
4.5	TESTE 5: CORREÇÃO NA LÓGICA DO CIRCUITO DE <i>ENABLE</i>	93
4.5.1	Complemento do Teste 5	96
4.6	COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO	97
5	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

O mercado de veículos elétricos vem crescendo exponencialmente no Brasil e no mundo. Em 2024, foram vendidos 17 milhões de veículos elétricos considerando tanto Veículos Elétricos Híbridos plug-in (do inglês *Plug-in Hybrid Electric Vehicles* - PHEVs) quanto Veículos Elétricos a Bateria (do inglês *Battery Electric Vehicles* - BEVs), atingindo a marca de 20% do mercado automobilístico internacional (IEA, 2025). Porém, mesmo com o aumento significativo na produção de Veículos Elétricos (do inglês *Electric Vehicles* - EVs), a indústria automotiva continua sendo uma das principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (do inglês *Greenhouse Gases* - GHG) no mundo (Gnanavendan *et al.*, 2024).

Nesse viés, a eletrificação veicular é uma das soluções mais promissoras e sustentáveis para diminuir o consumo de combustíveis fósseis e, consequentemente, reduzir as emissões de GHG geradas por esse setor (Wang; Zheng; Bauman, 2023) (Hou *et al.*, 2015).

Em meados do século 20, os primeiros sistemas elétricos de Baixa Tensão (BT) eram utilizados em automóveis, com tensão de 6V, provenientes de uma bateria auxiliar, e com a finalidade de alimentar os sistemas de ignição, partida e iluminação do veículo (Emadi; Williamson; Khaligh, 2006). Entretanto, com o aumento constante de cargas de BT, fez-se necessário aumentar a tensão do sistema de 6V para 12V, sendo esse o padrão utilizado até os dias atuais. Esse sistema de BT é vital para o funcionamento de qualquer veículo, seja ele a combustão ou elétrico (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

Nos veículos convencionais, o motor a combustão fornece torque para um alternador que alimenta as cargas de BT do veículo e carrega a bateria auxiliar com corrente contínua (CC). Quando o motor é desligado, a bateria passa a ser a única fonte de energia para essas cargas. Contudo, como os EVs possuem baterias de Alta Tensão (AT), o alternador, que possui eficiência muito baixa, é substituído por um conversor CC/CC de alto rendimento para fazer a transferência de energia da bateria principal para a auxiliar. Esse conversor é conhecido como Módulo Auxiliar de Potência (do inglês *Auxiliary Power Module* - APM) (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

Todavia, os desafios impostos pelo desenvolvimento acelerado de tecnologia no setor de EVs exigem constantes evoluções e mudanças no setor de APMs, impulsionando as pesquisas na área e corroborando com o surgimento de diversas topologias utilizadas por modelos variados de EVs. Assim, faz-se necessário analisar qual das topologias melhor se encaixa para a aplicação do atual projeto.

Desse modo, visando aprofundar as pesquisas a respeito da eletrificação de veículos, o Prof. Dr. Marcello Mezaroba fundou o projeto ELETRIFICA, que tem como objetivo principal o desenvolvimento de estudos, projetos e protótipos para a conversão elétrica de veículos a combustão. O primeiro projeto do ELETRIFICA é adaptar uma van de transporte de passageiros (apresentada na Figura 1, de posse da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), que apresentou defeito no motor, para transformá-la em um PHEV. Para tanto, o processo de eletrificação de um veículo exige a instalação de diversos componentes adicionais, como o *On*

Board Charger (OBC), powertrain, APM, entre outros.

Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar as principais topologias de APMs, destacando as características técnicas relevantes que devem ser consideradas na escolha do conversor mais adequado para a aplicação proposta. Além disso, aborda-se o processo de seleção, aquisição e implementação prática do equipamento com a topologia escolhida, visando sua integração eficiente ao sistema do veículo em conversão.

Figura 1 – Van do projeto ELETRIFICA.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

1.1 OBJETIVO GERAL

Implantar um APM para ser utilizado na eletrificação de uma van de transporte de passageiros.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

1. Estudar conversores CC-CC para utilização como módulo auxiliar de potência em veículos elétricos;
2. Estudar os protocolos de comunicação entre o APM e a Unidade de Controle do Veículo (do inglês *Vehicle Control Unit* - VCU);
3. Especificar e adquirir um APM para ser utilizado na eletrificação de uma van de transporte;
4. Especificar e adquirir os demais sistemas necessários para a implementação do conversor;
5. Validar o funcionamento do conversor escolhido para a situação vigente.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução e os objetivos do estudo. O Capítulo 2 constitui a base teórica da pesquisa, abrangendo uma revisão ampla dos temas abordados. O Capítulo 3 descreve a etapa de desenvolvimento do projeto, detalhando os processos realizados desde o início até a conclusão do trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os testes práticos realizados para validar o funcionamento do conversor APM, além de conter uma análise quantitativa e qualitativa de seus resultados. Por fim, o Capítulo 5 expõe as conclusões finais do estudo, bem como sugestões para possíveis desdobramentos e continuidade do trabalho desenvolvido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos e fundamentos necessários para o desenvolvimento do projeto. Ele estabelece a base teórica que sustenta as decisões tomadas nas etapas seguintes.

2.1 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

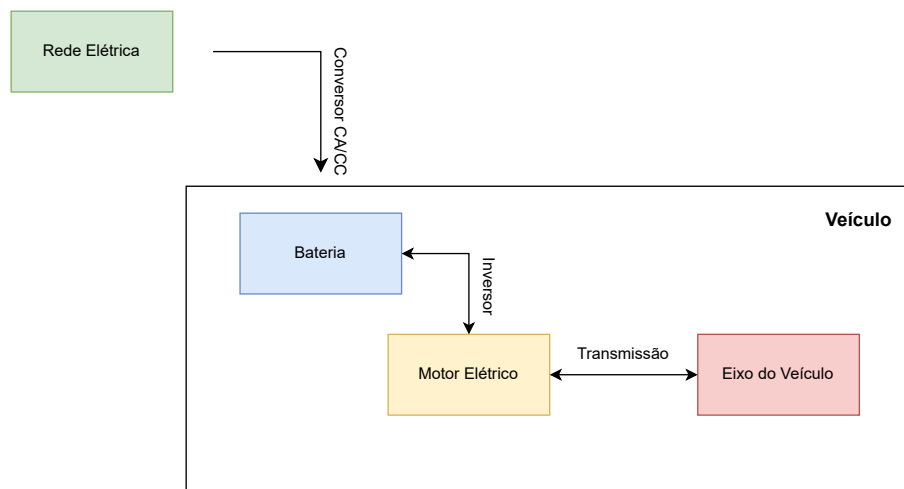
Nesta seção serão abordados os tipos de EVs mais populares, assim como, uma breve explicação do funcionamento de cada um.

2.1.1 Veículo Elétrico a Bateria - BEV

Os BEVs são os mais populares mundialmente dentre os EVs, e, consequentemente, os mais vendidos (IEA, 2025). Estes funcionam exclusivamente com a energia armazenada em seu banco de baterias, que, apesar de receber energia do freio regenerativo, deve ser recarregado na rede elétrica (Emadi, 2015).

O funcionamento básico de um BEV é representado na Figura 2. Nela observamos que a energia proveniente da rede elétrica carrega a bateria, que fornece energia para o motor elétrico para tracionar o veículo girando o seu eixo. Porém, por meio do freio regenerativo, o motor consegue recuperar uma parcela desta energia e devolvê-la ao banco de baterias (Emadi, 2015).

Figura 2 – Diagrama de Blocos BEV.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Enquanto a eficiência dos motores a combustão não passa de 30%, a do motor elétrico supera os 90%, sendo essa uma das principais vantagens deste tipo de veículo (Emadi, 2015).

Atualmente a autonomia dos BEVs é inferior às demais topologias de EVs, sendo essa a sua principal desvantagem. Porém, com o avanço de pesquisas no desenvolvimento de motores elétricos e baterias, este problema tende a ser mitigado (Emadi, 2015).

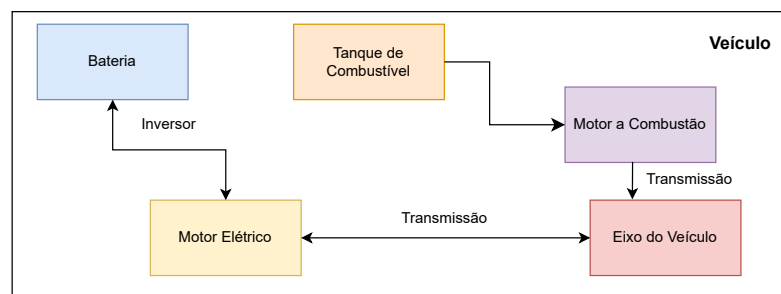
2.1.2 Veículo Elétrico Híbrido - HEV

Os Veículos Elétricos Híbridos (do inglês *Hybrid Electric Vehicles* - HEVs) estão se tornando cada vez mais populares e tendem a ter uma participação de mercado cada vez maior em um futuro breve (Holjevac; Cheli; Gobbi, 2018). Este tipo de veículo é um intermediário entre os veículos a combustão e os BEVs, sendo que, a principal diferença entre o BEV e o HEV é que o HEV possui 2 motores, sendo um o elétrico e o outro a combustão, que gera energia para o veículo (Emadi, 2015). São utilizadas mais do que uma topologia para a construção dos HEVs, estas serão apresentadas nos tópicos a seguir.

2.1.2.1 Veículo Elétrico Híbrido Paralelo

Conforme a Figura 3, apesar da fonte de energia do veículo ser a queima do combustível, um motor elétrico está acoplado ao eixo em paralelo ao motor a combustão, de modo que, por meio do acoplamento, ele atue como gerador, carregando a bateria. Essa energia armazenada pode ser utilizada posteriormente para tracionar o veículo (Kim; Kim; Kum, 2016).

Figura 3 – Diagrama de Blocos HEV Paralelo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

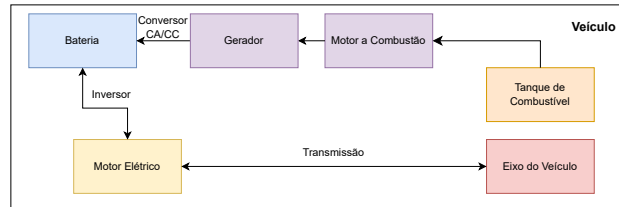
Como o *powertrain* (conceito a ser explicado na Seção 2.3.5) dessa topologia não necessita de tantas mudanças quando comparado ao do EV convencional, a arquitetura em paralelo é uma das mais utilizadas no mercado de HEVs (Kim; Kim; Kum, 2016). Contudo, o motor a combustão é acoplado mecanicamente ao motor elétrico, via transmissão, baixando significativamente a eficiência de operação desse sistema, cuja máxima teórica é de aproximadamente 45% (Li; Williamson, 2007).

2.1.2.2 Veículo Elétrico Híbrido Série

Conforme ilustrado na Figura 4, embora o eixo do veículo seja acionado exclusivamente pelo motor elétrico, a energia utilizada tem origem na queima de combustível. Isso ocorre porque o motor a combustão aciona um gerador, que, por meio de um conversor com entrada em Corrente Alternada (CA) e saída em CC, fornece energia ao banco de baterias. Essas baterias, por sua

vez, alimentam o motor elétrico, responsável pela tração do veículo. O processo de frenagem regenerativa permanece funcional, permitindo o recarregamento da bateria por meio do sistema de acoplamento (Li; Williamson, 2007).

Figura 4 – Diagrama de Blocos HEV Série.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Este sistema possui uma eficiência muito baixa, em torno de 25%, sendo as principais fontes de perdas o motor a combustão e a carga e descarga das baterias (Li; Williamson, 2007).

2.1.2.3 Veículo Elétrico Híbrido *Through-the-Road*

Conforme ilustrado na Figura 5, nesta topologia não há acoplamento mecânico direto entre o motor a combustão e o motor elétrico. Em vez disso, o acoplamento ocorre por meio do contato com a estrada, originando o termo HEV *Through-the-Road* (TTR). A principal fonte de energia do veículo continua sendo a queima de combustível; no entanto, por meio da atuação independente dos dois sistemas de tração, o motor elétrico pode funcionar como gerador, recarregando a bateria. A energia armazenada pode ser utilizada posteriormente para auxiliar na tração do veículo (Zulkifli *et al.*, 2015).

Figura 5 – Diagrama de Blocos HEV TTR.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Essa topologia permite que um veículo convencional a combustão seja convertido em um HEV com modificações mínimas em sua estrutura. Isso pode ser feito por meio da adição de um motor elétrico — junto com os componentes essenciais de controle e alimentação — em um dos eixos do veículo, geralmente aquele que originalmente não possuía tração (Zulkifli *et al.*, 2015).

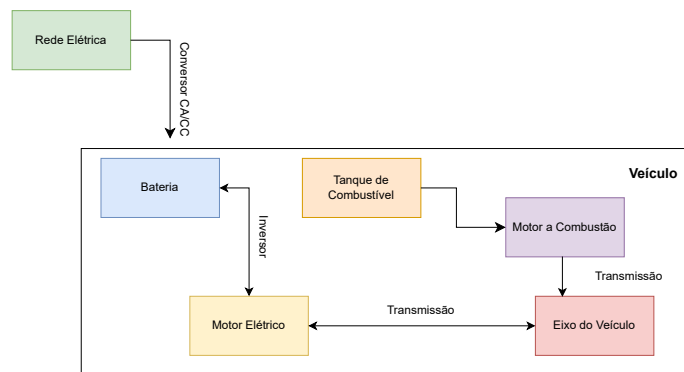
2.1.3 Veículo Elétrico Híbrido plug-in - PHEV

A principal diferença dos HEVs para os PHEVs é a possibilidade de carregar o banco de baterias pela rede elétrica comum (Emadi, 2015).

2.1.3.1 Veículo Elétrico Híbrido plug-in Paralelo

O seu funcionamento continua similar ao descrito em 2.1.2.1, porém, a bateria também pode ser carregada pela rede elétrica convencional (Emadi, 2015). A Figura 6 mostra um diagrama simplificado do funcionamento desta topologia.

Figura 6 – Diagrama de Blocos PHEV Paralelo.

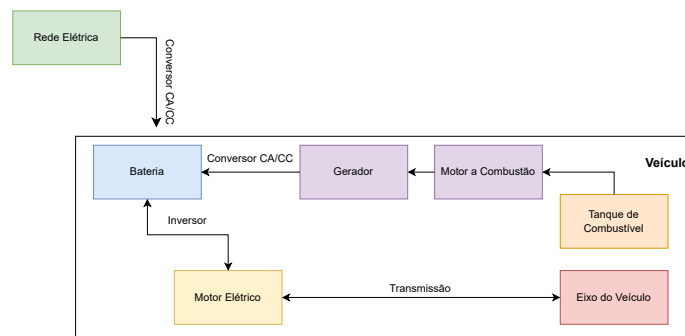


Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

2.1.3.2 Veículo Elétrico Híbrido plug-in Série

O seu funcionamento continua similar ao descrito em 2.1.2.2, porém, a bateria também pode ser carregada pela rede elétrica convencional (Emadi, 2015). A Figura 7 mostra um diagrama simplificado do funcionamento dessa topologia.

Figura 7 – Diagrama de Blocos PHEV Série.

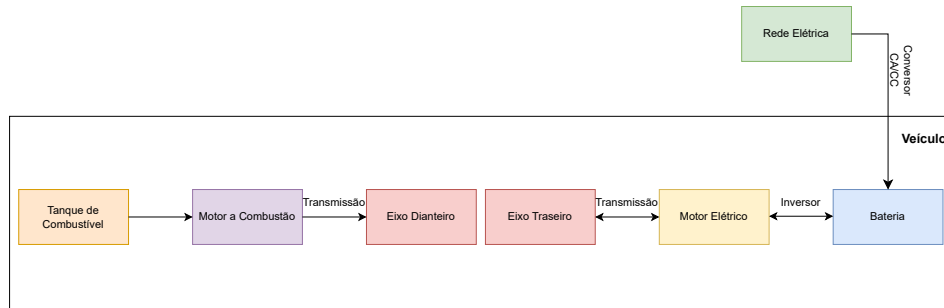


Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

2.1.3.3 Veículo Elétrico Híbrido plug-in Through-the-Road

O seu funcionamento continua similar ao descrito em 2.1.2.3, porém, a bateria também pode ser carregada pela rede elétrica convencional (Emadi, 2015). A Figura 8 mostra um diagrama simplificado do funcionamento dessa topologia.

Figura 8 – Diagrama de Blocos PHEV TTR.

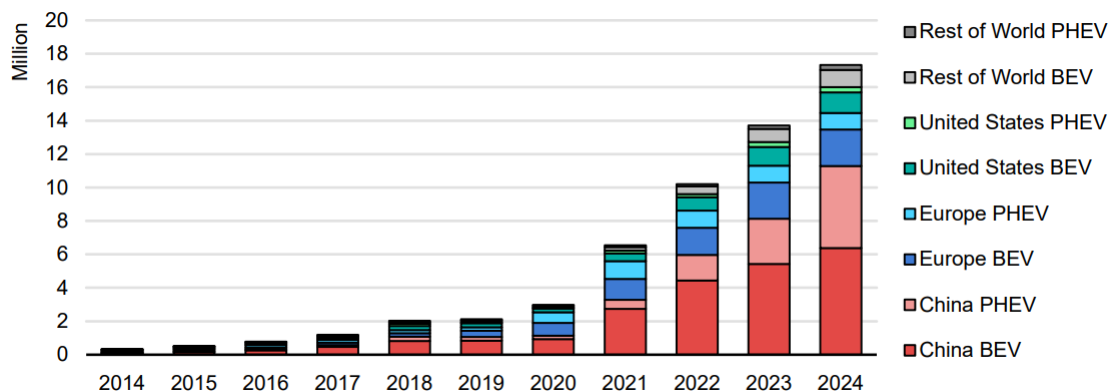


Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

2.2 MERCADO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Conforme a Figura 9, em 2024, foram registrados em torno de 17 milhões de EVs novos, totalizando 58 milhões em circulação. O número de vendas desses veículos em 2024 foi 25% superior ao de 2023, e essas vendas representaram mais de 20% da venda total de carros no mundo nesse ano. Além disso, estima-se que, atualmente, 4% da frota mundial de veículos seja composta por EVs (IEA, 2025).

Figura 9 – Tendências globais da frota de carros elétricos, de 2014 a 2025.



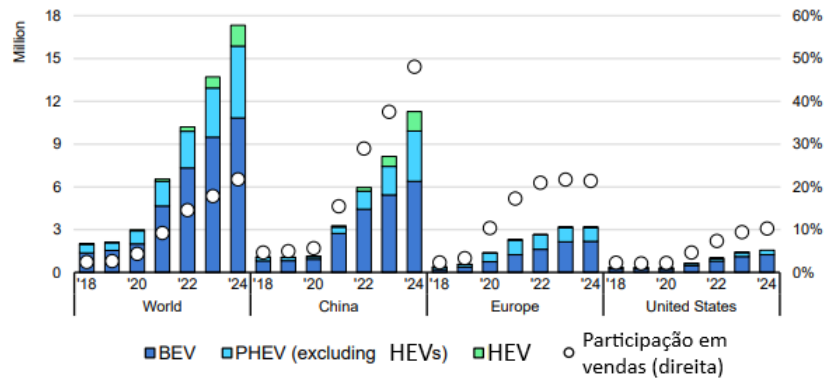
Fonte: Global EV Outlook (2025)

Todavia, apesar do elevado número de veículos elétricos (EVs) em circulação, esse mercado ainda é bastante concentrado, com cerca de 90% dos EVs localizados em apenas três

regiões do mundo: China (64%), Europa (18%) e Estados Unidos (8%), conforme apresentado na Figura 10.

Assim, embora na China aproximadamente um a cada três carros novos registrados seja elétrico, de acordo com IEA (2024), o cenário muda drasticamente quando comparado a outros países. Mesmo em nações com mercados automobilísticos desenvolvidos, como Japão e Índia, os veículos a combustão ainda predominam (IEA, 2025).

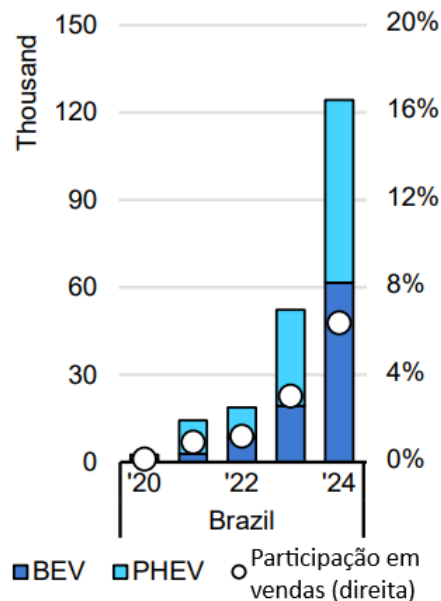
Figura 10 – Registros e vendas de EVs por regiões, de 2018 a 2024.



Fonte: Global EV Outlook (2025)

No Brasil, de 2022 para 2023, o número de EVs em circulação praticamente triplicou, passando para 50 mil unidades e, de 2023 para 2024, esse número mais que dobrou novamente, totalizando uma frota de 125 mil veículos elétricos no país, correspondendo a 4% da frota nacional de carros, conforme a Figura 11 (IEA, 2025).

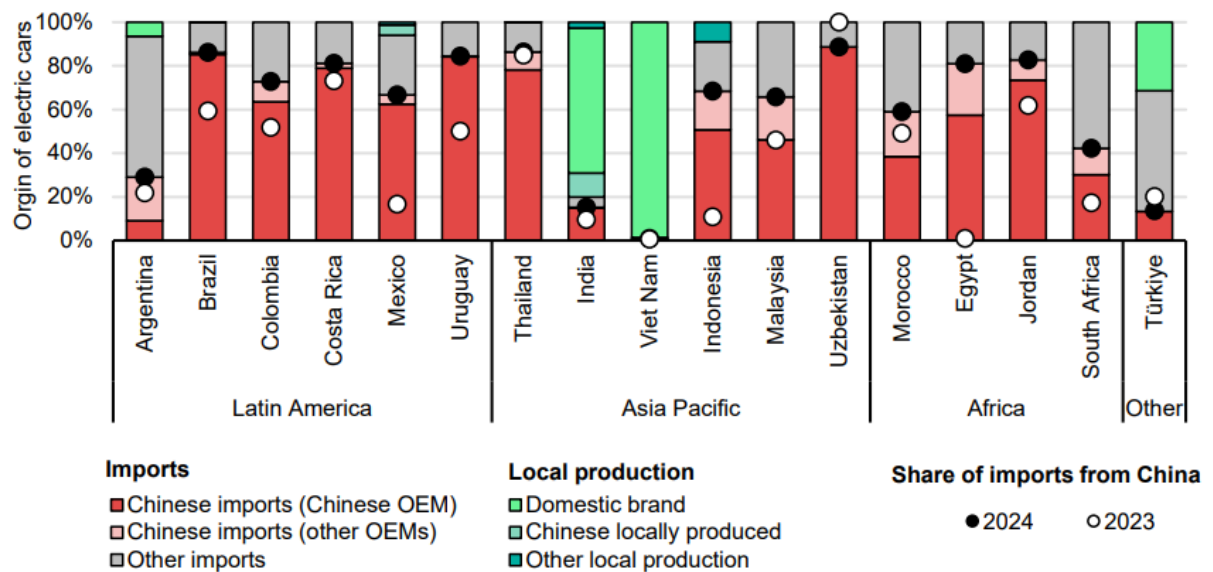
Figura 11 – Registros e vendas de EVs no Brasil, de 2020 a 2025.



Fonte: Global EV Outlook (2025)

Um dos fatores majoritários para esse crescimento repentino foi a forte expansão de Fabricantes de Equipamentos Originais (do inglês *Original Equipment Manufacturer* - OEMs) chinesas no mercado latino-americano, especialmente no brasileiro, como a *Build Your Dreams* (BYD) e a *Great Wall Motors* (IEA, 2025). A Figura 12 mostra a origem dos veículos elétricos em diversos países, classificando-os como importações da China com OEMs chinesas ou com OEMs de outros países, importações de outros países e produções locais. Nela, é possível observar que o Brasil é o país com maior porcentagem de veículos importados da China da lista, sendo que estes representam cerca de 80% do mercado local (IEA, 2025).

Figura 12 – Origem dos veículos elétricos em diversos países.



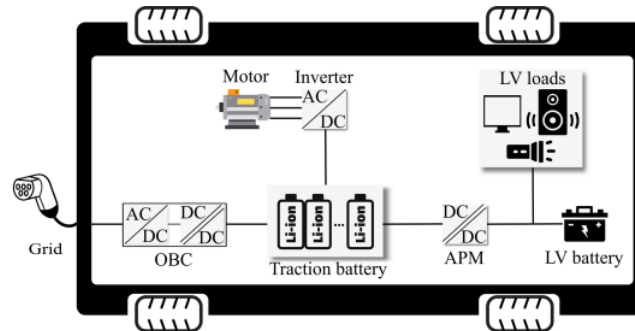
Fonte: Global EV Outlook (2025)

A ascensão do número de EVs no Brasil é especialmente positiva para o meio ambiente, pois, em 2022, 87,5% da matriz elétrica do país originou-se de fontes renováveis, diferentemente de países como a China, com 30,2%, e Estados Unidos, com 21,4% (IEA, ca.2023). Contudo, devido à forte indústria nacional de cana-de-açúcar, os combustíveis à base de etanol ainda são muito populares no Brasil, sendo que diversas montadoras estão desenvolvendo veículos híbridos a etanol, que condizem mais com a realidade do país (IEA, 2024).

2.3 COMPONENTES DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

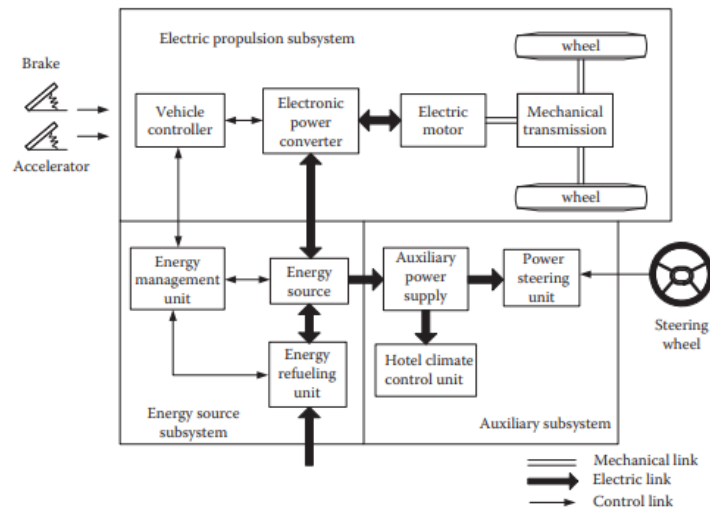
As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, os principais componentes que integram um EV, bem como a forma como esses elementos estão distribuídos fisicamente em seu interior. Este tópico tem como objetivo descrever o funcionamento dos componentes que mantêm uma relação direta com o escopo do presente trabalho, destacando suas funções e sua importância no contexto do sistema proposto.

Figura 13 – Funcionamento básico de um EV genérico.



Fonte: Wang, Zheng e Bauman (2023)

Figura 14 – Disposição dos componentes de um EV.



Fonte: Ehsani *et al.* (2018)

2.3.1 Unidade de Controle do Veículo - VCU

Com o aumento contínuo da complexidade dos veículos, torna-se necessário dispor de um sistema central capaz de ler as informações essenciais provenientes dos diversos sensores do automóvel, além de tomar decisões adequadas com base nas leituras disponíveis (DORLECO, 2024).

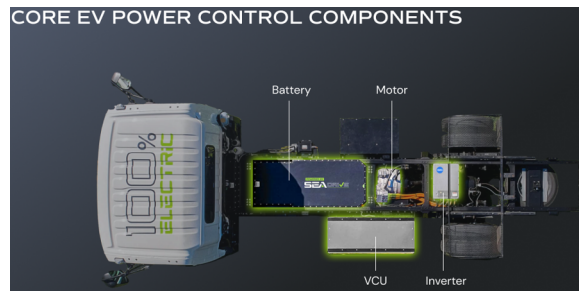
Em veículos a combustão, essa central é denominada Unidade de Controle Eletrônica (do inglês *Electronic Control Unit* - ECU) e é responsável por gerenciar e controlar o motor, as emissões de gases, a eficiência do consumo de combustível e algumas funções auxiliares, como a recomendação de troca de marcha exibida no painel do veículo e o funcionamento do sistema de freios *Anti-lock Braking System* (ABS) (DORLECO, 2024). Contudo, o termo ECU não se refere exclusivamente à central de comando do motor; qualquer unidade eletrônica de controle presente no veículo pode ser denominada ECU, como os módulos responsáveis pelos airbags, pelo sistema de áudio, entre outros (CCS, 2023).

Como as necessidades de um EV diferem significativamente das de veículos a combustão,

a central de controle desses automóveis desempenha funções distintas, incluindo o gerenciamento e controle da bateria de tração e de sua eficiência energética, o funcionamento do freio regenerativo, além de reportar falhas e problemas operacionais do veículo. Essa unidade, em veículos elétricos, é chamada de VCU (DORLECO, 2024).

A Figura 15 apresenta um esquema dos principais componentes controlados por uma VCU.

Figura 15 – VCU e seus principais componentes controlados.



Fonte: exro (2025)

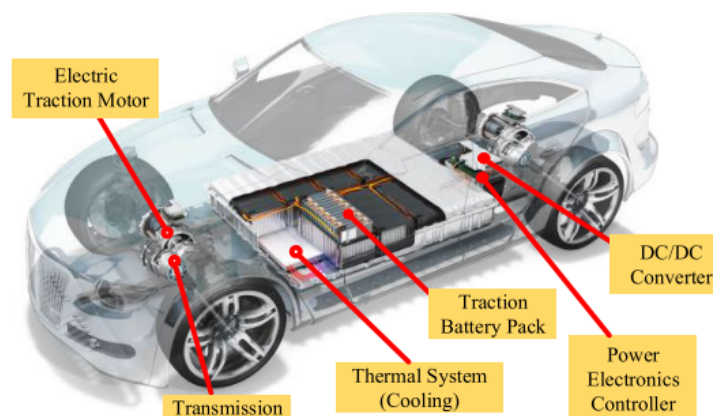
2.3.2 Bateria de Tração

A bateria de tração do EV é responsável por fornecer energia ao motor elétrico, essa também é chamada de bateria de AT (Kumar *et al.*, 2023).

O tipo mais comum de bateria para esta aplicação é a de íon-lítio por ter a melhor densidade energética, baixa perda de capacidade de carga ao longo do tempo e baixos índices de auto-descarga. Para atender a alta demanda energética de EVs, as células individuais, cuja tensão média é de aproximadamente 3,87V, devem ser agrupadas em pacotes de bateria, que podem ser conectados tanto em série quanto em paralelo (Hannan *et al.*, 2018).

A Figura 16 mostra onde a bateria de tração fica disposta em um EV padrão.

Figura 16 – Veículo Elétrico Comum.



Fonte: Kumar *et al.* (2023)

2.3.3 *Battery Management System - BMS*

O *Battery Management System* (BMS) é o componente responsável por monitorar e controlar continuamente a bateria de tração do EV (Pattnaik *et al.*, 2023). Sua principal função é garantir a operação segura da bateria e mantê-la dentro dos limites operacionais predefinidos, supervisionando parâmetros como tensão, corrente e temperatura (Emanet; Kiyak, 2021).

O BMS é responsável por evitar condições perigosas como sobrecarga e descarga profunda da bateria, que podem levar ao superaquecimento e danos às células, reduzindo a vida útil do pacote. Uma função crítica regulada pelo BMS é o balanceamento celular, que busca igualar o estado de carga (do inglês *State of Charge* - SOC) de cada célula dentro do pacote de baterias. O balanceamento celular é vital pois as células podem ter diferentes taxas de carga ou descarga devido a variações, e sem ele, algumas células poderiam atingir a sobrecarga ou descarga profunda antes das outras, mesmo que o pacote total ainda não tenha atingido seu limite. Ao equilibrar as células, o BMS maximiza a capacidade utilizável do pacote e prolonga sua vida útil. O sistema também pode estimar o estado de saúde (do inglês *State of Health* - SOH) da bateria. Em suma, o BMS atua como uma proteção inteligente da bateria, otimizando seu desempenho, garantindo a segurança e aumentando sua durabilidade (Pattnaik *et al.*, 2023).

2.3.4 *On Board Charger - OBC*

O OBC é um sistema crucial instalado dentro de um EV, sua principal função é auxiliar o carregamento da bateria de AT do carro. O OBC age como uma interface entre a estação de recarga (conectada à rede elétrica) e a bateria de tração do veículo. Ele atua majoritariamente como um retificador, recebendo energia em CA e a convertendo para CC com valores de tensão e corrente adequados para fazer a recarga. O OBC também deve se comunicar com o BMS com o objetivo de controlar o perfil de carga da bateria, garantindo que ela seja carregada corretamente (Khaligh; D'Antonio, 2019).

Em suma, os OBCs possibilitam a carga de EVs utilizando uma infraestrutura de CA já existente, como tomadas residenciais ou pontos de carga lenta. Embora a carga rápida seja mais potente, o OBC é fundamental pela conveniência de carregar o veículo em locais variados (Khaligh; D'Antonio, 2019).

2.3.5 *Sistema de Powertrain*

O sistema de *powertrain* é a parte do veículo responsável por gerar a força motriz e transmiti-la às rodas dele. Em veículos convencionais, a fonte de energia é o motor de combustão interna, e a potência e o torque produzidos pelo motor são transferidos para as rodas por componentes como embreagem, caixa de câmbio e diferencial, que também fazem parte do *powertrain* (Emadi, 2015).

Já em EVs, a energia elétrica é utilizada para gerar a propulsão. O principal componente do *powertrain* em um EV é o motor elétrico, responsável por converter a energia elétrica da

bateria de AT em mecânica para mover o veículo. Além disso, no EV, a bateria de AT também faz parte do sistema de *powertrain*, pois esta faz parte do processo de geração de movimento do veículo. Porém, não há mais necessidade da utilização de componentes como embreagem, caixa de câmbio e diferencial, devido às propriedades diferentes dos motores elétricos (Hayes; Goodarzi, 2018).

2.3.6 Bateria Auxiliar

A bateria auxiliar opera em BT, geralmente em 12 V, e está presente em todos os tipos de veículos, sejam eles elétricos ou a combustão. Essa bateria é responsável pela alimentação das cargas acessórias do veículo, como limpadores de para-brisa, faróis, sistema de rádio, entre outros, além de fornecer a tensão de polarização necessária ao funcionamento de diversos módulos de controle (Hasan *et al.*, 2011).

Geralmente, as baterias auxiliares são do tipo chumbo-ácido. Apesar de apresentarem menor densidade energética em comparação às baterias de íon-lítio, seu custo menor e a boa capacidade de realizar ciclos de carga e descarga sem atingir estados de carga SOC inferiores a 20% tornam-nas mais adequadas para essa aplicação (Farjah *et al.*, 2018) (Khaligh; Li, 2010).

2.3.7 Módulo Auxiliar de Potência - APM

Em um veículo a combustão, seu motor fornece torque a um alternador, que alimenta todo o sistema de BT, além de fornecer carga para a bateria auxiliar e, quando o motor é desligado, a bateria de 12V passa a ser a única fonte de energia para as cargas auxiliares (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

Porém, como os EVs possuem uma bateria principal de AT, o modo de operação desse sistema foi modificado; os alternadores, de eficiência baixa, foram substituídos por conversores CC/CC altamente eficazes que convertem a alta tensão da bateria principal para uma tensão inferior na bateria auxiliar. Esse conversor de energia é chamado de APM (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

2.3.8 Unidade de Distribuição de Potência - PDU

Um componente essencial para o funcionamento de todo EV é a Unidade de Distribuição de Potência (do inglês *Power Distribution Unit* - PDU). Esta é responsável por fazer a distribuição energética de AT, atuando tanto durante o processo de carga da bateria de tração quanto durante o funcionamento do veículo (Singhai; Bangar; Kirar, 2024).

Na PDU, usualmente, estão dispostos os fusíveis e contadores de AT, além do barramento da bateria de tração e os conectores (Singhai; Bangar; Kirar, 2024).

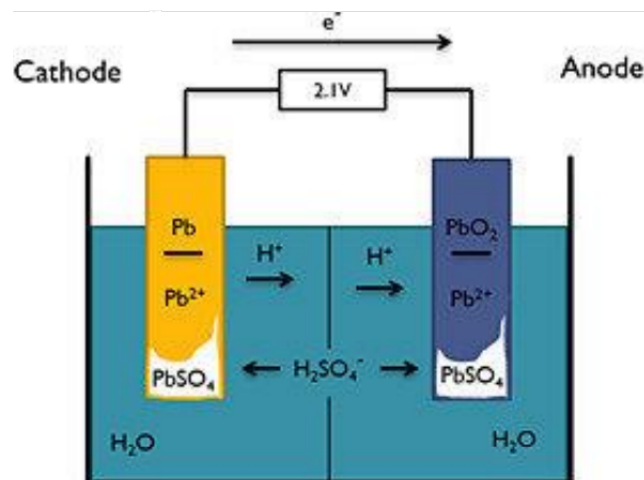
2.4 BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO

Como explicado na Seção 2.3.6, as baterias de chumbo-ácido são comumente as mais utilizadas para aplicações de BT em EVs. Assim, o presente tópico tem como objetivo explicar as propriedades e o funcionamento básico desse tipo de bateria.

Atualmente, a conscientização da sociedade a respeito de temas como o meio ambiente e a poluição vem aumentando significativamente. No entanto, paralelamente a esse processo, o consumo de baterias de chumbo-ácido também cresceu, resultando no aumento de resíduos descartados. Como o chumbo é um material tóxico, o desenvolvimento de técnicas para estender a vida útil dessas baterias vem sendo estudado nos últimos anos (Horkos; Yammine; Karami, 2015).

A Figura 17 mostra a estrutura básica de uma bateria de chumbo-ácido, composta pelas placas de chumbo e pela água no eletrólito.

Figura 17 – Estrutura básica bateria de chumbo-ácido.



Fonte: Vardhan *et al.* (2022)

2.4.1 Relaxamento de Tensão

Durante a operação de uma bateria, especialmente após um período de descarga, observa-se um fenômeno conhecido como relaxamento de tensão. Esse efeito consiste no aumento gradual da tensão terminal da bateria quando ela é deixada em repouso, mesmo na ausência de corrente de carga. Tal comportamento ocorre devido à difusão de íons e à redistribuição de concentração nos eletrodos e no eletrólito, processos que exigem tempo para alcançar o equilíbrio interno após a interrupção da corrente (Kim, 2006).

Essa recuperação da tensão pode levar à impressão incorreta de que o SOC está mais elevado do que realmente está, caso a medição da tensão seja realizada logo após a descarga. Estudos experimentais demonstram que a tensão em circuito aberto (do inglês *open-circuit voltage* — OCV) pode variar significativamente nos primeiros minutos de repouso, sendo

necessário um intervalo adequado para que essa leitura reflita com maior precisão o SOC real da bateria (Kim, 2006).

2.4.2 Técnicas de Carregamento de Baterias de Chumbo-Ácido

Para aumentar a vida útil das baterias, além de controlar o tempo de carga e o custo do carregamento, foram desenvolvidas diferentes técnicas para carregar esse tipo de bateria (Horkos; Yammine; Karami, 2015). Este tópico visa explicar o funcionamento dos principais métodos, explicitando suas vantagens e desvantagens.

Para uma melhor compreensão da argumentação desenvolvida, a seguir são explicados alguns conceitos básicos relacionados às técnicas de carregamento, conforme Serhan e Ahmed (2018):

- **Temperatura durante o carregamento:** é fundamental evitar a elevação da temperatura da bateria durante o processo de carregamento, a fim de minimizar os riscos de explosões causadas pela liberação de gases e evaporação durante as reações químicas;
- **Sobrecarga:** quando a bateria é carregada com uma tensão excessiva, o fluxo contínuo de corrente pode decompor a água no eletrólito, gerando calor e gases que reduzem a vida útil da bateria;

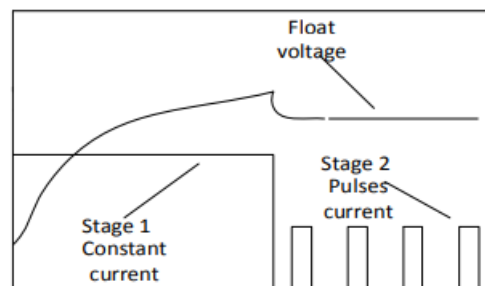
2.4.2.1 Carregamento por Corrente em Duas Etapas

Esse método de carregamento é composto por duas etapas. Na primeira, chamada de carga rápida, a corrente de carga flui pela bateria até que a tensão nos terminais atinja um determinado valor (tensão de *bulk*). Após atingir essa tensão, inicia-se a segunda etapa, chamada de manutenção, na qual são emitidos pulsos de corrente de carga na bateria que servem para compensar as perdas por autodescarga, sem atingir níveis de sobrecarga (Serhan; Ahmed, 2018).

A principal desvantagem desse método é o aumento da temperatura durante a primeira etapa, o que pode ser prejudicial à vida útil da bateria. Porém, o baixo pico de corrente na entrada é positivo para a bateria (Serhan; Ahmed, 2018).

A curva de carregamento por corrente em duas etapas é mostrada na Figura 18.

Figura 18 – Carga da bateria por corrente em duas etapas.



Fonte: Serhan e Ahmed (2018)

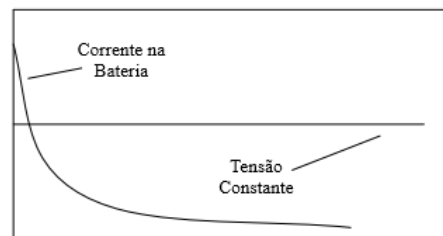
2.4.2.2 Carregamento por Tensão Constante

Esse método de carregamento é um dos de implementação mais simples. Durante a aplicação inicial de tensão constante, uma possível corrente elevada flui pela bateria. Essa corrente diminui com o tempo, conforme a bateria se carrega, até atingir um valor padrão. Essa técnica não causa aumento significativo da temperatura. No entanto, existe risco de sobrecarga, o que pode ser prejudicial para os dispositivos (Serhan; Ahmed, 2018).

Contudo, a corrente elevada no início da carga, mesmo que seja fisicamente limitada, é o principal problema desse método, pois é prejudicial a longo prazo para as baterias (Serhan; Ahmed, 2018).

A curva de carregamento por tensão constante é mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Carga da bateria por tensão constante.



Fonte: Serhan e Ahmed (2018)

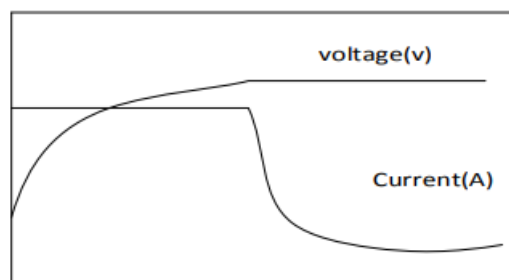
2.4.2.3 Carregamento em Duas Etapas

Como o principal problema do carregamento por corrente constante ocorre na parte final da carga, enquanto no carregamento por tensão constante ocorre na etapa inicial, o carregamento em duas etapas une o melhor desses dois processos (Serhan; Ahmed, 2018).

Na primeira etapa, uma corrente constante flui pela bateria até que ela atinja a tensão de *bulk*. Ao atingir esse valor de tensão, inicia-se a segunda etapa, na qual uma tensão constante é aplicada à bateria, de modo que a corrente diminua até que ela atinja sua carga máxima (Serhan; Ahmed, 2018).

A curva de carregamento em duas etapas é mostrada na Figura 20.

Figura 20 – Carga da bateria em duas etapas.



Fonte: Serhan e Ahmed (2018)

2.5 ASPECTOS ESSENCIAIS PARA UM CONVERSOR APM

Na Seção 2.3.7 foi explicado o que é e qual o funcionamento básico de um conversor APM. Porém, apesar de qualquer conversor CC/CC abaixador teoricamente conseguir realizar essa função, existem alguns aspectos essenciais necessários para um conversor APM. Neste tópico, serão apresentados esses aspectos, assim como os motivos que os tornam necessários, segundo Wang, Zheng e Bauman (2023), são eles:

- Alta potência e corrente de saída;
- Alta confiabilidade;
- Alta eficiência;
- Alta densidade de potência;
- Capacidade de suportar grandes variações de tensão na entrada e saída;
- Possuir isolamento galvânica;
- Preferencialmente ter operação bidirecional.

2.5.1 Alta potência e corrente de saída

Com o aumento da tecnologia na montagem de veículos, surgem cada vez mais cargas de BT, à medida que mais recursos acessórios de luxo são integrados ao veículo. Além das cargas convencionais como direção assistida, limpador de para-brisa e sistemas eletrônicos de vidros, hoje recursos extras, como tetos solares elétricos e sistema de suspensão ativa, aumentam a demanda de BT do veículo, podendo passar de 3kW (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

Portanto, a capacidade de suportar valores altos de potência e corrente na saída deve ser uma das considerações no desenvolvimento de APMs. Devido à tensão baixa de saída, a potência, não tão alta, implica em uma elevada corrente (Wang; Zheng; Bauman, 2023), pois, em um caso hipotético com cargas de 3kW em tensão de 12V, a corrente de saída será de 250A (Hou *et al.*, 2015).

2.5.2 Alta Confiabilidade

A confiabilidade do conversor é outro aspecto essencial para um APM, especialmente para as unidades de comunicação e controle do veículo. Uma das soluções para lidar com esse problema é a implementação de métodos proativos de monitoramento de vida útil dos componentes, de modo a avisar com antecedência a existência de um problema (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

2.5.3 Alta Eficiência

Considerando o mesmo caso hipotético apresentado na seção 2.5.1, a alta corrente de saída do conversor gera perdas elevadas, então, é de suma importância escolher uma topologia que maximize a eficiência da conversão (Hou *et al.*, 2015).

2.5.4 Alta Densidade de Potência

Devido à limitação de espaço e visando minimizar o excesso de peso no veículo, uma alta densidade de potência é vital para o desenvolvimento do APM (Zhou *et al.*, 2021). Essa é a relação entre a potência do conversor e o seu volume, usualmente é dada em kW/L.

2.5.5 Variações na Tensão de Entrada e Saída

Outro fator essencial para um conversor APM é a capacidade de operar com uma alta variação de tensão tanto no lado de AT quanto no de BT. Em um EV convencional com bateria de AT de 400V nominal, a tensão de entrada do APM pode variar de 250V a 450V, e a saída de 10V a 16V dependendo do estado de carga da bateria de tração e auxiliar (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

2.5.6 Isolação Galvânica

Por questões de segurança, é necessário que os APMs possuam isolamento galvânica, um transformador entre o primário e o secundário do conversor serve para isolá-lo do sistema da bateria de AT (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

2.5.7 Operação Bidirecional

Apesar de não ser essencial, ter a capacidade de operar bidirecionalmente é muito importante para o desenvolvimento de um conversor APM. Um dos principais motivos para essa operabilidade é a possibilidade do APM fazer a pré-carga dos capacitores do barramento de AT antes de conectá-lo à bateria de tração (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

Sem essa função, é necessário implementar um circuito de pré-carga somente para realizar essa tarefa, o que, além de aumentar o número de componentes, também diminui a confiabilidade do sistema, uma vez que seriam utilizados relés mecânicos para a realização do processo (Wang; Zheng; Bauman, 2023).

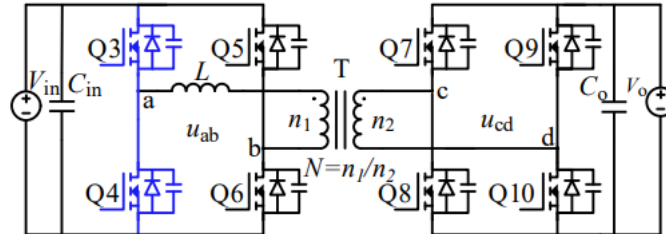
2.6 CONVERSORES MAIS COMUNS

Neste tópico serão apresentadas as topologias mais utilizadas para APMs, destacando seu funcionamento, vantagens e desvantagens para aplicações unidirecionais e bidirecionais.

2.6.1 Aplicação Bidirecional

Quando o conversor APM do EV é bidirecional, a principal escolha é o conversor *Dual Active Bridge* (DAB), apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Conversor DAB.



Fonte: Xu *et al.* (2020)

Este conversor consiste em dois inversores Ponte-Completa (do inglês *Full-Bridge* - FB), com a saída CA magneticamente acoplada por um transformador. Assim, enquanto o lado de AT fornece energia para o de BT, a tensão CC V_{in} passa pelo inversor e aparece como CA sobre o enrolamento primário do transformador. Essa tensão é refletida para o lado secundário dele, alterada pela relação de espiras $\frac{N_s}{N_p}$ e é retificada pelo conversor FB de saída, voltando a ser CC, com tensão igual a V_o (Krismer; Kolar, 2009).

Como o conversor é simétrico, quando o lado de BT fornece energia para o de AT, o processo é o mesmo, apenas trocando a entrada pela saída da primeira análise.

Segundo Krismer e Kolar (2009), a escolha desse conversor para aplicações bidirecionais passa por 3 pontos principais, sendo eles:

- O baixo número de componentes passivos, somente um transformador com indutor integrado e dois capacitores de bloqueio de tensão, evitando assim a necessidade de utilizar um indutor grande, que baixaria significativamente a densidade de potência;
- O alto potencial a respeito de otimização de eficiência ou densidade de potência, pois, através da otimização da relação de espiras, indutância magnetizante e dos métodos de modulação, é possível reduzir as perdas de condução, perdas nas chaves e/ou valor da corrente eficaz no capacitor;
- O DAB opera com propriedades de comutação suave, possibilitando a atuação com elevadas frequências de comutação, o que diminui significativamente o tamanho do transformador, e, consequentemente, do conversor.

Um dos pontos positivos desse conversor é a capacidade de operar em regime de comutação com tensão nula (do inglês *Zero Voltage Switching* - ZVS), a partir de pequenas modificações em sua topologia, conforme descrito por Wang, Zheng e Bauman (2023).

2.6.2 Aplicação Unidirecional

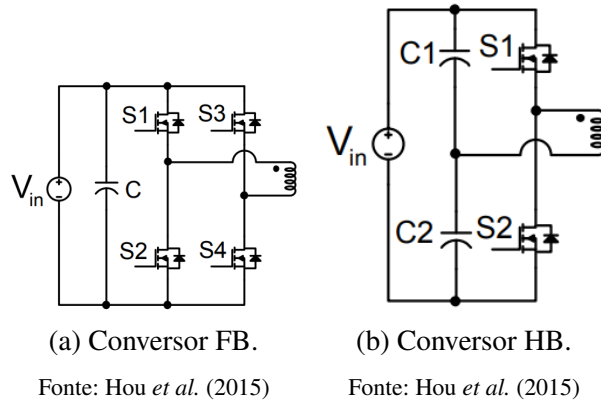
Para aplicações unidirecionais, como o lado de AT e o de BT não possuem as mesmas demandas, é comum projetar um conversor assimétrico, onde a topologia escolhida para o lado primário é diferente da escolhida para o secundário.

Assim, para facilitar o entendimento da escolha do conversor, esta seção será dividida em duas partes, a topologia de entrada e a de saída do conversor.

2.6.2.1 Topologia de Entrada

Para o lado de AT do APM, usualmente a topologia escolhida é a de um inversor FB, cujo funcionamento foi explicado na Seção 2.6.1, ou um inversor Meia-Ponte (do inglês *Half-Bridge* - HB). Esses estão respectivamente representados nas Figuras 22(a) e 22(b).

Figura 22 – Topologias de entrada.



O circuito FB normalmente é o mais utilizado entre os dois, por ser simples e robusto e por suprir as demandas de densidade energética e potência. O conversor HB geralmente é descartado pois, apesar de precisar de duas chaves a menos que o FB, estas chaves precisam suportar o dobro de corrente, e a tensão sobre elas é a mesma que no conversor FB, V_{in} (Hou *et al.*, 2015).

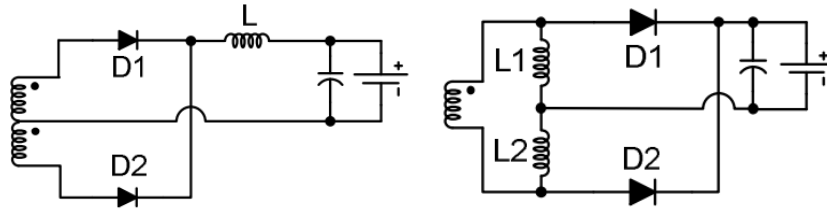
Então, a topologia mais utilizada na entrada de um conversor APM unidirecional é o FB. Nesta, a tensão sobre as chaves é igual à tensão de entrada, aumentando a gama de chaves que podem ser escolhidas. Além disso, o ZVS pode ser atingido nesse conversor através do deslocamento de fase, do mesmo modo que no conversor DAB (Hou *et al.*, 2015).

2.6.2.2 Topologia de Saída

O principal fator para a escolha de uma topologia para o lado de BT do APM é a redução das perdas, devido à elevada corrente que circula nesse estágio, conforme discutido na Seção 2.5.1.

Assim como no lado de AT, existem duas topologias populares para essa aplicação: o retificador com *tap* central e o retificador dobrador de corrente. Essas configurações estão representadas, respectivamente, nas Figuras 23(a) e 23(b).

Figura 23 – Topologias de saída.



(a) Retificador com *tap* central. (b) Retificador dobrador de corrente.

Fonte: Hou *et al.* (2015)

Fonte: Hou *et al.* (2015)

É importante destacar que as figuras representam apenas a etapa retificadora do conversor, sem incluir o estágio de entrada. No entanto, as considerações a seguir referem-se ao funcionamento do sistema completo, incluindo o estágio de chaveamento no primário do transformador.

O retificador dobrador de corrente utiliza dois diodos e dois indutores, ambos operando na mesma frequência de comutação. Por outro lado, o retificador com *tap* central também emprega dois diodos, mas apenas um indutor, que opera com o dobro da frequência de chaveamento (Hou *et al.*, 2015).

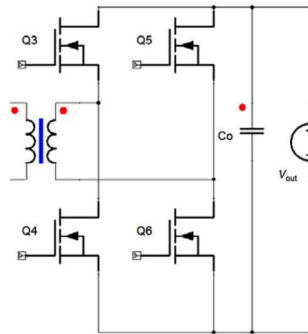
Em relação às perdas, o retificador com *tap* central tende a apresentar menores perdas no indutor quando comparado à topologia de dobrador de corrente. No entanto, os dois indutores desta última podem ser integrados em um único núcleo magnético, reduzindo o volume total e as perdas, tornando seu desempenho comparável ao da topologia com derivação central (Hou *et al.*, 2015).

Do ponto de vista do transformador, o retificador dobrador de corrente apresenta vantagens, pois requer apenas um enrolamento secundário, ao passo que a topologia com *tap* central exige um enrolamento duplo. A menor quantidade de enrolamentos permite reduzir as perdas por condução e simplificar as conexões em aplicações de alta corrente, como é o caso da saída do APM. Além disso, os dois indutores podem ser integrados ao transformador, o que contribui ainda mais para a compactação do conjunto (Hou *et al.*, 2015).

Portanto, considerando que no lado de BT do APM a tensão é baixa e a corrente elevada, a topologia mais adequada para esse estágio é o retificador dobrador de corrente (Hou *et al.*, 2015).

Além dessas topologias, também é possível a utilização de um retificador síncrono convencional, representado na Figura 24. Apesar de não ser tão eficiente quanto os anteriores, ele visa reduzir as perdas de condução de um retificador convencional, substituindo os diodos de saída por transistores MOSFET. Essa técnica torna-se especialmente relevante em aplicações de baixa tensão e alta corrente, como no lado de BT do APM, onde as quedas de tensão nos diodos convencionais resultam em perdas significativas (Duan *et al.*, 2015).

Figura 24 – Retificador síncrono.

Fonte: Duan *et al.* (2015)

2.6.2.3 Conversor Final Unidirecional

Dessa forma, o conversor mais adequado para a aplicação unidirecional de um APM é o *Full Bridge Current Doubler* (FBCD), que consiste na combinação de um inversor FB em ponte completa com um retificador dobrador de corrente (Hou *et al.*, 2015).

Contudo, a adoção de uma determinada tecnologia em projetos comerciais nem sempre corresponde à solução tecnicamente ideal. A escolha tecnológica é influenciada por uma série de fatores que vão além da eficiência ou desempenho, incluindo custos de desenvolvimento, restrições de patentes, disponibilidade de recursos e estratégias empresariais (Tidd; Pavitt, 2011). Assim, mesmo que uma topologia apresente vantagens técnicas, sua adoção em larga escala pode ser limitada por questões econômicas, operacionais ou legais, levando as empresas a optarem por alternativas mais acessíveis ou práticas para o contexto de um projeto específico (Ferreira; Guimarães; Contador, 2009).

2.7 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Os veículos modernos utilizam diversos protocolos de comunicação para permitir a troca de informações entre sensores e atuadores. Um dos principais é o *Local Interconnect Network* (LIN), amplamente utilizado em aplicações mais simples, nas quais o tempo de resposta não é um fator crítico da comunicação (Rathore *et al.*, 2022). Sua principal aplicação é a comunicação entre a ECU central e os diversos sensores do veículo (S *et al.*, 2024). Para redes veiculares mais complexas, que envolvem um maior número de componentes e exigem tempos de resposta mais baixos, o protocolo mais comumente utilizado é o *Control Area Network* (CAN), devido à sua simplicidade e baixo custo (Rathore *et al.*, 2022).

2.7.1 Modelo OSI

O modelo *Open Systems Interconnection* (OSI) foi desenvolvido pela Organização Internacional para Padronização (do inglês *International Organization for Standardization* - ISO)

com o objetivo de estabelecer um padrão na estrutura de comunicação em redes computacionais, dividindo o processo em sete camadas distintas (Matheus, 2018), conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – 7 camadas do modelo OSI.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Neste modelo, cada camada possui uma função específica para estabelecer a comunicação. De maneira resumida, a função que cada camada deve exercer está descrita conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição das camadas do modelo OSI.

Camada	Função	Exemplos
Física	Transmissão física de sinais	Fibra ótica, Cabo de cobre, Ar
Enlace	Enlace entre dois dispositivos. Controle de erros, quadros e acesso ao meio	<i>Ethernet</i>
Rede	Roteamento, endereçamento e encaminhamento entre redes	IPv4, IPv6
Transporte	Entrega confiável e rápida dos dados, controlando o fluxo e os erros de transmissão	<i>Transmission Control Protocol (TCP), User Datagram Protocol (UDP)</i>
Sessão	Gerencia sessões, conexões e sincronização entre diferentes aplicações	<i>Network File System (NFS), Server Message Block (SMB)</i>
Apresentação	Formatação, criptografia, compressão e tradução de dados	<i>Hypertext Markup Language (HTML), JavaScript Object Notation (JSON)</i>
Aplicação	Interface direta com o usuário. Define os protocolos de serviços	<i>HyperText Transfer Protocol (HTTP), Simple Mail Transfer Protocol (SMTP)</i>

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Amazon (2024)

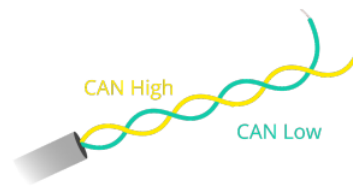
2.7.2 Protocolo CAN

No começo da indústria automobilística, todos os subsistemas do veículo eram conectados por cabos dedicados a eles. Porém, com o aumento do número de sistemas eletrônicos veiculares,

esta solução se tornou inviável, devido à alta quantidade de cabos necessários para interligar todos eles (Nolte; Hansson; Bello, 2005).

Para solucionar este problema, no início da década de 1980, o grupo alemão *BOSCH Corporation* desenvolveu o protocolo de comunicação CAN, que consegue interligar diversos sistemas com somente dois cabos convencionais, CANH e CANL (Ran *et al.*, 2010). Estes devem estar trançados na instalação conforme apresentado na Figura 26.

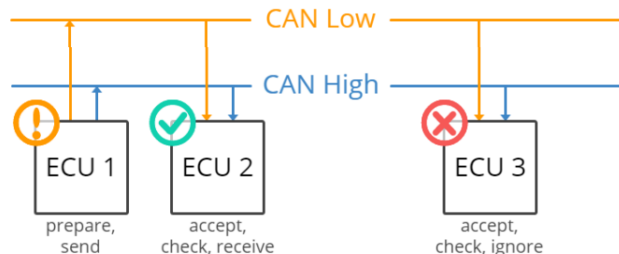
Figura 26 – Cabos CANH e CANL.



Fonte: CCS (2023)

Neste protocolo, todos os "nós" ou ECUs do veículo atuam como parte de um todo, interligados pela rede CAN, de modo que informações transmitidas por qualquer componente podem ser compartilhadas com qualquer outro, e cabe a cada ECU verificar os dados transmitidos e decidir se deve recebê-los ou ignorá-los (CCS, 2023). Uma representação de um barramento CAN é representada na Figura 27.

Figura 27 – Barramento CAN.



Fonte: CCS (2023)

A comunicação CAN utiliza sinais analógicos diferenciais no seu barramento para representar os níveis lógicos 1 e 0. Existem dois estados lógicos principais no barramento CAN, o estado dominante e o recessivo (Zhang *et al.*, 2024).

O estado dominante representa o nível lógico 0 (*LOW*), neste, a tensão em CANH é de aproximadamente 3,5V, enquanto a em CANL é de 1,5V, de modo que a diferença entre eles seja de 2V. Já o estado recessivo representa o nível lógico 1 (*HIGH*), neste, tanto o CANH quanto o CANL são fixados em $\frac{1}{2}$ de V_{DD} , aproximadamente 2,5V (Zhang *et al.*, 2024). Tal lógica é mostrada na Figura 28.

A técnica de sinais analógicos diferenciais em combinação com o entrelaçamento dos cabos CANH e CANL, reduz significativamente o ruído da transmissão, pois, conforme apresen-

Quadro 2 – Função de cada campo do *frame* CAN.

Campo	Função
<i>Start of Frame</i> (SOF)	Início do <i>frame</i> . Um '0 dominante' sinaliza que um nó quer iniciar a transmissão
<i>Identifier</i> (ID)	Identificador do <i>frame</i> . Valores mais baixos tem maior prioridade
<i>Remote Transmission Request</i> (RTR)	Indica se o nó quer enviar dados ou apenas solicitar dados de outro nó
<i>Control</i>	Contém o <i>bit</i> de extensão do identificador (do inglês <i>Identifier Extension Bit</i> - IDE) que é '0 dominante' caso o ID tenha 11 <i>bits</i> . E o código de tamanho dos dados (do inglês <i>Data Length Code</i> - DLC) que especifica o tamanho dos <i>bytes</i> de dados (0 a 8 <i>bytes</i>)
<i>Data</i>	Contém os dados transmitidos (<i>payload</i>) que pode ser extraído e decodificado para obter a informação transmitida seu número de <i>bytes</i> é definido pelo DLC
<i>Cyclic Redundancy Check</i> (CRC)	Verifica a integridade dos dados por meio do código de redundância cíclica
<i>Acknowledge</i> (ACK)	Confirma que os dados foram recebidos corretamente por outros nós
<i>End of Frame</i> (EOF)	Indica o fim do quadro CAN

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CCS (2023)

with flexible data-rate (CAN FD) e o desenvolvido pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos (do inglês *Society of Automotive Engineers* - SAE), SAE J1939 (CCS, 2023).

2.7.2.1 SAE J1939

O protocolo SAE J1939 é comumente utilizado para a comunicação entre ECUs de veículos pesados, como caminhões, ônibus, máquinas agrícolas, máquinas de construção, entre outras. Ele fornece um método padronizado para a comunicação CAN, servindo como uma linguagem comum entre fabricantes distintos (CCS, 2023).

O padrão SAE J1939 utiliza dois conceitos principais para organizar e identificar os dados transmitidos na rede CAN, sendo eles, os *Parameter Group Numbers* (PGNs) e os *Suspect Parameter Numbers* (SPNs). O PGN é um identificador de 18 *bits* que faz parte do CAN ID da mensagem, ele serve como um identificador para o grupo de parâmetros que uma mensagem contém. Por exemplo, o PGN 61444 identifica o grupo de parâmetros relacionados ao *Electronic Engine Controller 1* (EEC1) (CCS, 2023).

Já o SPN indica um parâmetro de dado individual contido nos *bytes* de dados da mensa-

gem J1939. Os SPNs são definidos por sua posição inicial (*bit start*), comprimento, escala, *offset* e unidade. Essas definições são utilizadas para extrair o valor bruto correspondente a esse parâmetro dos *bytes* de dados da mensagem e convertê-lo em um valor físico real (como a velocidade de um motor em Rotações por Minuto (RPM) ou a temperatura em graus Celsius), utilizando a escala e o *offset* especificados. Em suma, o PGN informa o tipo de mensagem transmitida, e o SPN quais os parâmetros específicos estão na mensagem, além de como interpretar os seus valores brutos (CCS, 2023).

Além disso, de acordo com CCS (2023), algumas outras características importantes deste padrão são:

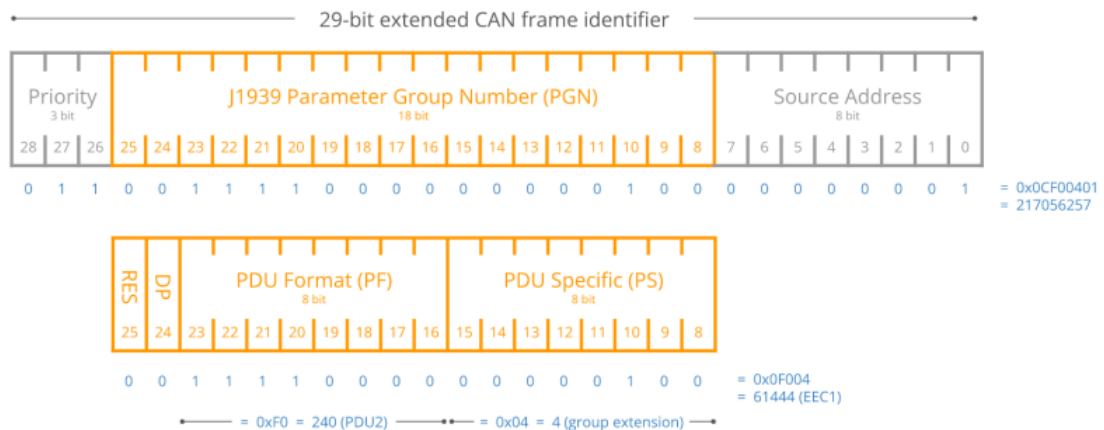
- Taxa de transmissão de 250 quilo *bits* por segundo (Kbps) (embora haja suporte para 500 Kbps);
- O J1939 suporta variáveis de múltiplos *bytes* (até 8 *bytes*) dentro de uma única mensagem padrão. Porém, é possível transmitir dados maiores usando um protocolo de transporte que permite o envio de mensagens de até 1785 *bytes* divididas em múltiplos pacotes.

De acordo com Copperhill (s.d.), as mensagens transmitidas neste protocolo utilizam um CAN ID estendido, de 29 *bits*. Dentro deste ID estão contidas algumas informações cruciais sobre a mensagem, sendo elas:

- *Priority*: 3 *bits* que definem o grau de importância da mensagem, quanto menor o valor, maior a sua prioridade;
- (PGN): 18 *bits* que servem como um identificador único do *frame*, podendo conter alguns parâmetros importantes relacionados a quem envia a mensagem. Este é dividido em:
 - *Reserved*: 1 *bit* reservado para uso futuro;
 - *Data Page (DP)*: 1 *bit* que permite expandir a quantidade de PGNs disponíveis, quando ativado, ele muda o conjunto de mensagens interpretadas na rede;
 - *Protocol Data Unit Format (PF)*: 8 *bits* cuja função é indicar se a mensagem é endereçada a um destino específico (caso PF seja menor que 240) ou se é do tipo *broadcast* (caso PF seja maior ou igual a 240);
 - *Protocol Data Unit Specific (PS)*: 8 bits cuja função está diretamente relacionada com o valor de PF. Se PF for menor que 240 (mensagem endereçável), o campo PS contém o endereço de destino da mensagem. Já se PF for maior ou igual a 240 (mensagem *broadcast*) o campo PS passa a ser uma extensão de grupo, funcionando como um identificador adicional que diferencia subgrupos ou categorias dentro do PGN.
- *Source Address (SA)*: 8 *bits* que indicam o endereço da ECU que enviou a mensagem.

A estrutura do ID CAN do padrão SAE J1939 é mostrada na Figura 31.

Figura 31 – Estrutura do CAN ID SAE J1939.



Fonte: CCS (2023)

2.8 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Este capítulo desenvolveu a base teórica utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente, foi apresentada uma breve explicação sobre o funcionamento dos principais tipos de EVs utilizados mundialmente, seguida de uma análise atual do mercado de veículos elétricos, tanto em âmbito global quanto nacional.

Foram também descritos os principais componentes de um EV, com explicações sobre sua funcionalidade e importância. Entre esses, destaca-se o conversor APM, cuja descrição abrangeu as principais características desejáveis nesse tipo de conversor, além de uma análise das topologias mais utilizadas na indústria de EVs.

Ainda neste capítulo, abordaram-se as baterias chumbo-ácido, amplamente utilizadas nos sistemas de BT dos veículos. Foram apresentadas as principais técnicas de carregamento, bem como características relevantes desse tipo de bateria.

Por fim, foram descritos os principais protocolos de comunicação empregados em veículos elétricos, com ênfase no protocolo CAN, padrão SAE J1939. A abordagem contemplou desde a estrutura das mensagens transmitidas até os aspectos físicos da montagem do barramento de comunicação.

Portanto, os conceitos e análises apresentados neste capítulo fornecem o embasamento técnico necessário para o desenvolvimento do sistema proposto. Essa fundamentação sustenta as decisões de projeto adotadas e estabelece uma base consistente para as etapas práticas, que serão abordadas no próximo capítulo.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO PARA IMPLEMENTAR O APM

Neste capítulo será explicada a especificação e a montagem do APM, assim como os sistemas periféricos necessários para o seu funcionamento, apresentando os projetos e escolhas tomadas durante o processo.

3.1 ESCOLHA DO MÓDULO AUXILIAR DE POTÊNCIA - APM

Esta seção aborda o processo de escolha do APM, explicando o passo a passo da tomada de decisão, além de fornecer um comparativo entre os principais modelos disponíveis no mercado.

3.1.1 Levantamento de cargas

Como a van eletrificada será do tipo HEV plug-in TTR (modelo explicado na Seção 2.1.3.3), ela já possui um sistema com bateria de BT e um alternador, sendo que as cargas já existentes antes da eletrificação continuarão a ser alimentadas pelo sistema do alternador, uma vez que este já está instalado no veículo.

Um outro sistema com bateria de BT e o APM será instalado para suprir as cargas decorrentes da eletrificação, sendo elas:

- VCU FT450 (modelo escolhido para ser utilizado como VCU do veículo);
- Eletroventilador do radiador do veículo;
- Bomba de água maior (8A em 0 Bar);
- Bomba de água menor (2,1 A em 0 Bar);
- Inversor WEG CVW500;
- BMS da bateria de AT;
- ECU auxiliar (responsável por fazer as funções não incluídas na FT450, como habilitar o carregamento das baterias de AT e BT e comunicar com o BMS).

A Tabela 1 apresenta os valores máximos de corrente consumida por cada carga, conforme especificado em seus respectivos datasheets.

Adotando 14 V como o pior caso de tensão de alimentação — valor comumente imposto pelo método de carga a tensão constante, conforme descrito na Seção 2.4.2.2 — e considerando as correntes máximas consumidas por cada carga, conforme indicadas na Tabela 1, a potência total máxima consumida pelo sistema, correspondente ao pior caso de operação, é calculada pela Equação 1.

$$P_{BT} = V_{BT} \cdot I_{BT} = 14 \cdot (10 + 16 + 17 + 3 + 10 + 0,4 + 0,5) = 796,6W \quad (1)$$

Onde, P_{BT} , V_{BT} e I_{BT} são respectivamente a potência, a tensão e a corrente do sistema de BT.

Tabela 1 – Corrente máxima das cargas de BT conforme os respectivos *datasheets*.

Carga	Corrente (A)
FT450 (VCU)	10
Eletroventilador	16
Bomba Maior	17
Bomba Menor	3
Inversor	10
BMS	0,4
ECU auxiliar	0,5

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos *datasheets* dos dispositivos (2025)

Portanto, a demanda de potência para o APM é baixa, e um conversor com 1 kW supre esta demanda com margem de expansão.

3.1.2 Busca no Mercado Nacional

A primeira etapa na escolha do melhor modelo de APM foi procurar por alternativas no mercado nacional. Conhecer os produtos comercializados no país facilita a referência aos padrões da indústria, além de simplificar questões de impostos e suporte ao cliente.

Após uma pesquisa de mercado, foram encontradas duas empresas brasileiras que forneciam esses conversores: *Fueltech*, de Porto Alegre, e *Swap-e*, de Florianópolis. No entanto, ao entrar em contato, constatou-se que ambas apenas importavam os produtos. Assim, as vantagens de adquirir um produto nacional deixaram de existir, tornando a importação direta a melhor opção.

3.1.3 Principais Modelos Encontrados

Neste tópico serão elencados os modelos de APM das principais fornecedoras mundiais que melhor se enquadram no contexto do trabalho.

Entrando em contato com as empresas, foi constatado que não é usual trabalhar com conversores APMs bidirecionais no meio comercial, e nenhuma delas possuía modelos deste tipo.

3.1.3.1 Dilong

A *Dilong New Energy Technology* atua há mais de 23 anos no desenvolvimento de carregadores embarcados, conversores CC-CC e soluções integradas para EVs. Fornece seus produtos para *Volvo*, *Honda* e *Ford*, atendendo mais de 400 clientes globalmente (Dilong, 2024a).

O melhor modelo desta fabricante no contexto deste projeto é o DE1000S9G - 60S14RC, mostrado na Figura 32. Este equipamento possui 1kW de potência, eficiência máxima de 88% e variação na tensão de entrada de 220 Vcc a 410 Vcc. Sua proteção é IP67 e possui resfriamento natural.

Figura 32 – DE1000S9G-360S14RC.



Fonte: *Dilong* (2024)

A Tabela 2 mostra as principais características deste conversor.

Tabela 2 – Características do conversor DE1000S9G-360S14RC.

DE1000S9G-360S14RC	
Tensão Nominal de Entrada	360Vcc
Faixa de Tensão de Entrada	220Vcc~410Vcc
Máxima Corrente de Entrada	6A (Vin=220Vcc)
Tensão Nominal de Saída	14Vcc
Faixa de Tensão de Saída	14Vcc (Não ajustável)
Faixa de Corrente de Saída	5A~72A
Método de Carga da Bateria	Corrente Constante Tensão Constante
Potência Nominal	1000W
Máxima Eficiência	88%

Fonte: Elaborada pelo autor com base em *Dilong* (2024)

Além disso, este conversor utiliza comunicação CAN, e realiza comutação automática entre os métodos de carga com tensão constante e corrente constante (Dilong, 2024b). Seu preço, sem considerar frete e tributos de importação, é de US\$ 980.

3.1.3.2 Tianjin Yidingfeng Powertrain Technology Co., Ltd. - EVPT

A Tianjin Yidingfeng Powertrain Technology Co., Ltd. (EVPT) é especializada em controladores e conversores para EVs, fornecendo soluções para empresas como *Stellantis*, *VALEO* e *SGMW* (EVPT, 2024).

O melhor modelo desta fabricante no contexto deste projeto é o TDC-IY-320-12, mostrado na Figura 33. Este equipamento possui 1kW de potência, eficiência máxima de 94% e variação na tensão de entrada de 220 Vcc a 450 Vcc. Sua proteção é IP67 e possui resfriamento natural.

Figura 33 – TDC-IY-320-12.



Fonte: EVPT, 2023

A Tabela 3 mostra as principais características deste conversor.

Tabela 3 – Características do conversor TDC-IY-320-12.

TDC-IY-320-12	
Tensão Nominal de Entrada	320Vcc
Faixa de Tensão de Entrada	220Vcc~450Vcc
Máxima Corrente de Entrada	8A
Tensão Nominal de Saída	14Vcc
Faixa de Tensão de Saída	8Vcc~15Vcc
Faixa de Corrente de Saída	5A~72A
Método de Carga da Bateria	Não Especificado
Potência Nominal	1000W
Máxima Eficiência	94%

Fonte: Elaborada pelo autor com base em EVPT, 2023

Além disso, este conversor utiliza comunicação CAN, e gerencia automaticamente o processo de carregamento da bateria de BT (EVPT, 2023). Seu preço, sem considerar frete e tributos de importação, é de US\$ 200.

3.1.3.3 Delta

Fundada em 1971, a *Delta* é uma fornecedora global de conversores e eletrônica de potência para EVs, com foco em eficiência energética e inovação (Delta, 2024).

O melhor modelo desta fabricante no contexto deste projeto é o mostrado na Figura 34, cujo nome não foi informado pela fabricante. Este equipamento possui 2,5kW de potência, eficiência máxima de 95% e variação na tensão de entrada de 200 Vcc a 480 Vcc. Sua proteção é IP67 e requer um sistema de resfriamento líquido.

Figura 34 – Conversor da *Delta*.



Fonte: *Delta* (2024)

A Tabela 4 mostra as principais características deste conversor.

Tabela 4 – Características do conversor da *Delta*.

Conversor da Delta	
Tensão Nominal de Entrada	400Vcc
Faixa de Tensão de Entrada	200Vcc~480Vcc
Máxima Corrente de Entrada	11,5A
Tensão Nominal de Saída	14Vcc
Faixa de Tensão de Saída	9Vcc~16Vcc
Máxima Corrente de Saída	180A
Método de Carga da Bateria	Não Especificado
Potência Nominal	2500W
Máxima Eficiência	95%

Fonte: Elaborada pelo autor com base em *Delta* (2024)

Além disso, este conversor utiliza comunicação CAN (Delta, 2024), porém, o *datasheet* não especifica qual o método de carregamento da bateria BT utilizado. O seu preço também não foi informado pelo fabricante.

3.1.3.4 OVAR

A *Ovar Technology Co., Ltd.*, fundada em 2010, fabrica conversores CC-CC, carregadores e inversores, fornecendo para montadoras como *Jianghuai Automobile Corporation* (JAC) *Motors*, *Porsche*, *Bayerische Motoren Werke* (BMW) e *Caoa Chery* (OVAR, 2017).

O melhor modelo desta fabricante no contexto deste projeto é o RD1P2360, porém a empresa não disponibilizou imagens do produto. Este equipamento possui 1,2kW de potência, eficiência máxima de 92% e variação na tensão de entrada de 200 Vcc a 450 Vcc. Sua proteção é IP67 e possui um sistema próprio de ventilação a ar.

A Tabela 5 mostra as principais características deste conversor.

Tabela 5 – Características do conversor RD1P2360.

RD1P2360	
Tensão Nominal de Entrada	400Vcc
Faixa de Tensão de Entrada	200Vcc~450Vcc
Máxima Corrente de Entrada	Não Especificado
Tensão Nominal de Saída	14Vcc
Faixa de Tensão de Saída	Não Especificado
Máxima Corrente de Saída	100A
Método de Carga da Bateria	Não Especificado
Potência Nominal	1200W
Máxima Eficiência	92%

Fonte: Elaborada pelo autor com base em OVAR, [s.d.]

Além disso, este conversor utiliza comunicação CAN (OVAR, s.d.), porém, o *datasheet* não especifica qual o método de carregamento da bateria BT utilizado. Seu preço, sem considerar frete e tributos de importação, é de US\$ 418.

3.1.4 Comparativo entre os Modelos

Como o modelo da *Delta* opera exclusivamente com refrigeração líquida, sua adoção foi descartada. Isso se deve ao fato de o sistema de arrefecimento da van já operar próximo de sua capacidade máxima, e a implementação de um circuito paralelo dedicado ao conversor acarretaria um aumento significativo nos custos de instalação.

Dessa forma, este capítulo apresenta uma comparação detalhada entre os modelos DE1000S9G-360S14RC, TDC-IY-320-12 e RD1P2360. A análise será organizada em seções distintas, com o objetivo de abranger o maior número possível de aspectos técnicos e operacionais relevantes.

3.1.4.1 Dimensões e Peso

Conforme explicado na Seção 2.5.4, um dos principais aspectos a se considerar na compra de um APM é a sua densidade de potência. Sob este viés, a Tabela 6 compara as medidas e o peso entre as opções de conversores.

Tabela 6 – Comparativo Tamanho e Peso.

Modelos	Fabricantes	Dimensões (cm)	Volume (L)	Peso (kg)	Densidade de Potência (kW/L)	Densidade de Potência (kW/kg)
TDC-IY-320-12	EVPT	27,8 x 15,9 x 7,3	3,23	2,5	0,310	0,40
DE1000S9G-360S14RC	Dilong	33,2 x 16,4 x 6,0	3,27	4	0,306	0,25
RD1P2360	OVAR	27,7 x 15,1 x 9,9	4,14	4	0,290	0,25

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Dilong (2024b); EVPT (2023); OVAR (s.d.)

A densidade de potência volumétrica dos três conversores é similar, o TDC-IY-320-12 é levemente superior aos demais. Porém, ao tratar da densidade de massa, o APM da EVPT é significativamente superior, tendo uma melhora de 60% em comparação aos seus concorrentes.

3.1.4.2 Limites de Temperatura e Umidade do Ar

Como o clima no estado de Santa Catarina é majoritariamente subtropical úmido, a região pode apresentar elevados índices de temperatura e umidade relativa do ar a depender da época do ano. Assim, é de suma importância comparar os limites destes fatores entre os modelos pré-selecionados, de modo a mitigar os riscos de danificação dos equipamentos.

A Tabela 7 compara os limites de operação dos conversores.

Tabela 7 – Comparativo Limites de Temperatura e Umidade do Ar.

Modelos	Temperatura de Operação Máxima (°C)	Umidade do Ar Máxima de Operação (%RH)	Temperatura de Desligamento (°C)
TDC-IY-320-12	65	95	90
DE1000S9G-360S14RC	60	85	85±5
RD1P2360	65	95	Não Especificado*

*O *datasheet* do conversor apenas diz que a temperatura de desligamento está de acordo com a norma GB/T2423.2-2008, IEC 60068-2-2:2007, IDT.

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Dilong (2024b); EVPT (2023); OVAR (s.d.)

Como destacado anteriormente, a região onde o APM será utilizado é particularmente úmida, portanto, o conversor DE1000S9G-360S14RC pode apresentar problemas no funcionamento. Os demais modelos não apresentam nenhuma peculiaridade nestes quesitos.

3.1.4.3 Proteção

Nesta seção serão comparadas as proteções garantidas pelo fabricante dos modelos pré-selecionados. A Tabela 8 pontua os pontos de proteção citados na documentação dos conversores.

Tabela 8 – Comparativo de Proteções Garantidas.

Proteção	TDC-IY-320-12	DE1000S9G-360S14RC	RD1P2360
IP67	O	O	O**
Proteção contra Inversão de Polaridade em AT	O	X	O
Proteção contra Curto Circuito em BT	O	O	O
Circuito de Intertravamento de Alta Tensão (do inglês <i>High Voltage Interlock Loop</i> - HVIL)	O	X	X
Proteção contra Sobrecorrente em BT	X	O	X
Proteção contra sobretensão em AT	O	O	O
Proteção contra subtensão em AT	O	O	O
Proteção contra sobretensão em BT	X	O	O
Proteção contra subtensão em BT	X	O*	X
Proteção de Comunicação (tempo para desligar se não houver resposta (s))	5	5	Não Especificado

*O conversor não desliga, apenas reporta a falha.

**O *datasheet* do conversor diz que ele pode chegar a IP67, porém, suas especificações constam como IP66.

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Dilong (2024b); EVPT (2023); OVAR (s.d.)

Na comparação das proteções oferecidas pelos modelos, destacam-se:

- O conversor DE1000S9G-360S14RC não possui proteção HVIL nem contra inversão de polaridade, mas oferece proteção completa contra sobrecorrente e subtensão na bateria de BT;
- O conversor TDC-IY-320-12 possui proteção HVIL, mas não atua caso haja problemas na bateria BT;
- O modelo RD1P2360 oferece um equilíbrio intermediário, sem HVIL, mas com proteção contra sobretensões.

3.1.4.4 Preço e Garantia

Um dos principais fatores para a escolha do conversor é o seu preço, assim, a Tabela 9 compara o custo e o tempo de garantia fornecido pelos fornecedores.

Tabela 9 – Comparativo de Preços e Garantia.

Modelos	Preço (US\$)*	Garantia
TDC-IY-320-12	200	1 ano
DE1000S9G-360S14RC	980	1 ano
RD1P2360	418	2 anos

Sem considerar a entrega e as taxas de importação

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Dilong (2024b); EVPT (2023); OVAR (s.d.)

3.1.4.5 Constatações Adicionais

Nem todos os critérios para a escolha entre os modelos analisados podem ser comparados diretamente. Por isso, esta seção destaca alguns aspectos relevantes que não se enquadram em categorias específicas de análise.

O conversor TDC-IY-320-12 é o único entre os três avaliados que possui a topologia explicitamente descrita em seu datasheet (conversor FB na entrada e retificador síncrono na saída). Para os demais modelos, não há informações disponíveis sobre o circuito interno, mesmo após solicitação direta às respectivas empresas fornecedoras.

Adicionalmente, o modelo TDC-IY-320-12 é comercializado por empresas nacionais e, inclusive, é recomendado para uso conjunto com o powertrain FTE WEG 130, que será adotado na van. Essa recomendação representa uma garantia adicional quanto à confiabilidade e à compatibilidade do conversor com a aplicação proposta neste trabalho.

3.1.5 Escolha Final

Portanto, por ter o menor custo, a melhor densidade de potência (tanto em kW/L quanto em kW/kg), além de ser menos restritivo quanto a máxima umidade relativa do ar e se equiparar aos outros modelos em questão de proteção, o conversor escolhido foi o TDC-IY-320-12, mostrado na Figura 33. Ao entrar em contato com o setor de vendas da empresa EVPT, chegou-se a um valor de entrega de US\$137, totalizando US\$337 além das taxas de importação.

3.1.6 Características do conversor TDC-IY-320-12

Neste tópico serão abordadas as principais características do conversor TDC-IY-320-12, desde sua comunicação até sua topologia.

3.1.6.1 Comunicação e comando

O conversor escolhido se comunica por meio do protocolo CAN, utilizando o padrão SAE J1939, explicado na Seção 2.7.2.1. Através do barramento, o conversor informa tensão e corrente do lado de BT, a temperatura do APM e uma série de 10 erros, apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Lista de erros do APM.

Número do erro	Nome do erro	O que ele representa
1	Falha de Hardware	O conversor parou de funcionar devido a uma falha em seu hardware
2	Falha CAN	A comunicação CAN apresentou alta interferência (erro que também ocorre quando o conversor está sendo alimentado, mas ainda não foi acionado)
3	Falha HVIL	A entrada foi conectada com polaridade invertida
4	Aviso Superaquecimento	O conversor está com temperatura mais alta que o normal, porém ainda está funcionando
5	Erro Superaquecimento	O conversor parou de funcionar pois atingiu temperatura maior que o limite programado
6	Sobre tensão na entrada	O conversor parou de funcionar pois a sua tensão de entrada está maior que o limite do conversor
7	Sub tensão na entrada	O conversor parou de funcionar pois a sua tensão de entrada está menor que o limite do conversor
8	Sobre tensão na saída	O conversor parou de funcionar pois a sua tensão de saída está maior que o limite do conversor
9	Sub tensão na saída	O conversor parou de funcionar pois a sua tensão de saída está menor que o limite do conversor
10	Sobre Corrente na saída	O conversor parou de funcionar pois a sua corrente de saída está maior que o limite do conversor

Fonte: Elaborada pelo autor com base em EVPT (2023)

O ID CAN utilizado para o envio dos dados é 1801D08F em hexadecimal, ou 110000000000111010000100011111 em binário. Analisando esse ID segundo o método descrito na Seção 2.7.2.1, observa-se que o valor da sua prioridade é 6, o segundo mais baixo possível dentro do barramento.

Além disso, o conversor também pode ser acionado via CAN, utilizando o ID 18008FD0, que possui o mesmo valor de prioridade do ID anterior.

Outra forma de acionar o conversor é aplicando 12V no pino de *enable*. A faixa de tensão suportada nessa entrada é de 6 a 30 V, com uma corrente máxima consumida de 1 mA.

3.1.6.2 Topologia do conversor

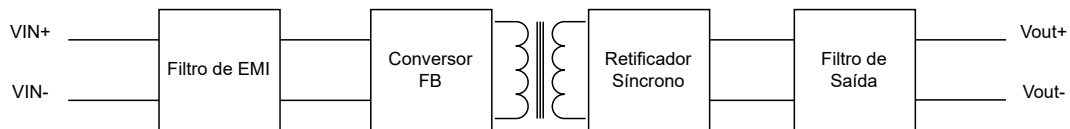
O conversor adotado utiliza como topologia de entrada um conversor FB, cujo funcionamento está descrito na Seção 2.6.2.1, e, na saída, um retificador síncrono, abordado na Seção 2.6.2.2. Observa-se que essa topologia não é a mais indicada para a aplicação em questão, conforme discutido na Seção 2.6.2.3. No entanto, nesta mesma seção, foram apresentadas justificativas para a adoção de topologias alternativas.

O funcionamento do conversor pode ser dividido em cinco módulos principais:

- **Filtro de Interferência Eletromagnética (do inglês *Electromagnetic Interference - EMI*):** responsável por atenuar os efeitos eletromagnéticos causados pelo chaveamento em alta frequência;
- **Conversor FB:** converte os 400 V CC em CA;
- **Transformador:** realiza a redução do nível de tensão por meio da relação de espiras;
- **Retificador Síncrono:** retifica a tensão proveniente do transformador;
- **Filtro de Saída:** reduz a distorção da tensão na saída.

Esse processo é representado pelo diagrama de blocos da Figura 35.

Figura 35 – Diagrama de blocos simplificado do conversor TDC-IY-320-12.



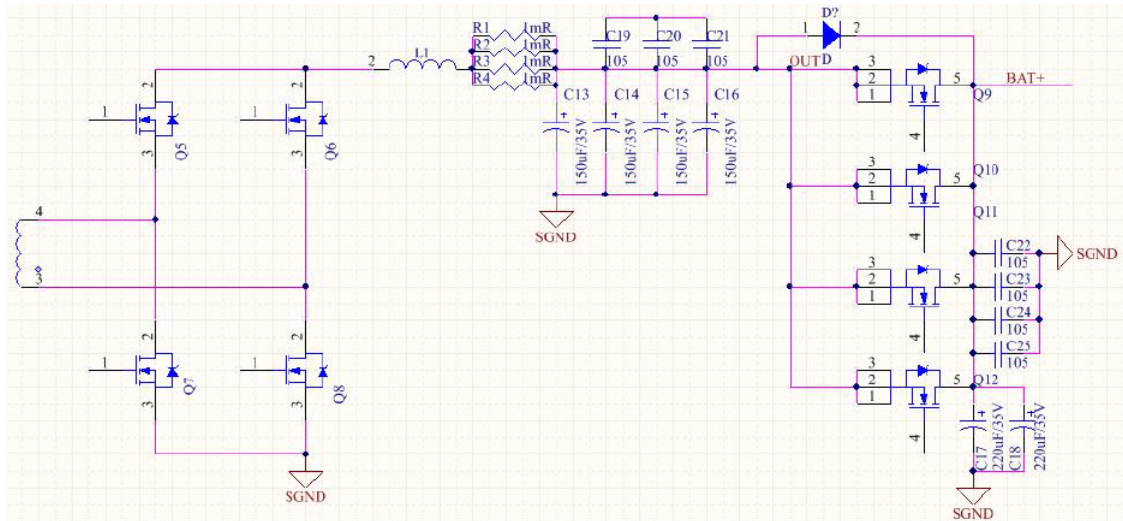
Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

O esquemático do retificador síncrono, juntamente com o filtro de saída do conversor, é mostrado na Figura 36. O retificador em si está à esquerda do indutor L1, e o restante do circuito é destinado a medições internas e filtragens.

Percebe-se que, estruturalmente, o retificador síncrono é semelhante ao conversor FB, sendo que a principal diferença entre eles está no comando das chaves. Assim, desconsiderando os filtros e os circuitos de medição, a topologia do conversor TDC-IY-320-12 é representada conforme a Figura 37.

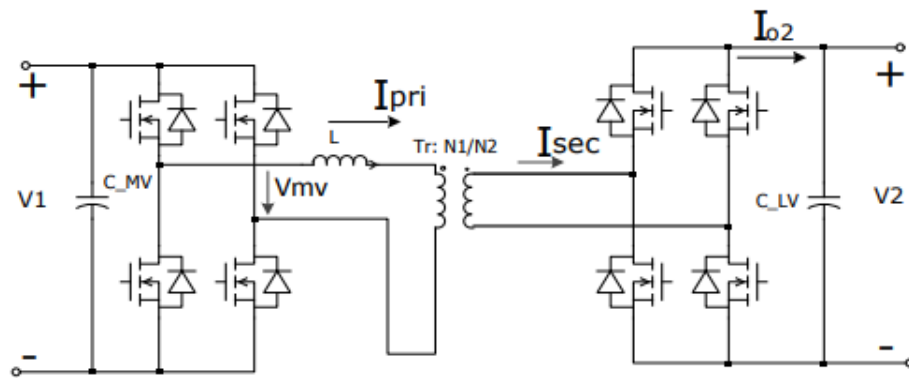
Observa-se que, estruturalmente, o conversor resultante é equivalente ao conversor DAB, apresentado na Seção 2.6.1, porém sem o mesmo controle que permite a reversibilidade da corrente. Dessa forma, além dos motivos para a utilização do retificador síncrono já descritos na Seção 2.6.2.3, existe também a possibilidade de que a empresa esteja desenvolvendo conversores reversíveis do tipo DAB e tenha optado por utilizar a mesma topologia nos conversores unidirecionais, o que justificaria a escolha dessa topologia por parte da EVPT.

Figura 36 – Esquemático da saída do conversor TDC-IY-320-12.



Fonte: EVPT (2023)

Figura 37 – Entrada e saída do conversor TDC-IY-320-12.



Fonte: Shuyu *et al.* (2017)

3.2 DESENVOLVIMENTO DA UNIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA - PDU

Como explicado na Seção 2.3.8, a PDU é fundamental para interligar os sistemas à bateria de AT, portanto, vital para o pleno funcionamento do APM.

Nesta seção, será descrito o processo de desenvolvimento deste componente, enfatizando suas principais etapas.

3.2.1 Especificação da PDU

A primeira etapa para o projeto da PDU foi o levantamento dos dispositivos de alta tensão a serem conectados à bateria de tração do veículo. São eles:

- APM;
- OBC;

- Inversor do motor;
- Módulo de *Fast Charge* (este ainda não será implementado no projeto, mas a PDU será dimensionada para suportá-lo futuramente).

O Quadro 4 especifica o que será necessário para a conexão de cada dispositivo na PDU. A corrente máxima suportada pelos fusíveis e conectores foi definida com base nos respectivos *datasheets* dos dispositivos. Além disso, de acordo com o *datasheet* da bateria de AT utilizada no projeto, sua tensão máxima é de 408,8 V. Por esse motivo, os componentes foram dimensionados para suportar até 500 V em CC.

Quadro 4 – Cargas da PDU.

Carga	Componentes da PDU
APM	- Fusível 10A 500V; - Conector de AT para 10A.
OBC	- Fusível 20A 500V; - Conector de AT para 20A.
Inversor para o motor	- Fusível 700A 500V; - Conector de AT para 700A; - Circuito de pré carga.
Módulo de Fast Charge	- Fusível 200A 500V; - Conector de AT para 200A.

Fonte: Elaborada pelo autor com base nos respectivos *datasheets* (2025)

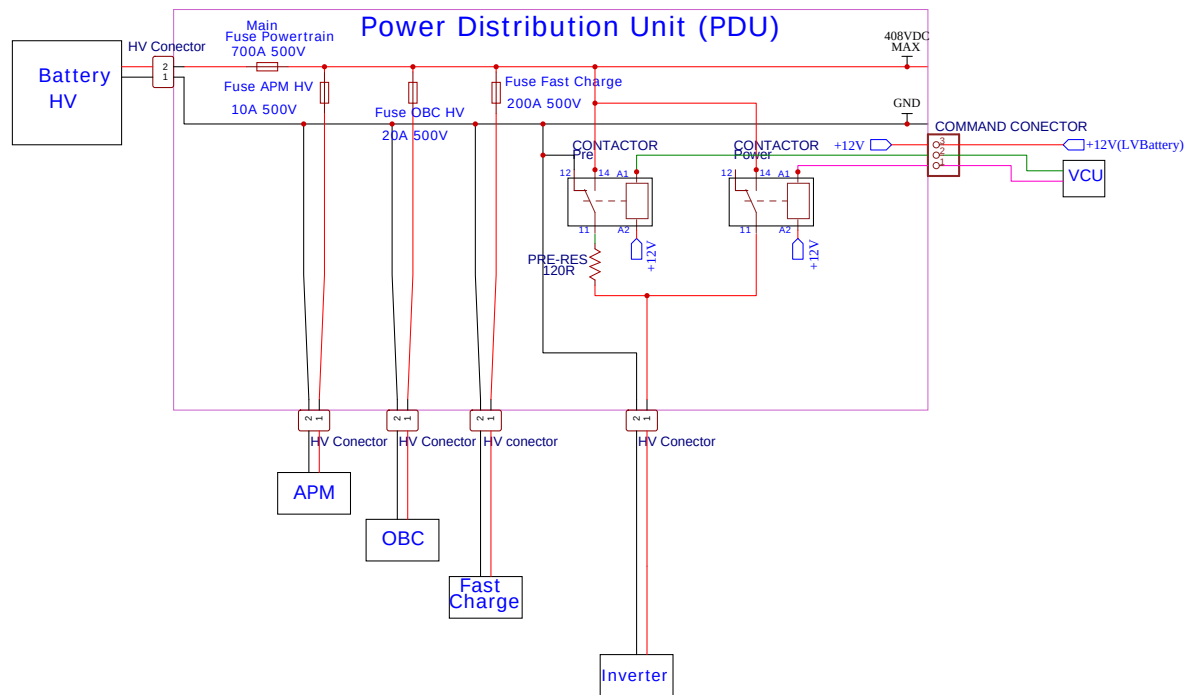
Além dos dispositivos conectados, a PDU também precisa conter um conector de comunicação, a fim de permitir o comando do circuito de pré-carga via VCU, e o conector e fusível para a bateria de AT, que, segundo os mesmos critérios de dimensionamento adotados anteriormente, devem suportar 700 A e 500 V.

Os dois dispositivos com maior demanda de corrente são, respectivamente, o inversor do motor (que deve suportar até 700 A) e o módulo de *fast charge* (capaz de fornecer até 200 A). No entanto, esses dois dispositivos não operam simultaneamente, pois, enquanto o OBC ou o *fast charge* estiverem em funcionamento, o veículo deve estar parado e, consequentemente, o inversor não estará energizado. Assim, a situação de maior corrente fluindo pela bateria ocorre quando o veículo está sendo ligado, com o APM ativado.

De acordo com o *datasheet* do APM, sua corrente máxima de operação no lado de AT é de 8 A. Portanto, considerando que $700\text{ A} \gg 8\text{ A}$, a corrente consumida pelo APM pode ser desconsiderada para o dimensionamento do fusível geral. Dessa forma, não há necessidade de utilizar dois fusíveis de 700 A na PDU (um para a bateria e outro para o motor). Assim, o fusível de proteção originalmente destinado ao inversor foi realocado para a bateria de AT, atuando como proteção tanto para o circuito do inversor quanto para o da bateria de tração.

Após finalizar o levantamento dos componentes da PDU, foi desenvolvido um esquemático que agrupasse todas as demandas descritas nessa seção, este é representado na Figura 38.

Figura 38 – Esquemático PDU.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

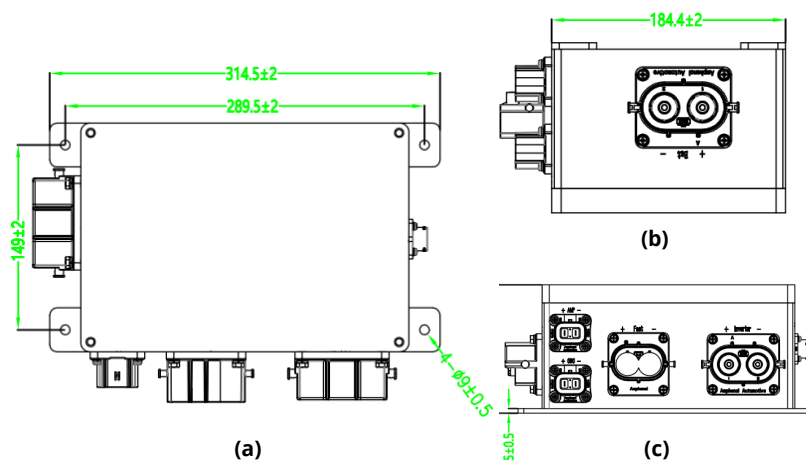
3.2.2 Projeto da PDU

A ideia inicial do projeto era utilizar o esquemático da PDU como base para adquirir separadamente os componentes necessários e montá-la em bancada. Contudo, durante a pesquisa de mercado pelos componentes individualizados, foi identificado que a empresa EVPT (a mesma fornecedora do APM) comercializava PDUs personalizadas montadas em seu site. Diante disso, foi solicitado um orçamento à empresa, que requisitou apenas uma lista dos componentes desejados, além de um esquemático do circuito interno conforme a necessidade do projeto (Figura 38).

O valor orçado pela EVPT para a PDU, incluindo todos os seus componentes internos, além de um conector extra para cada módulo conectado ao sistema (sem considerar as taxas de importação), foi de US\$ 624,80. Como não seria possível adquirir separadamente todos os itens do mesmo fornecedor e, considerando a maior praticidade da solução integrada essa foi a escolhida.

As seguintes Figuras foram enviadas pela EVPT durante o processo de montagem da PDU. A Figura 39 mostra as dimensões externas da PDU. As Figuras 39(a) a 39(c) mostram as vistas superior, lateral e frontal, respectivamente. A Figura 40 mostra os componentes que foram utilizados no projeto. As Figuras 41(a) a 41(c) mostram as imagens do projeto 3D da PDU.

Figura 39 – Dimensões projeto PDU.



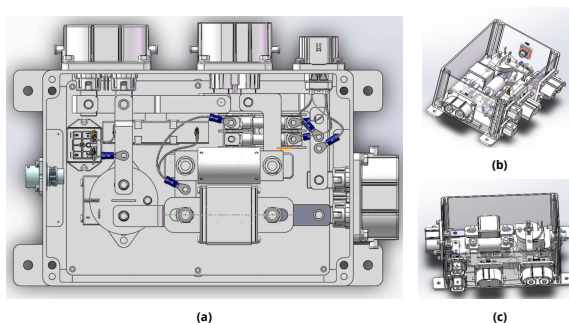
Fonte: EVPT (2025)

Figura 40 – Lista de componentes PDU.

Electrical Components Table					
Application	Specification	Model	Brand	Qty	Remark
Batt-FUSE	700A/500V	A5101-700	ASTM	1	
APM-FUSE	10A/500V	EV105C-10EP	ASTM	1	
OBC-FUSE	20A/500V	EV105C-20EP	ASTM	1	
Fast Charge-FUSE	200A/500V	A300503-200A	ASTM	1	
Contactor	200A/900V	EV200AAANA	TE	1	
Pre-Contactor	20A/450v	EV20-12E	SCII	1	
Pre-res	120Ω/32W	R27-4H-120-32	KRAH	1	

Fonte: EVPT (2025)

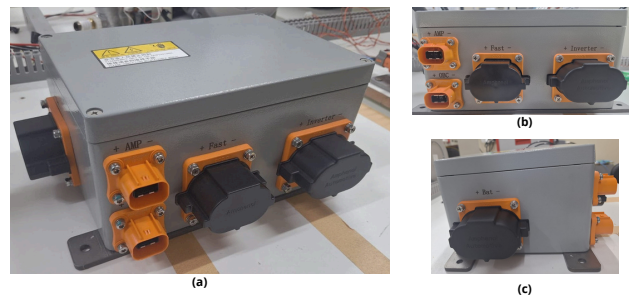
Figura 41 – Imagens do projeto PDU.



Fonte: EVPT (2025)

Devido a entrega tardia da PDU, não houve tempo hábil para a implementação dela. As Figuras 42(a) a 42(c) são fotos tiradas no dia da entrega da PDU.

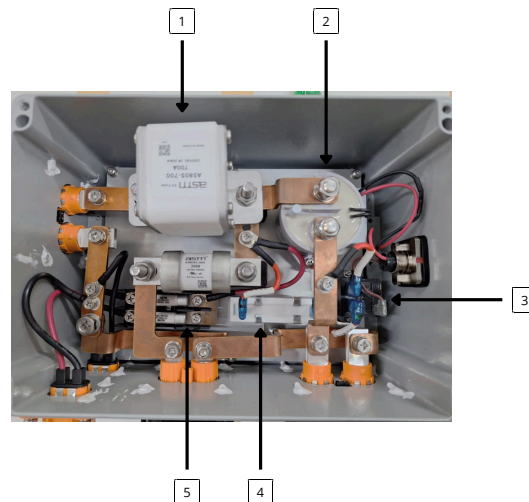
Figura 42 – Fotos da PDU.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Já a Figura 43 mostra a montagem interna da PDU, nomeando os seus componentes mais importantes.

Figura 43 – Fotos da PDU.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

- 1. Fusível de 700A (para a bateria de AT e para o inversor);
- 2. Relé de potência da pré carga;
- 3. Relé de comando da pré carga;
- 4. Resistor de pré carga;
- 5. Fusíveis de 10A e 20A para o APM e o OBC respectivamente.

3.2.3 Desenvolvimento da Caixa de Fusíveis

Outro sistema periférico essencial para o funcionamento do APM é a caixa de fusíveis. Esta tem como objetivo agrupar os fusíveis e relés de BT em um único local, de modo a facilitar o acesso para expansões e manutenções.

Neste tópico será descrito o processo de desenvolvimento da caixa de fusíveis, desde a fase de projeto até a montagem.

3.2.3.1 Especificação da caixa de fusíveis

A primeira etapa para o desenvolvimento da caixa de fusíveis consiste em ter pleno conhecimento das cargas conectadas ao sistema de BT e dos componentes necessários para seu funcionamento.

O levantamento dessas cargas foi realizado na Seção 3.1.1. Assim, o Quadro 5 apresenta as demandas de cada uma delas.

Quadro 5 – Corrente máxima das cargas de BT.

Cargas	Função
FT450 (VCU)	- Fusível de 10A; - Relé para acionamento.
ECU auxiliar	- Fusível de 1A
Eletroventilador	- Fusível de 20A; - Relé para acionamento.
Bomba Menor	- Fusível de 5A; - Relé para acionamento.
Bomba Maior	- Fusível de 20A; - Relé para acionamento.
Inversor	- Fusível de 10A; - Relé para acionamento.
BMS	- Fusível de 2A.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Além disso, para facilitar a montagem da caixa de fusíveis, devem estar disponíveis nas proximidades um barramento do polo positivo e outro do negativo da bateria. O *datasheet* do conversor APM recomenda a utilização de um fusível de 100 A conectado ao lado de BT. Como o caso de maior corrente fluindo pela bateria de BT ocorrerá quando ela estiver sendo carregada com todas as cargas auxiliares desligadas, outro fusível de 100 A será conectado à bateria.

Os relés serão acionados pela FT450 por lógica negativa, com exceção do relé da própria FT450, que será acionado pela chave de ignição do veículo. Seu *datasheet* recomenda que a alimentação de potência das cargas não seja proveniente do mesmo barramento utilizado para o acionamento. Por esse motivo, foi adicionado ao projeto um barramento adicional de 12 V, destinado exclusivamente ao acionamento dos relés.

3.2.3.2 Projeto da caixa de fusíveis

Para a estrutura física da caixa de fusíveis, foi adquirida uma caixa comercial adequada para esse propósito, apresentada na Figura 44. Com as especificações definidas, o passo seguinte

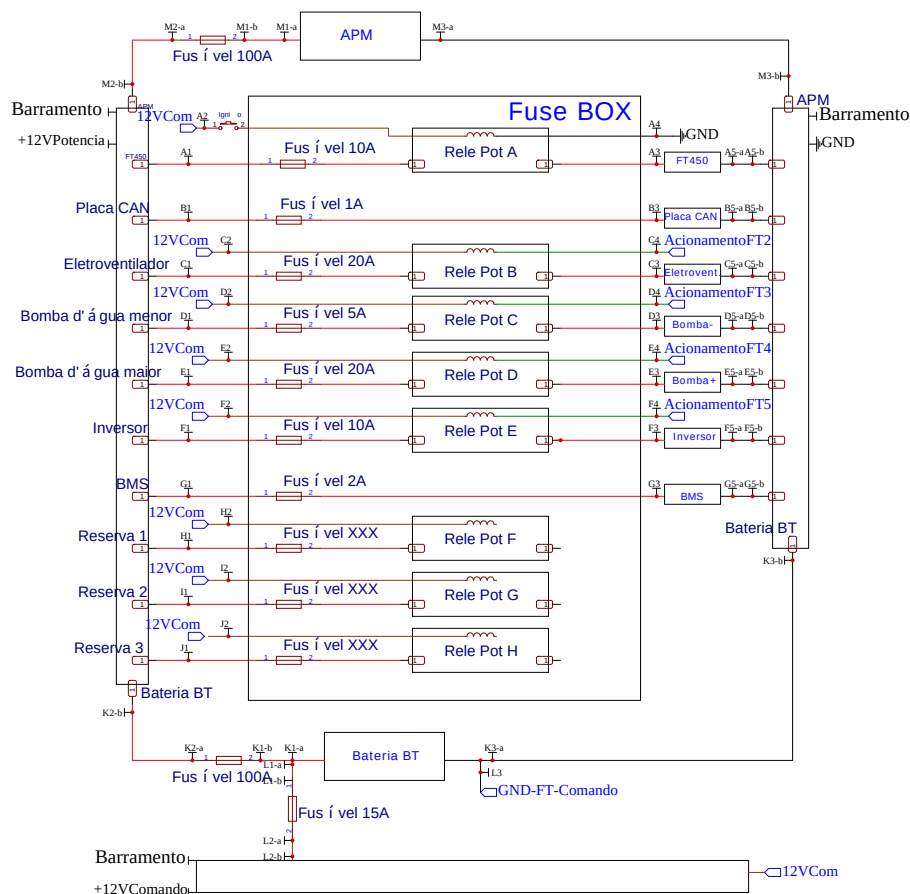
foi desenvolver o esquemático elétrico da caixa de fusíveis, com o objetivo de documentação e apoio à montagem. Esse esquemático é apresentado na Figura 45. Como a caixa comprada possui espaço para 10 relés e 15 fusíveis, ela oferece capacidade para a adição de mais cargas no futuro, se necessário.

Figura 44 – Caixa de fusíveis.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 45 – Esquemático da caixa de fusíveis.



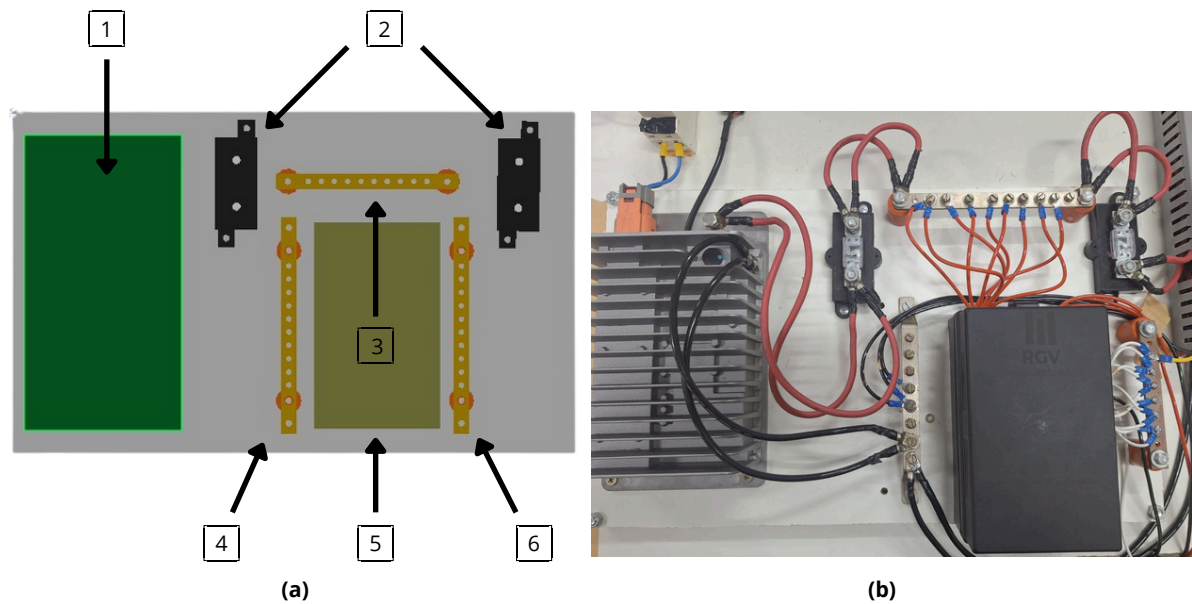
Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Antes da montagem da caixa de fusíveis e de sua estrutura na bancada, foi necessário desenvolver um projeto 3D tanto da caixa quanto da bancada como um todo, com a finalidade de organizar o espaço e realizar o dimensionamento adequado dos materiais que deveriam ser

adquiridos. Os projetos foram desenvolvidos pelo graduando William dos Santos, no contexto de seu trabalho de conclusão de curso em (Santos, 2025). Estes são mostrados nas Figuras 46(a) e 47(a), respectivamente.

Com os projetos concluídos, a caixa de fusíveis e os barramentos foram montados sobre um suporte de madeira. Essa montagem é apresentada na Figura 46(b). Posteriormente, o suporte de madeira com a caixa de fusíveis foi instalado na bancada, cuja montagem também foi realizada conforme ilustrado na Figura 47(b).

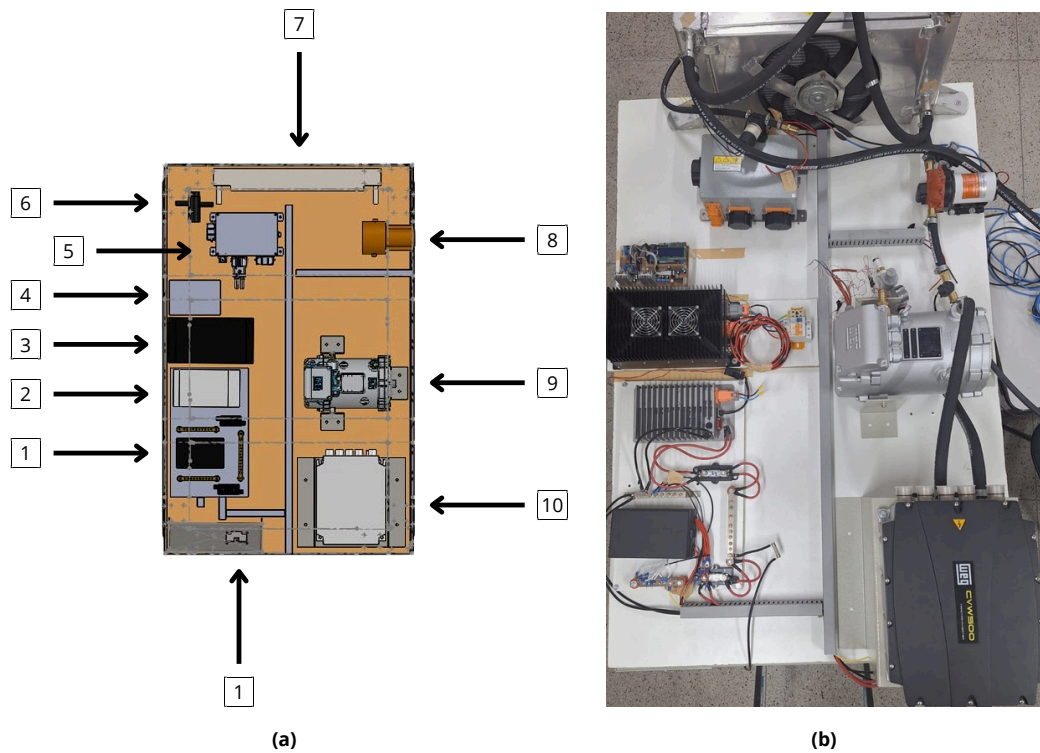
Figura 46 – Estrutura da Fuse Box (projeto 3D e montagem).



Fonte: Santos (2025)

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

Figura 47 – Estrutura da bancada (projeto 3D e montagem).



Fonte: Santos (2025)

- 1. Caixa de fusíveis;
- 2. Conversor APM;
- 3. Conversor OBC;
- 4. ECU auxiliar;
- 5. PDU;
- 6. Bomba de água menor;
- 7. Eletroventilador;
- 8. Bomba de água maior;
- 9. Motor elétrico do veículo;
- 10 (parte superior). Inversor WEG CVW500;
- 10 (parte inferior). Bateria de BT.

3.3 DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITOS AUXILIARES PARA O FUNCIONAMENTO DO APM

Foi necessário desenvolver alguns circuitos auxiliares para o APM, sendo eles: uma Interface Homem-Máquina (IHM), para leitura das informações do conversor, e um circuito para ativar o conversor via Arduino.

Neste tópico, será descrito o processo de desenvolvimento e o funcionamento de ambos os circuitos.

3.3.1 Interface Homem-Máquina (IHM)

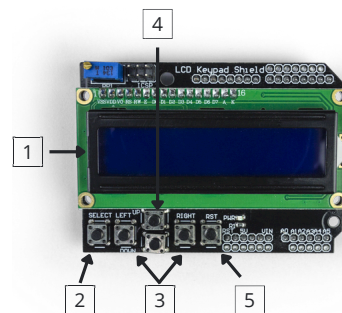
Conforme explicado na Seção 3.1.6.1 o APM informa via CAN a tensão e a corrente da bateria de BT, além da temperatura do conversor e de eventuais erros. Assim, foi necessário desenvolver uma IHM que possibilitasse uma visualização clara e acessível desses parâmetros.

O hardware base da ECU auxiliar é um Arduino Mega 2560. Para exibição e controle da interface, foi utilizado um módulo *Liquid Crystal Display* (LCD) *Shield* 16x2 com botões integrados.

3.3.2 Identificação dos elementos da IHM

A Figura 48 apresenta o módulo LCD do projeto, identificando os seus elementos que serão utilizados na IHM.

Figura 48 – Elementos da IHM.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

- 1. *Display*: exibe os parâmetros do conversor e as telas do programa;
- 2. Botão *SELECT*: utilizado para retornar ao menu inicial;
- 3. Botões *LEFT* e *RIGHT*: utilizados para a navegação horizontal na interface (esquerda e direita, respectivamente);
- 4. Botões *UP* e *DOWN*: utilizados para a navegação vertical na interface (cima e baixo, respectivamente).

3.3.3 Telas da IHM

- **Tela Inicial:** Esta é a tela principal do programa, funcionando como ponto de partida para as demais telas. Caso nenhum erro esteja ocorrendo no APM, a tela exibe o status operacional do APM (ligado ou desligado), este é controlado pelo circuito a ser explicado na Seção 3.3.4 como mostrado nas Figuras 49 e 50. Caso contrário, a tela exibe a quantidade de erros ativos, conforme ilustrado na Figura 51, que mostra um exemplo de dois erros simultâneos.

Figura 49 – APM em operação.



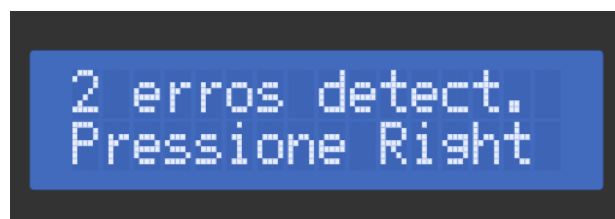
Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 50 – APM desligado.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 51 – Tela com erros detectados.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

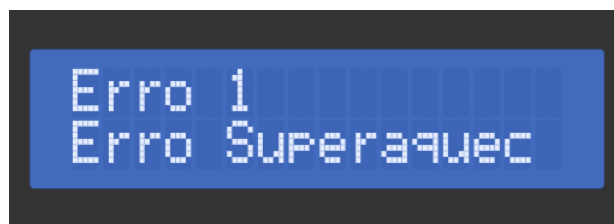
- **Tela de erros atuais:** Cada erro ou aviso do APM foi classificado numericamente, conforme o Quadro 3.

Ao pressionar o botão *RIGHT* na tela inicial, o usuário é redirecionado para a tela de erros atuais, que exibe os erros ativos, um por vez, em ordem crescente. Em caso de múltiplos erros, o botão *RIGHT* exibe o próximo erro, enquanto o botão *LEFT* retorna ao erro anterior. Ao atingir o último erro, pressionar *RIGHT* leva a uma tela informando

que não há mais erros disponíveis. Nesta tela, ao pressionar qualquer botão, o usuário retorna à tela inicial.

Exemplo prático: O APM detecta dois erros: 5 (Erro de superaquecimento) e 10 (Sobrecorrente na saída). A tela inicial é representada pela Figura 51. Ao pressionar *RIGHT*, o usuário acessa a tela da Figura 52, que exibe o nome do erro e a posição dele nos erros que estão acontecendo. Pressionando *RIGHT* novamente, visualiza a Figura 53. Ao pressionar *LEFT* nesta tela, retorna à Figura 52. Caso pressione *RIGHT* novamente, chega à tela da Figura 54, que indica o fim da lista de erros. Qualquer botão pressionado nessa tela retorna o usuário à tela inicial (Figura 51).

Figura 52 – Tela de erro - Superaquecimento



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 53 – Tela de erro - Sobre corrente na entrada.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 54 – Tela fim dos erros detectados.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

- **Tela de últimos erros (memória de erros):** Os últimos 10 erros são armazenados em um vetor no código da IHM. Quando um novo erro é registrado, o erro mais antigo é descartado, mantendo o limite de 10 registros. O único modo de exclusão de um erro da memória é sua substituição na décima posição pelo erro recém-detectado.

Ao pressionar o botão *LEFT* na tela inicial, o usuário é redirecionado para a tela de memória de erros. Os erros são exibidos individualmente, do mais recente ao mais antigo.

O botão *LEFT* navega para o próximo erro armazenado; o botão *RIGHT* , para o anterior. Ao alcançar o erro mais antigo e pressionar *LEFT*, uma tela informa o fim da memória. Nessa tela, qualquer botão retorna o usuário à tela inicial.

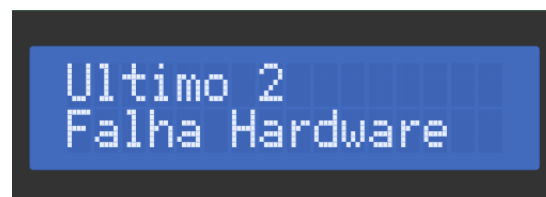
Exemplo prático: A IHM armazena dois erros na memória: 3 (Falha HVIL) e 1 (Falha de hardware), nesta ordem. Pressionando *LEFT* na tela inicial, o usuário acessa a tela representada pela Figura 55. Pressionando *LEFT* novamente, vê a Figura 56. Nessa tela, ao pressionar *RIGHT*, retorna à Figura 55. Caso pressione *LEFT* novamente, acessa a tela da Figura 57, que informa o fim da memória. Pressionando qualquer botão, retorna à tela inicial.

Figura 55 – Tela de últimos erros - Falha HVIL.



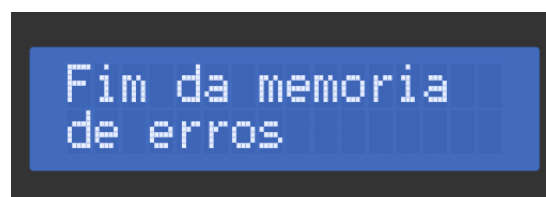
Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 56 – Tela de últimos erros - Falha de *Hardware*.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 57 – Tela fim da memória de erros.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

- **Tela de valores de operação:** Ao pressionar o botão *DOWN* na tela inicial, o usuário é redirecionado para a tela de valores de operação, onde são exibidos a tensão e a corrente do lado de BT, além da temperatura do APM. Para retornar ao menu inicial, o usuário deve pressionar *UP* ou *SELECT*. A Figura 58 ilustra a disposição dessas informações na tela.

Figura 58 – Exemplo de tela de valores de operação.

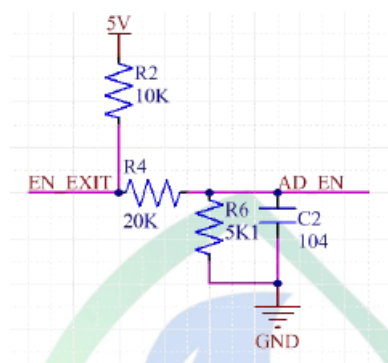


Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

3.3.4 Circuito de acionamento do *enable*

O método escolhido para acionar o conversor foi a utilização do pino de *enable*, por este apresentar maior confiabilidade durante o período de testes iniciais. O circuito interno correspondente é mostrado na Figura 59, sendo *EN_EXIT* o pino externo referente ao sinal de *enable*.

Figura 59 – Circuito interno do *enable*.



Fonte: EVPT (2023)

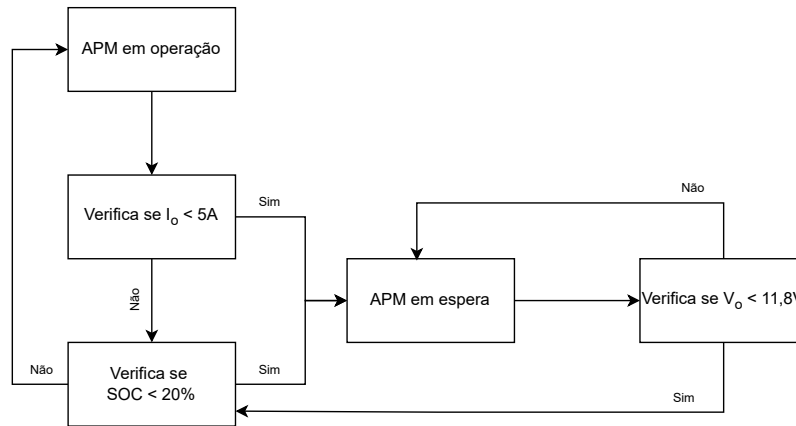
Conforme explicado na Seção 3.1.6.1, ao aplicar uma tensão na faixa de 6 a 30 V no pino de *enable*, o conversor entra em operação, interrompendo seu funcionamento apenas quando essa tensão for inferior a 6 V.

A fim de evitar que o APM permanecesse em funcionamento contínuo, foi necessário desenvolver uma lógica de controle que permitisse ligar ou desligar o APM conforme a necessidade de atuação. Considerando que o hardware base da ECU auxiliar é um Arduino Mega 2560, essa lógica pôde ser implementada diretamente via programação no microcontrolador.

Após a análise de uma curva de carga da bateria de BT (a ser apresentada na Figura 71) observou-se que, durante o processo de carga, a tensão da bateria se mantém constante em aproximadamente 14 V, enquanto a corrente diminui ao longo do tempo. Como o conversor transmite constantemente seus parâmetros — tensão e corrente de BT — via CAN para a ECU, tornou-se possível monitorar em tempo real a corrente de carga. Com isso, um pino do Arduino foi designado para fornecer o sinal de *enable*: quando a corrente atingir um limiar programável, o fornecimento é interrompido; o sinal só volta a ser enviado quando a tensão cair abaixo de um

valor mínimo previamente definido. A Figura 60 mostra o fluxograma de funcionamento deste circuito.

Figura 60 – Funcionamento do circuito de acionamento do *enable*.



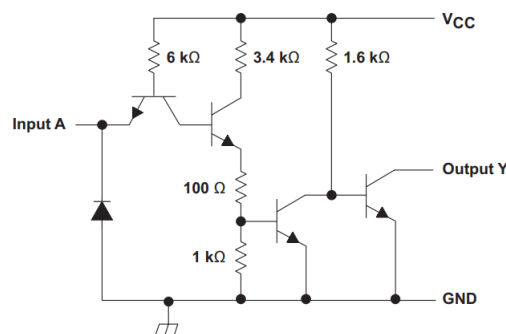
Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Esse controle só foi possível porque, mesmo quando o conversor não está em operação (ou seja, com o *enable* desligado), ele continua transmitindo os dados via CAN, desde que esteja conectado ao lado de AT.

Durante o processo de implementação, percebeu-se que esse controle direto pelo Arduino não seria viável da forma proposta, uma vez que os pinos digitais do Arduino fornecem no máximo 5 V, enquanto o circuito de *enable* exige tensões entre 6 e 30 V. Diante disso, tornou-se necessário desenvolver um circuito de adaptação.

Para tal, optou-se pela utilização do Circuito Integrado (CI) SN7417N, amplamente utilizado para realizar acionamentos com microcontroladores. Segundo a Texas (2016), esse CI atua como um *buffer/driver* de corrente com saídas do tipo *open-collector*. Sua topologia interna é apresentada na Figura 61.

Figura 61 – Topologia interna do CI SN7417N.

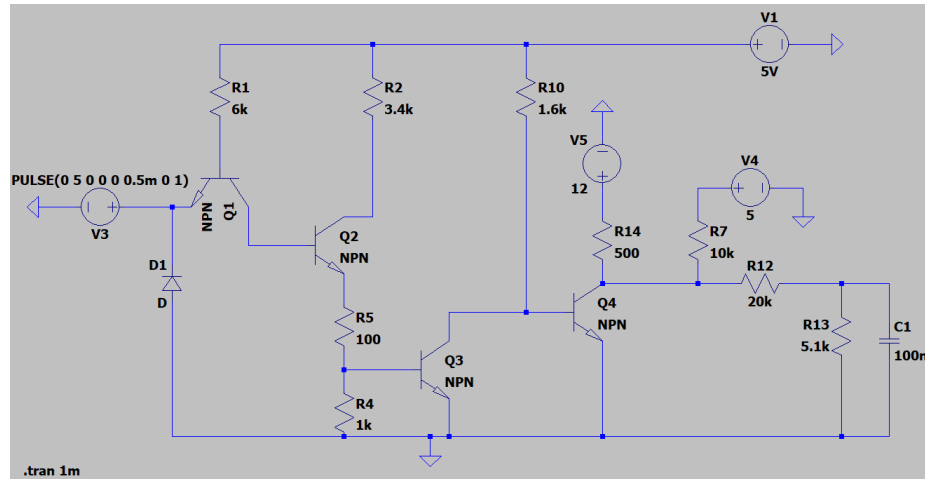


Fonte: Texas (2016)

Para validar a montagem e o funcionamento do circuito projetado, foram realizadas

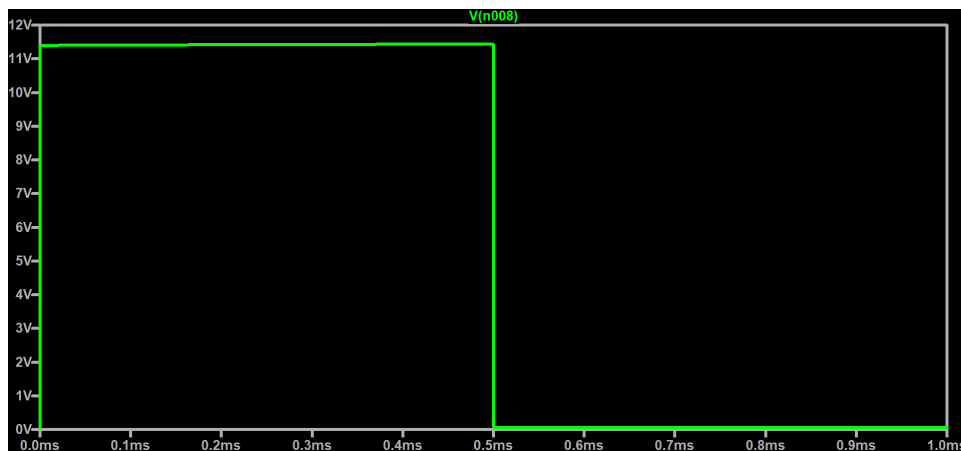
simulações combinando o CI SN7417N com o circuito interno do *enable* do APM. A Figura 62 mostra o circuito simulado que altera o valor do pino de alimentação de 5 V para 0 V em 0,5 ms. A variação na tensão na saída *EN_EXIT* é apresentada na Figura 63.

Figura 62 – Circuito simulado.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 63 – Tensão em *EN_EXIT*.

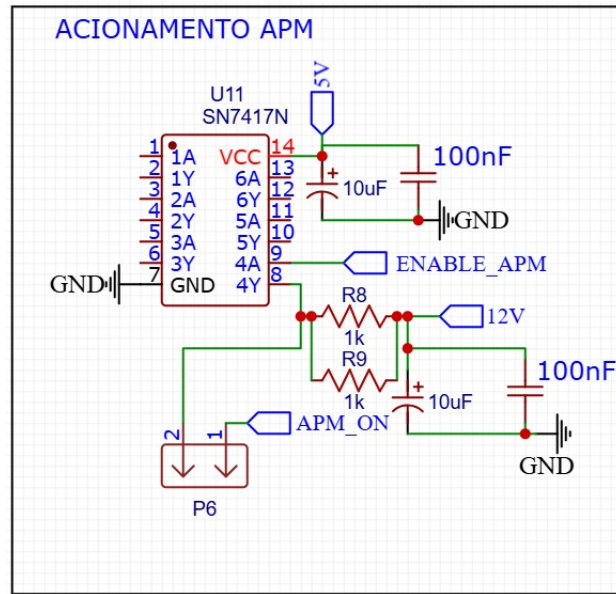


Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Durante os testes, verificou-se que a tensão em *EN_EXIT*, quando o pino de comando está em *HIGH* é de aproximadamente 11,45 V. Avaliou-se, então, a possibilidade de aumentar o valor do resistor de *pull-up* para reduzir a dissipação de potência por meio de uma maior queda de tensão. Contudo, na prática, observou-se uma queda significativa de tensão sobre o resistor, o que levou à manutenção de seu valor em 500 Ω .

O circuito final foi posteriormente implementado na ECU auxiliar do veículo, desenvolvida pelo graduando Lucas da Silva Sales, no contexto de seu trabalho de conclusão de curso (Sales, 2025). O esquemático final do circuito encontra-se representado na Figura 64.

Figura 64 – Circuito para acionamento do APM via *enable*.



Fonte: Sales (2025)

3.4 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi detalhado o processo de desenvolvimento do sistema de alimentação das cargas de BT do veículo por meio do conversor APM. Inicialmente, realizou-se um levantamento das cargas do sistema, com o objetivo de estimar a potência necessária para o conversor.

Na sequência, foi apresentado o processo de pesquisa de mercado e aquisição do conversor APM. Essa análise incluiu um comparativo entre os modelos que melhor se adequavam ao projeto vigente, considerando os principais fabricantes de componentes para EVs no mercado mundial. A comparação foi realizada com base nos critérios estabelecidos na Seção 2.5 da fundamentação teórica. Após a escolha do conversor TDC-IY-320-12, foi realizada uma análise de suas principais características, incluindo aspectos relacionados à comunicação, comandos e topologia utilizada.

Concluída essa etapa, tornou-se necessário o desenvolvimento dos sistemas periféricos essenciais para o funcionamento do conversor, sendo eles a PDU e a caixa de fusíveis. Foram descritas as etapas de projeto, aquisição e montagem desses dois sistemas.

Por fim, foram explicados os circuitos auxiliares desenvolvidos para o conversor, sendo eles a IHM de monitoramento e o circuito de acionamento do *enable*. Apresentaram-se as decisões de projeto tomadas para a montagem desses circuitos, bem como seu funcionamento. Assim, esta parte do capítulo também serve como manual de operação do sistema desenvolvido.

Portanto, as soluções apresentadas neste capítulo garantem a integração segura e funcional entre os diversos componentes do sistema, estabelecendo uma base sólida para a etapa de resultados experimentais, a qual será abordada no próximo capítulo.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são apresentados os testes realizados no projeto, bem como a análise de seus resultados.

4.1 TESTE 1: FUNCIONAMENTO BÁSICO DO CONVERSOR

Como o APM não necessita de comunicação via CAN para operar, o primeiro teste realizado consistiu em conectar sua entrada a uma fonte de CC e sua saída à bateria de BT. O objetivo foi observar o funcionamento do conversor e estimar a corrente fornecida na saída e a corrente drenada na entrada.

Para esse teste, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Conversor APM;
- Alicates amperímetro;
- Multímetro;
- Bateria de 12 V;
- Fonte bidirecional CC *KEYSIGHT* RP7972A (1000 V e ± 60 A);
- Fusível automotivo de 100 A e 12 V (corrente recomendada pelo fabricante do conversor);
- Disjuntor CC de 1000 V e 10 A (corrente recomendada pelo fabricante do conversor).

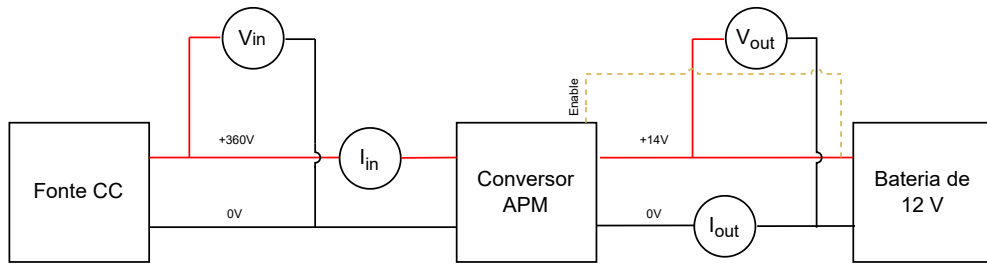
A fonte foi configurada como alimentadora do sistema, com tensão fixada em 360 V e proteção de corrente ajustada para 5 A. Em seguida, seus terminais foram conectados, por meio de cabos de 2,5 mm², ao disjuntor CC de 10 A, que, além de atuar como proteção adicional, também serviu como chave de acionamento do APM. Esse disjuntor foi conectado aos cabos de entrada do APM, também com seção de 2,5 mm².

O terminal positivo da saída do conversor foi ligado ao fusível automotivo de 100 A, cuja outra extremidade foi conectada ao polo positivo da bateria de BT. O terminal negativo da saída foi conectado diretamente ao polo negativo da bateria. Todas as conexões de saída foram realizadas com dois cabos de 10 mm² em paralelo.

O pino de *enable* do conversor foi conectado diretamente ao polo positivo da bateria, mantendo o conversor constantemente ativado.

A tensão de saída foi monitorada com o multímetro e permaneceu estável em 14 V. A corrente de entrada pôde ser observada no display da fonte, enquanto a corrente de saída foi medida com o auxílio de um alicate amperímetro disponível no laboratório. A Figura 65 exibe o esquemático da montagem do primeiro teste, e as Figuras 66 e 67 apresentam as medições realizadas.

Figura 65 – Diagrama da montagem do teste 1.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 66 – Medição da entrada do APM.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 67 – Medição da corrente de saída do APM.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Como as medições de tensão e corrente na entrada e na saída do conversor foram realizadas em momentos próximos, foi possível estimar sua eficiência. A potência instantânea de entrada e de saída foi calculada pela seguinte equação:

$$P_{in} = V_{in} \cdot I_{in} = 359,99 \text{ V} \cdot 0,4567 \text{ A} = 164,4 \text{ W} \quad (2)$$

$$P_{out} = V_{BT} \cdot I_{out} = 14 \text{ V} \cdot 10,1 \text{ A} = 141,4 \text{ W} \quad (3)$$

Onde P_{in} , V_{in} e I_{in} são respectivamente potência, tensão e corrente de entrada do APM e P_{out} e I_{out} são respectivamente potência e corrente de saída do conversor.

O rendimento estimado do conversor (η) foi, então:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{141,4}{164,4} = 0,86 = 86\% \quad (4)$$

De acordo com o *datasheet* do conversor, seu rendimento máximo é de 94%. No entanto, quanto maior for a diferença entre a potência nominal do dispositivo e a potência efetivamente fornecida, mais significativas tendem a ser as perdas. Considerando que a potência nominal do APM é de 1000 W e que, durante o teste, a potência de saída foi de apenas 141,4 W, uma redução no rendimento já era esperada. Devido à limitação de tempo, não foram realizadas medições do rendimento do conversor operando em sua potência nominal.

4.2 TESTE 2: ESTABELECIMENTO DA COMUNICAÇÃO CAN

Com o funcionamento do conversor comprovado, o próximo teste visou estabelecer a comunicação deste via CAN.

O *setup* deste teste foi semelhante ao do teste 1, porém com a adição de um Arduino com o módulo MCP2515, para realizar as leituras da rede CAN. Assim, os equipamentos utilizados para a realização do teste 2 foram:

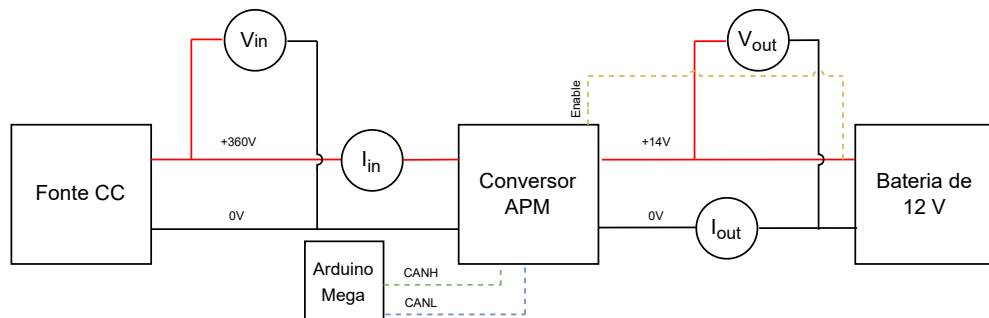
- Conversor APM;
- Alicates amperímetro;
- Multímetro;
- Bateria de 12 V;
- Fonte bidirecional CC *KEYSIGHT* RP7972A (1000 V e ± 60 A);
- Fusível automotivo de 100 A e 12 V;
- Disjuntor CC de 1000 V e 10 A;
- Arduino Mega;
- Módulo MCP2515;
- Módulo leitor de cartão micro SD (para aquisição de dados);
- Notebook (para leitura dos dados via monitor serial).

O código desenvolvido para efetuar a leitura da comunicação CAN foi baseado no mapa CAN do conversor, fornecido pela EVPT. Contudo, este mapa é um documento controlado, cujo compartilhamento não é permitido.

A Figura 68 mostra o diagrama de montagem do teste 2.

Ao iniciar o teste, constatou-se que a comunicação não estava funcionando conforme o esperado. As medições de temperatura apresentavam resultados incongruentes (Figura 69), e erros aleatórios eram esporadicamente exibidos no monitor serial.

Figura 68 – Diagrama da montagem do teste 2.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 69 – Medições iniciais de saída do teste 2.

```
Tensao (V): 10.40
Corrente (A): 0.00
Temperatura (C): -1
=====
```

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Para solucionar o problema, foi necessário realizar uma aquisição bruta de dados, lendo individualmente cada byte da mensagem transmitida, conforme a Figura 70. Esses dados foram armazenados em um cartão micro SD, por meio de um módulo de leitura conectado ao Arduino.

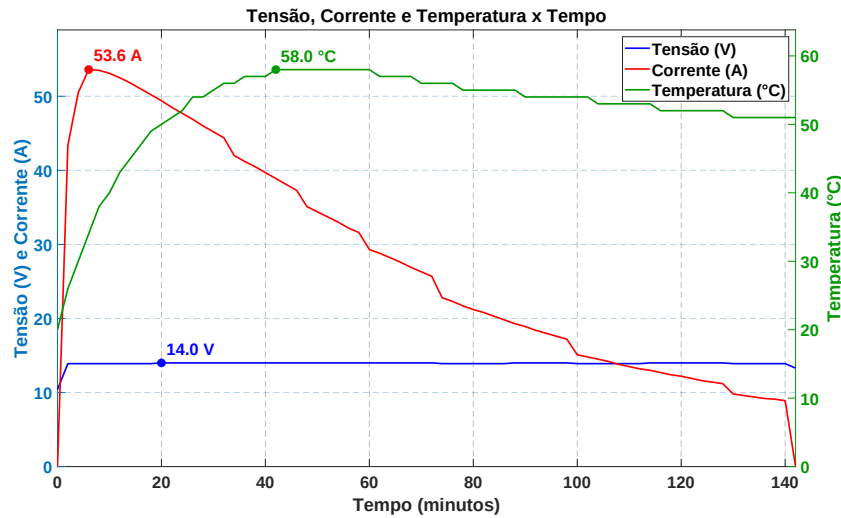
Figura 70 – Leitura de dados brutos por byte da comunicação.

TYPE	TIME(ms)	ID	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
RD	12357	1801D08F	00	72	00	00	03	00	00	3E
RD	12473	1801D08F	00	71	00	00	03	00	00	3F
RD	12589	1801D08F	00	84	00	0C	03	00	00	40
RD	12703	1801D08F	00	8B	01	4A	03	00	00	40
RD	12818	1801D08F	00	8B	01	C6	13	00	00	41
RD	12934	1801D08F	00	8C	01	EF	13	00	00	41
RD	13048	1801D08F	00	8C	01	F9	13	00	00	41
RD	13168	1801D08F	00	8C	01	FA	13	00	00	42
RD	13283	1801D08F	00	8C	01	F2	13	00	00	42
RD	13400	1801D08F	00	8C	01	ED	13	00	00	42
RD	13514	1801D08F	00	8C	01	E9	13	00	00	43
RD	13630	1801D08F	00	8C	01	E5	13	00	00	43
RD	13745	1801D08F	00	8C	01	E1	13	00	00	43

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Ao comparar os resultados com o mapa CAN fornecido, foram constatados erros no bit de exibição das mensagens de erro. O bit responsável pela sinalização de cada erro foi corrigido no código do Arduino. Ao forçar erros como subtensão e sobretensão na entrada, verificou-se o correto funcionamento da leitura de falhas. Contudo, a temperatura ainda não apresentava um valor coerente com a realidade. A Figura 71 apresenta um gráfico de tensão, corrente e temperatura durante a carga da bateria de BT. Nela, observa-se a incoerência da medição de temperatura, que no início do processo indicava menos de 10 °C, mesmo com a temperatura ambiente sendo de 26 °C.

Figura 71 – Gráfico Tensão, Corrente e Temperatura x Tempo - Teste 2.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

A solução encontrada foi entrar em contato com o suporte da EVPT, que, após analisar a leitura bruta dos dados CAN (Figura 70), constatou que o *offset* fornecido por eles para leitura da temperatura estava incorreto no mapa CAN e deveria ser alterado de -60 para -40 .

A medição de corrente informada pelo conversor foi similar a medida com o alicate amperímetro. Assim, este teste serviu para validar o mapa CAN fornecido e comprovar o correto funcionamento da comunicação do conversor.

4.3 TESTE 3: CICLO DE CARGA E DESCARGA DA BATERIA DE BT

Conforme descrito na Seção 3.3.4, após a análise da curva de carga do conversor, foi desenvolvido um circuito com a finalidade de acionar e desligar automaticamente o APM, com base nos parâmetros de tensão e corrente V_{out} e I_{out} . Assim, o objetivo deste teste é validar o funcionamento do circuito implementado.

O *setup* deste teste foi composto pelos seguintes equipamentos:

- Conversor APM;
- Alicate amperímetro;
- Multímetro;
- Bateria de 12 V;
- Fonte bidirecional CC KEYSIGHT RP7972A (1000 V e ± 60 A);
- Fusível automotivo de 100 A e 12 V;
- Disjuntor CC de 1000 V e 10 A;

- Arduino Mega;
- Módulo MCP2515;
- Módulo leitor de cartão micro SD (para aquisição de dados);
- Bomba d'água maior;
- Osciloscópio com ponteira de corrente;
- Dois resistores de 1 $k\Omega$ e 0,25 W;
- CI SN7417N;
- Notebook (para leitura dos dados via monitor serial).

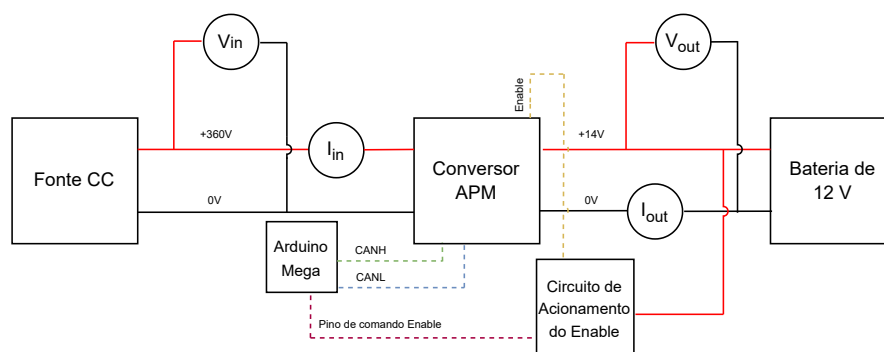
Neste teste, a bateria de BT foi descarregada por meio da bomba d'água, cujo acionamento era realizado por um botão e cuja corrente de operação era de 13,1 A. Quando a tensão da bateria caía abaixo de um limiar configurável no Arduino, o APM iniciava automaticamente o processo de carga. Nesse momento, a bomba d'água era desligada manualmente, e a bateria começava a ser recarregada. A corrente decrescia ao longo do tempo até ficar inferior a outro limiar também configurável no Arduino. Quando isso ocorria, o APM era desligado automaticamente, reiniciando-se o processo de descarga da bateria.

Os limiares de tensão e corrente programados no Arduino para iniciar e encerrar o ciclo de carga foram, respectivamente, 11,8 V e 5 A.

Devido a pequenas variações nas medições de tensão do conversor, o sistema foi configurado para que o APM só fosse ativado se a tensão da bateria permanecesse abaixo de 11,8 V por dez medições consecutivas.

A Figura 72 apresenta o diagrama de montagem do teste 3.

Figura 72 – Diagrama da montagem do teste 3.

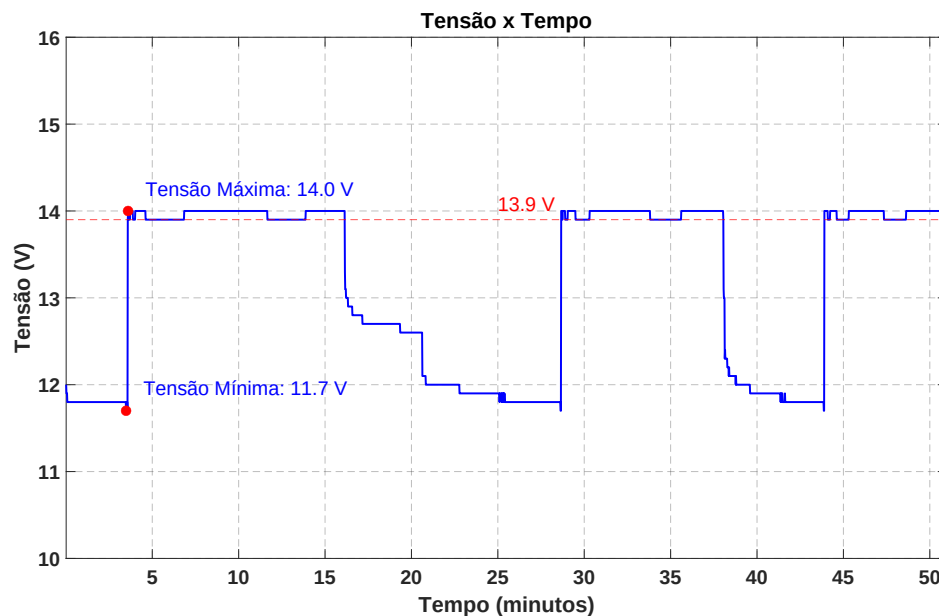


Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

A Figura 73 apresenta o gráfico de tensão ao longo do tempo. Observa-se que, durante o teste, a tensão variou entre 11,7 V e 14,0 V. No entanto, o valor de 11,7 V medido na bateria de BT não representa necessariamente sua tensão interna, a qual está diretamente relacionada ao seu SOC, uma vez que o fornecimento direto de energia às cargas provoca uma queda significativa na tensão medida. Esse comportamento pode ser observado, por exemplo, no minuto 21 da Figura 73, quando a bomba d'água é acionada e a tensão sofre uma queda instantânea de 0,6 V. Durante o processo de carga, a tensão se mantém em 14 V, embora ocorram oscilações esporádicas que a reduzem para 13,9 V.

O período do teste foi de 51 minutos, abrangendo três ciclos completos de carga e dois de descarga da bateria de BT, além do final de uma descarga que ocorre no minuto 4.

Figura 73 – Gráfico Tensão x Tempo — Teste 3.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

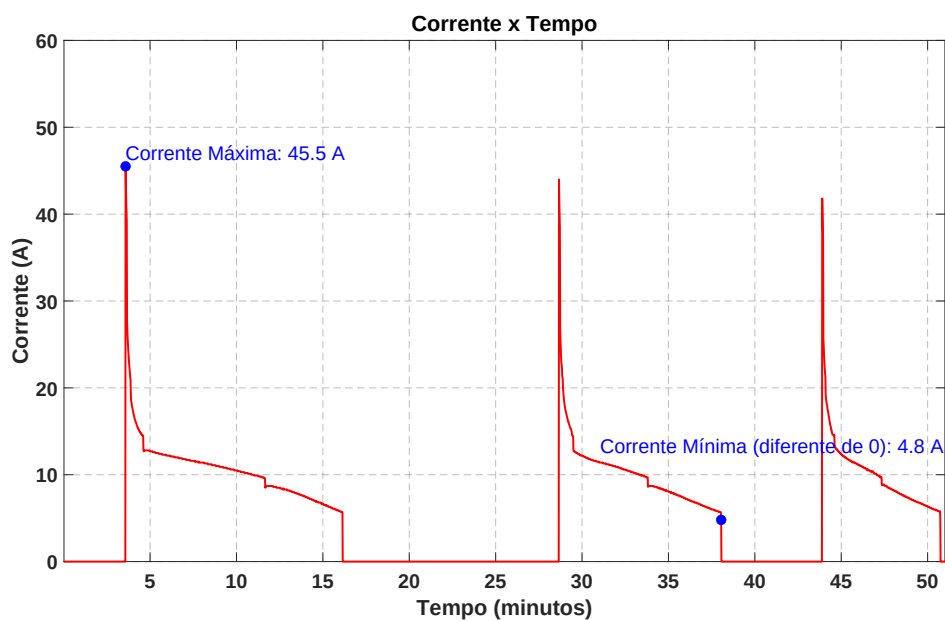
A Figura 74 mostra o gráfico de corrente ao longo do tempo. Nela, observa-se que a carga da bateria de BT se inicia com um pico de corrente, atingindo até 45,5 A, e que essa corrente decresce gradualmente até ficar abaixo do limiar programado no Arduino (5 A).

Para este teste, como a bomba d'água era desligada a partir do início do processo de carga, toda a corrente fornecida pelo conversor era direcionada para a bateria de BT. Dessa forma, o limiar programado de 5 A seria atingido em algum momento ao longo do processo de carga.

Apesar de o decréscimo de corrente ser, em geral, gradual, em alguns momentos ele ocorria de maneira abrupta. As Figuras 75(a) a 75(c) mostram uma aproximação nos instantes em que ocorrem as primeiras quedas abruptas. Em todos os casos, observa-se que, ao atingir 14,5 A, a corrente apresenta uma queda brusca, reduzindo-se instantaneamente em cerca de 1 A.

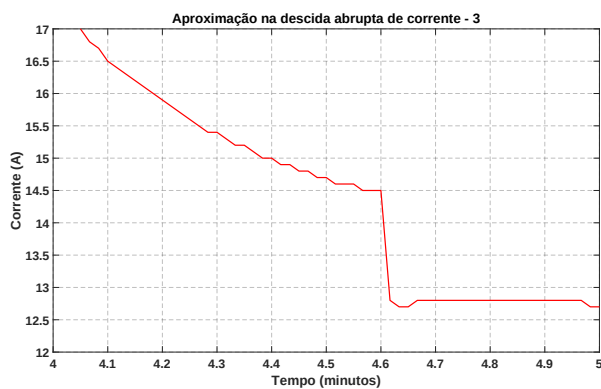
As Figuras 76(a) e 75(b) evidenciam quedas similares nas correntes de 9,7 A e 5,7 A, respectivamente. As quedas nesses valores de corrente também se repetem nos demais processos de carga.

Figura 74 – Gráfico Corrente x Tempo — Teste 3.



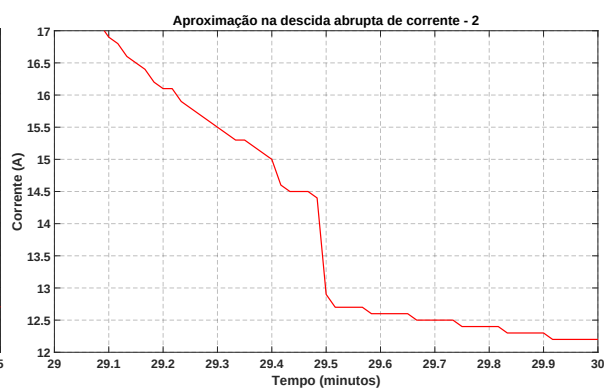
Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 75 – Aproximações em 14,5 A.



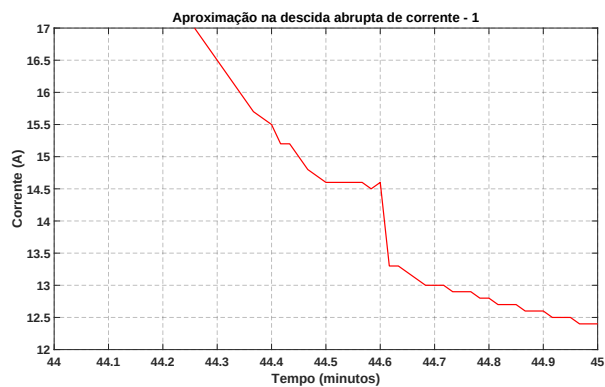
(a) Minuto 4.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)



(b) Minuto 29.

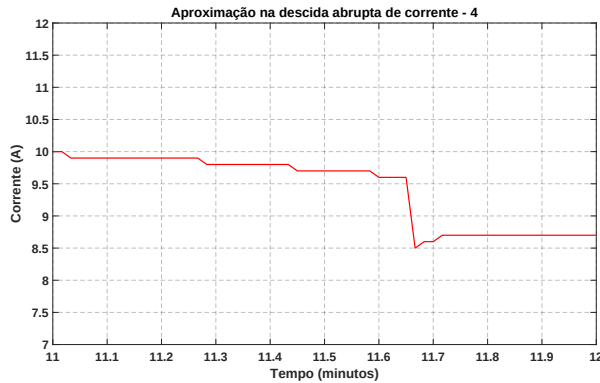
Fonte: Elaborada pelo autor (2025)



(c) Minuto 44.

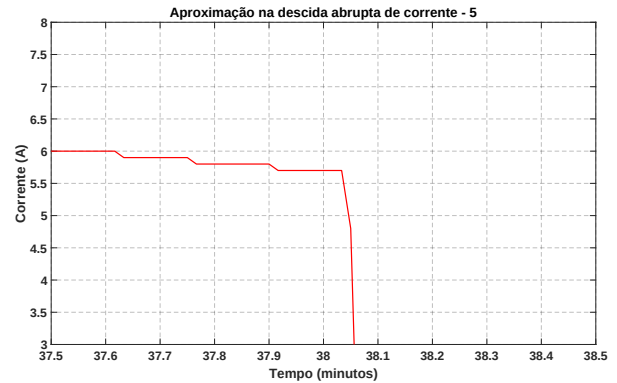
Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 76 – Outras aproximações.



(a) 9,7 A no minuto 11.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)



(b) 5,7 A no minuto 37,5.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

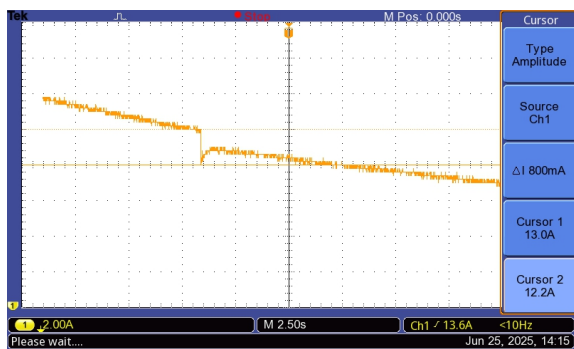
A queda em 5,7 A justifica o fato de que, embora o limiar de desligamento esteja programado para 5 A, a corrente no momento de término da carga parece, visualmente, estar distante desse valor.

Para investigar a origem das quedas abruptas de corrente, foi utilizado um osciloscópio com ponteira de corrente na saída do conversor. O objetivo foi verificar se essas quedas eram causadas por falhas na medição do APM ou se resultavam de algum processo interno de liberação de corrente.

As Figuras 77(a) e 77(b) mostram esse comportamento em dois momentos distintos. Embora as quedas não ocorram exatamente nas mesmas faixas de corrente registradas pela comunicação CAN do APM, a repetição do fenômeno indica que ele é real e não decorre de erro de medição, mas sim de algum mecanismo interno do conversor.

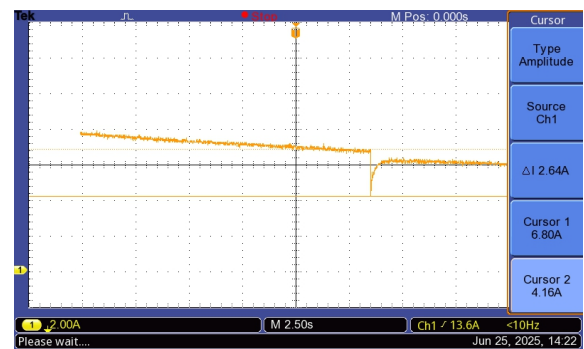
Na Figura 77(b), a corrente instantânea atinge 4,16 A e o conversor não é desligado. Isso pode ser explicado pelo fato de as medições serem realizadas a cada 100 ms, e o valor ter sido apenas um vale pontual abaixo de 5 A.

Figura 77 – Medições de quedas de corrente no osciloscópio.



(a) Queda em 13 A.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)



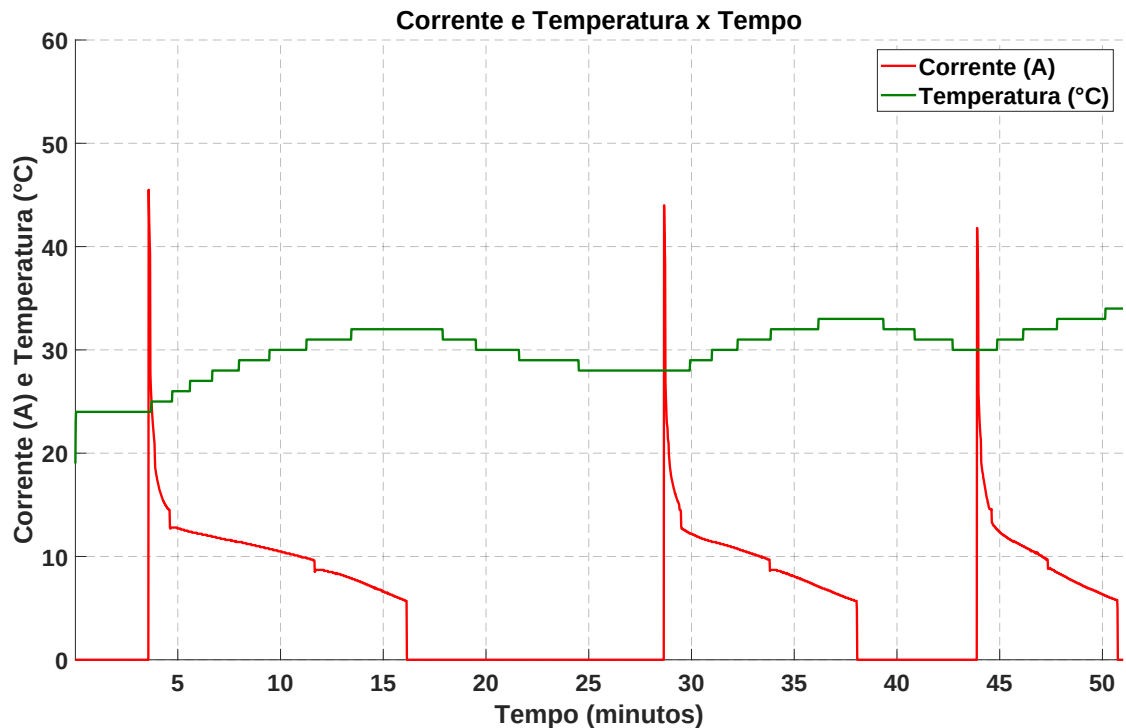
(b) Queda em 6,8 A.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

A Figura 78 mostra a temperatura e a corrente do conversor ao longo do tempo. Nota-se

que o conversor não aqueceu de forma significativa, devido às baixas demandas de corrente no processo, atingindo um pico de temperatura de 34 °C.

Figura 78 – Gráfico Temperatura e Corrente x Tempo — Teste 3.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

A Figura 79 apresenta, em um mesmo gráfico, as curvas de corrente e tensão ao longo do tempo, com o objetivo de visualizar de forma mais detalhada os processos de carga e descarga da bateria.

Com base na análise da curva de carga da bateria, conclui-se que o método de carregamento utilizado pelo conversor é o de tensão constante, evidenciado pela semelhança do gráfico com o apresentado na Seção 2.4.2.2.

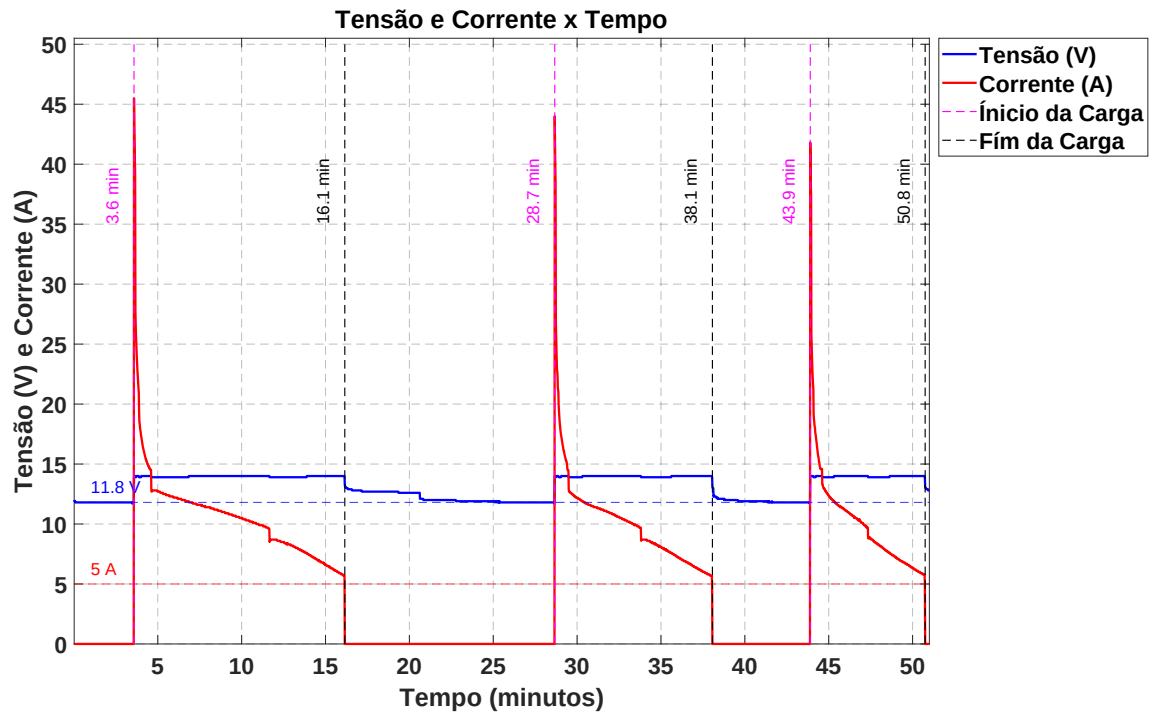
As linhas tracejadas em rosa indicam o início dos ciclos de carga, enquanto a linha preta representa o fim do processo. A Tabela 10 apresenta os tempos medidos para cada uma das três cargas e duas descargas completas observadas.

Tabela 10 – Tempos de carga e descarga da bateria de BT.

Número	Tempo de Carga (min)	Tempo de Descarga (min)
1	12,5	12,6
2	9,4	5,8
3	6,9	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 79 – Gráfico Tensão e Corrente x Tempo — Teste 3.

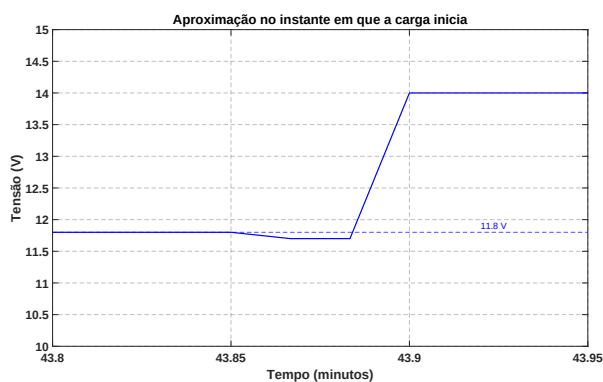


Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

A redução nos tempos de carga e descarga é característica de baterias de chumbo-ácido. Após a descarga, essas baterias apresentam um fenômeno conhecido como relaxamento de tensão, conforme explicado na Seção 2.4.1. Dessa forma, embora em todos os ciclos a tensão tenha ficado abaixo de 11,8 V — valor utilizado como limiar para o início da carga —, o SOC da bateria era distinto em cada situação, o que influenciou diretamente a duração dos respectivos processos de carga e descarga.

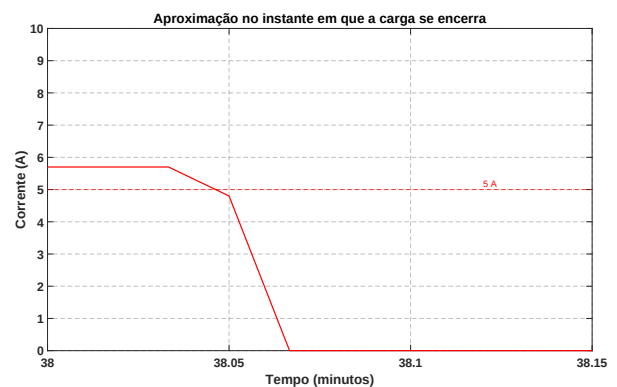
As Figuras 80(a) e 80(b) apresentam uma aproximação dos gráficos de tensão e corrente nos momentos de início e fim da carga, respectivamente.

Figura 80 – Aproximações no início e fim da carga.



(a) Aproximação no gráfico de tensão no início da carga.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)



(b) Aproximação no gráfico de corrente no fim da carga.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Observa-se que, no caso da tensão, os valores permanecem abaixo do limiar programado por um período mais prolongado. Já para a corrente, uma única medição inferior a 5 A é suficiente para cessar o processo de carregamento. Essa diferença se deve ao fato de que, durante os testes, a medição de tensão apresentou oscilações ocasionais, que poderiam acionar falsamente o início da carga. Para evitar esse problema, foi implementado um critério de validação no qual a carga só é iniciada caso a tensão permaneça inferior a 11,8 V por dez medições consecutivas. Esse tipo de oscilação não foi observado nas leituras de corrente.

4.4 TESTE 4: OPERAÇÃO DO APM COM CAPACIDADE MÁXIMA DO SISTEMA

Este teste teve como objetivo validar o funcionamento do APM com todas as cargas operando na corrente máxima suportada, verificando se o conversor ainda teria potência suficiente para carregar a bateria de BT durante o funcionamento integral do sistema ou se a bateria se descarregaria ao longo do tempo.

As cargas do sistema de BT foram previamente apresentadas na Tabela 1. No entanto, no momento da realização do teste, estavam prontas para serem ligadas apenas a bomba d'água maior e o eletroventilador. Dessa forma, foi necessário dimensionar um banco de resistores que consumisse a mesma corrente das demais cargas, considerando uma tensão de 14 V (valor típico da bateria durante o processo de carga).

O *setup* do teste foi composto pelos seguintes equipamentos:

- Conversor APM;
- Alicates amperímetro;
- Multímetro;
- Bateria de 12 V;
- Fonte bidirecional CC *KEYSIGHT* RP7972A (1000 V e ± 60 A);
- Fusível automotivo de 100 A e 12 V;
- Disjuntor CC de 1000 V e 10 A;
- Arduino Mega;
- Módulo MCP2515;
- Módulo leitor de cartão micro SD (para aquisição de dados);
- Bomba d'água maior;
- Eletroventilador;
- Seis resistores de 1,5 Ω e 1 kW;

- Osciloscópio com ponteira de corrente;
- Dois resistores de $1\text{ k}\Omega$ e $0,25\text{ W}$;
- CI SN7417N;
- Caixa de fusíveis;
- Notebook (para leitura dos dados via monitor serial).

Desconsiderando a corrente consumida pela bomba d'água maior e pelo eletroventilador, as demais cargas somam um consumo de $23,9\text{ A}$. Considerando a tensão de operação de 14 V , é possível calcular uma resistência equivalente que simule essas cargas, conforme a equação:

$$R_1 = \frac{V_{BT}}{I_{eq1}} = \frac{14}{23,9} = 0,59\ \Omega \quad (5)$$

Onde R_1 é o valor calculado para a resistência equivalente 1 e I_{eq1} é a corrente equivalente do sistema de BT, desconsiderando a bomba d'água maior e o eletroventilador.

Com base no banco de resistores de $1,5\ \Omega$ disponível, três resistores foram associados em paralelo, resultando em uma resistência equivalente de $0,5\ \Omega$.

A potência dissipada por esse arranjo é calculada da seguinte forma:

$$P_{r1} = \frac{V_{BT}^2}{r_1} = \frac{14^2}{0,5} = 392\text{ W} \quad (6)$$

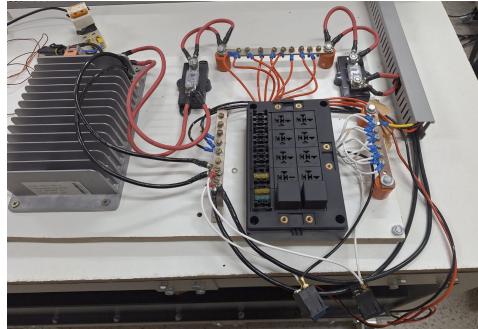
Onde P_{r1} é a potência dissipada pela resistência equivalente 1 e r_1 é o valor da resistência equivalente 1 utilizada no teste.

Como a associação de três resistores suporta até 3 kW , o circuito foi considerado adequado.

Durante a realização do teste, o eletroventilador apresentou falhas de funcionamento. Como o objetivo principal era verificar se o APM conseguiria alimentar todas as cargas simultaneamente e, ao mesmo tempo, carregar a bateria de BT, os outros três resistores do banco foram conectados em paralelo para simular o eletroventilador. A associação de três resistores em paralelo resultou em uma corrente superior à que seria consumida pelo eletroventilador real. No entanto, essa escolha foi intencional, pois, como a resistência equivalente era muito baixa, qualquer impedância adicional no sistema — proveniente de cabos, conexões ou componentes em série — já aumentaria significativamente a resistência total. Como o objetivo era apenas garantir que a corrente não fosse inferior à que seria consumida pelo eletroventilador, optou-se por utilizar o menor valor disponível de resistência.

A conexão e o acionamento da bomba d'água e de um dos bancos de resistores foram realizados com auxílio de chaves que comandavam relés na caixa de fusíveis, conforme ilustrado na Figura 81. A chave da esquerda liga a bomba d'água e a da direita aciona o banco de resistores.

Figura 81 – Montagem física do teste 4.

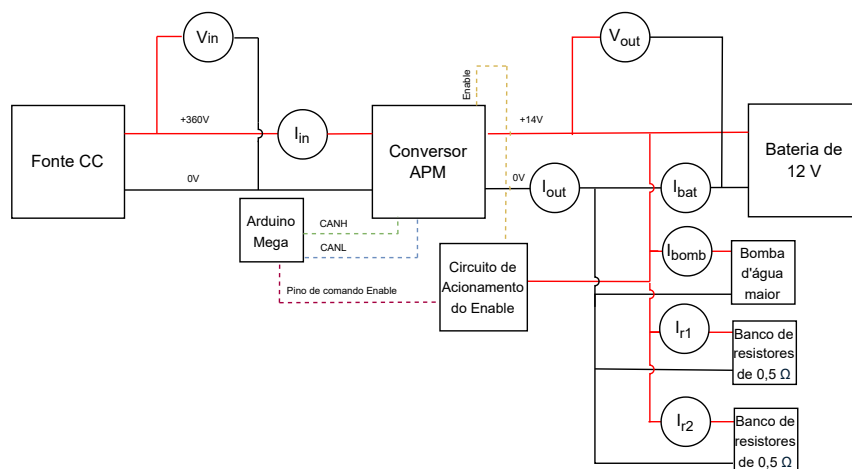


Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

O outro banco de resistores foi acionado fora da caixa de fusíveis, por meio de chaves conectadas diretamente ao barramento de potência. Como cada chave suportava no máximo 15 A e o circuito com resistência de $0,5\ \Omega$ exigia 28 A, foi necessário utilizar duas chaves em paralelo para evitar o superaquecimento delas.

A Figura 82 apresenta o diagrama de montagem do teste 4.

Figura 82 – Diagrama da montagem do teste 4.

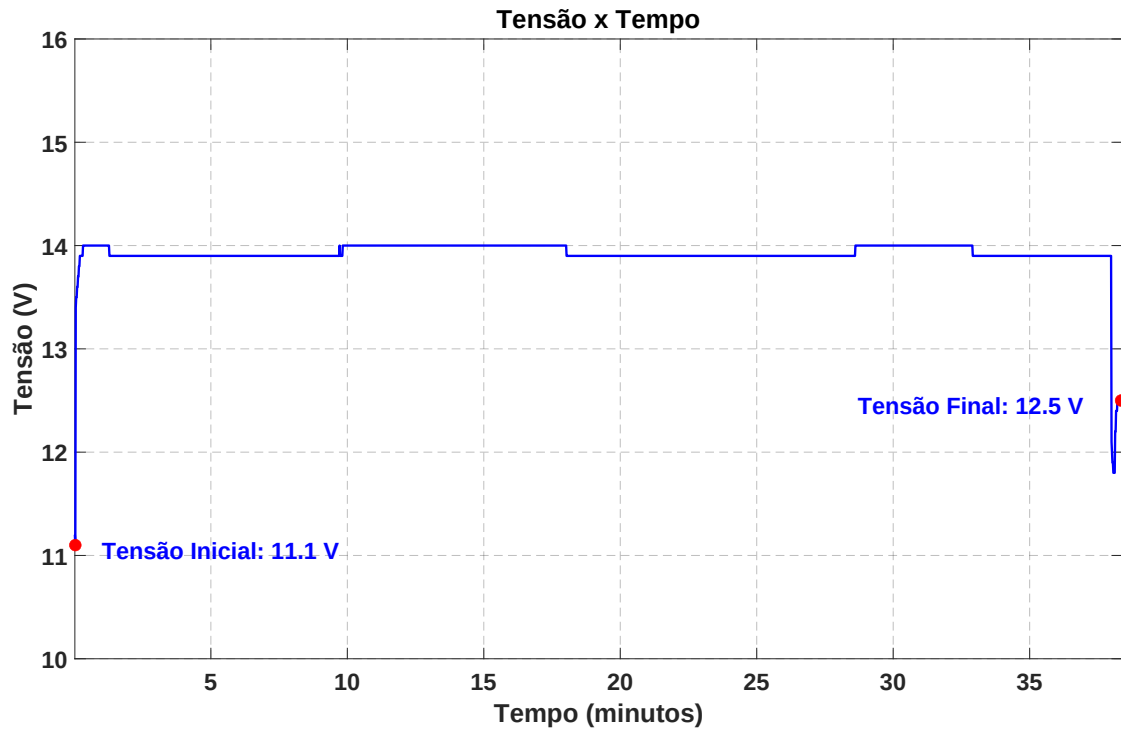


Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

O teste teve duração total de 39 minutos. Esse tempo mais curto se justifica porque o objetivo não era observar múltiplos ciclos de carga e descarga da bateria de BT, mas sim avaliar a capacidade do APM de carregá-la em condições extremas. Durante o teste, foram realizados degraus de carga com o intuito de analisar a resposta do APM e da bateria a variações abruptas de corrente.

A Figura 83 apresenta o gráfico da tensão ao longo do tempo, destacando os valores inicial (11,1 V) e final (12,5 V). Vale destacar que, devido ao efeito de relaxação da tensão, o valor final não representa de forma precisa o SOC da bateria, uma vez que a tensão tende a se elevar durante o repouso.

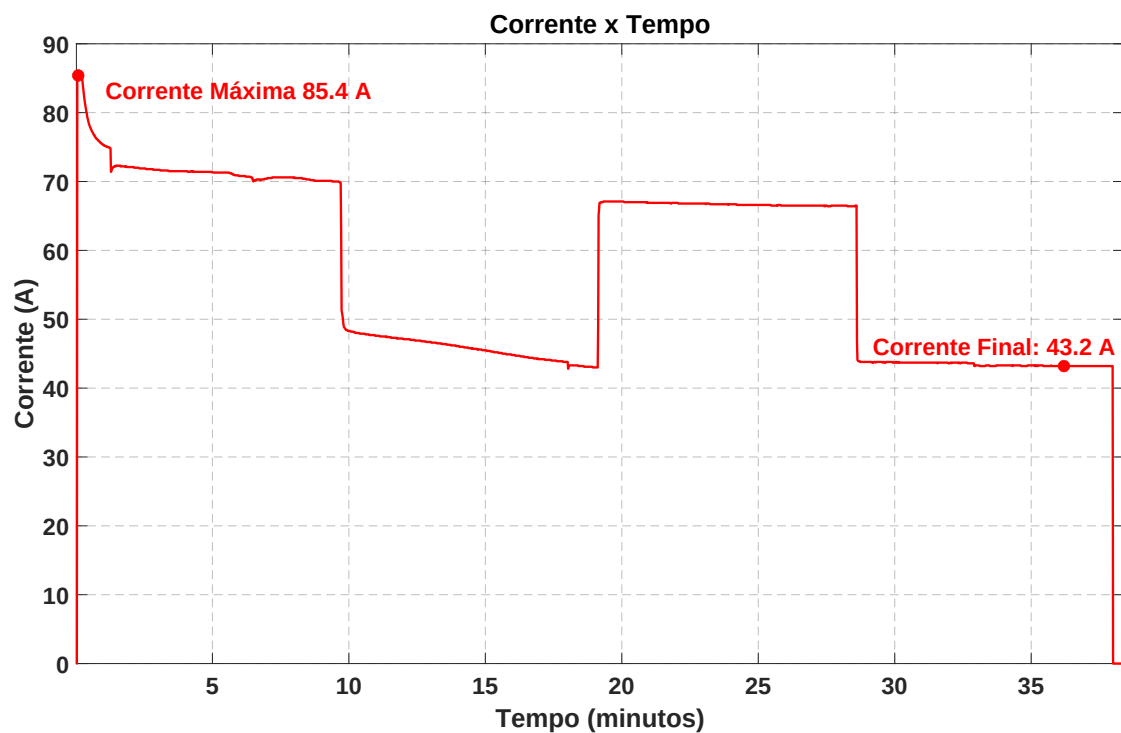
Figura 83 – Gráfico Tensão x Tempo — Teste 4.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

A Figura 84 mostra a evolução da corrente ao longo do tempo, destacando os valores máximos e finais registrados antes do desligamento.

Figura 84 – Gráfico Corrente x Tempo — Teste 4.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Nota-se que, ao iniciar o funcionamento do conversor, a corrente atinge 85,4 A, valor superior à corrente nominal de saída especificada no *datasheet* do APM (72 A). Na Figura 88, observa-se que, ao atingir essa corrente, por volta do minuto 1, o conversor entra em saturação, ativando seu controle por corrente. Nesse momento, nota-se que a tensão não sobe imediatamente para 13,9 V, mas se eleva gradualmente, em uma tentativa de evitar problemas relacionados à elevada potência instantânea.

No entanto, o próprio *datasheet* informa que a potência de pico suportada pelo conversor é de 1200 W por até 6 minutos. Assim, considerando uma tensão de 14 V, a corrente de pico é calculada por:

$$I_{out_{pico}} = \frac{P_{out_{pico}}}{V_{BT}} = \frac{1200}{14} = 85,71 \text{ A} \quad (7)$$

Onde $I_{out_{pico}}$ e $P_{out_{pico}}$ são respectivamente a corrente e potência de pico na saída do conversor.

Portanto, a corrente medida está dentro do limite especificado.

Com o passar do tempo, a corrente decresce, exibindo quedas abruptas semelhantes às observadas na Seção 4.3. A partir do minuto 25, o valor se estabiliza. As demais cargas ligadas ao conversor, além da bateria de BT, apresentam consumo constante. As medições de corrente na bomba d'água maior e nos bancos de resistores são mostradas nas Figuras 85(a) a 85(c).

Figura 85 – Medições de corrente em cada componente no teste 4.



(a) Corrente na bomba d'água.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)



(b) Corrente no primeiro resistor equivalente.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)



(c) Corrente no segundo resistor equivalente.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Com base nessas medições, é possível estimar a corrente instantânea fornecida à bateria de BT, subtraindo das leituras do APM as correntes consumidas pelas cargas fixas, conforme descrito nas equações 8 e 9, que correspondem às situações de carga total e carga reduzida (após o degrau), respectivamente.

$$I_{out} = I_{bat} + I_{bomb} + I_{r1} + I_{r2} \rightarrow I_{bat} = I_{out} - (I_{bomb} + I_{r1} + I_{r2}) = I_{out} - 61,3 \quad (8)$$

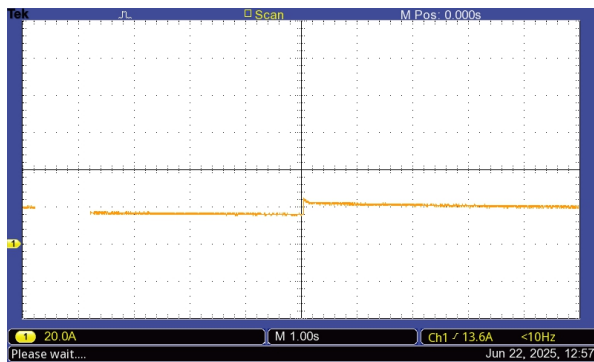
$$I_{out} = I_{bat} + I_{bomb} + I_{r2} \rightarrow I_{bat} = I_{out} - (I_{bomb} + I_{r2}) = I_{out} - 37,7 \quad (9)$$

Onde I_{bat} , I_{bomb} , I_{r_1} I_{r_2} são as correntes consumidas pela bateria de BT, pela bomba d'água maior, pela resistência equivalente 1 e pela resistência equivalente 2, respectivamente.

A partir disso, conclui-se que a corrente fornecida para a bateria, ao final do teste, era de aproximadamente 5,5 A.

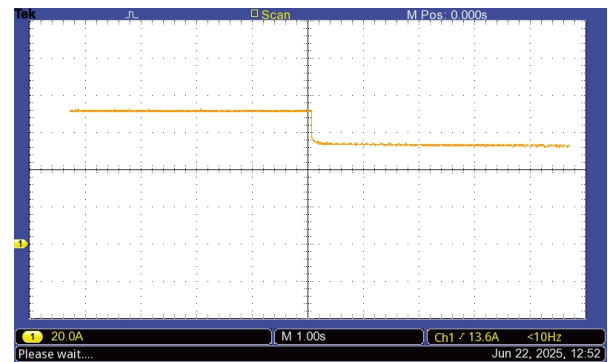
As Figuras 86(a) e 86(b) mostram, respectivamente, a resposta da bateria de BT e do conversor APM à retirada da resistência equivalente r_1 do circuito. Nota-se que a corrente fornecida pela bateria apresentou uma leve variação. Isso se deve ao aumento da tensão fornecida pelo APM, de 13,9 V para 14 V nesse instante, o que provoca um acréscimo na corrente que flui através da resistência interna da bateria. Por sua vez, a corrente no APM sofreu uma queda correspondente à corrente que deixou de ser fornecida à carga.

Figura 86 – Resposta ao degrau de carga.



(a) Resposta na corrente da bateria de BT.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

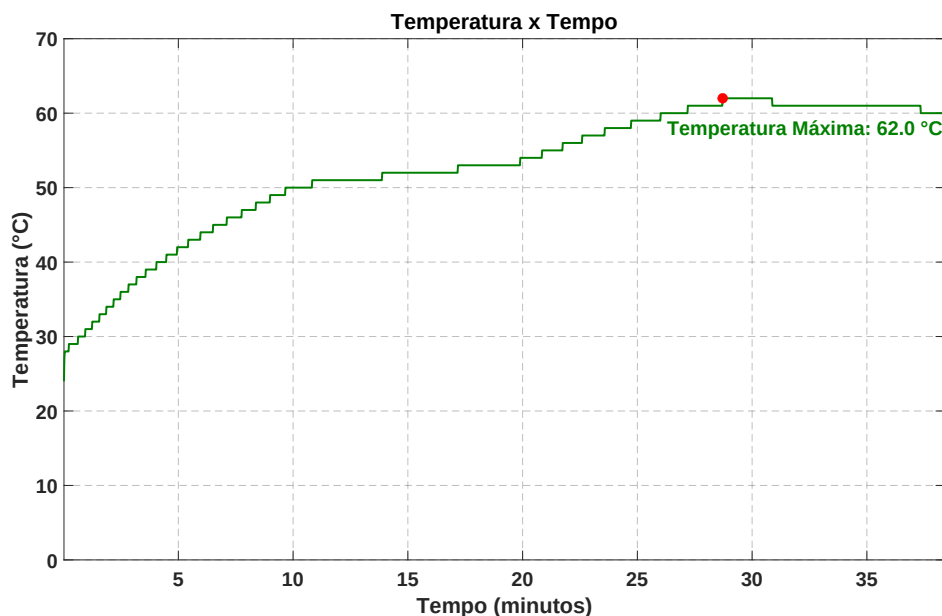


(b) Resposta na corrente do APM.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

A Figura 87 apresenta o gráfico da temperatura ao longo do tempo.

Figura 87 – Gráfico Temperatura x Tempo — Teste 4.

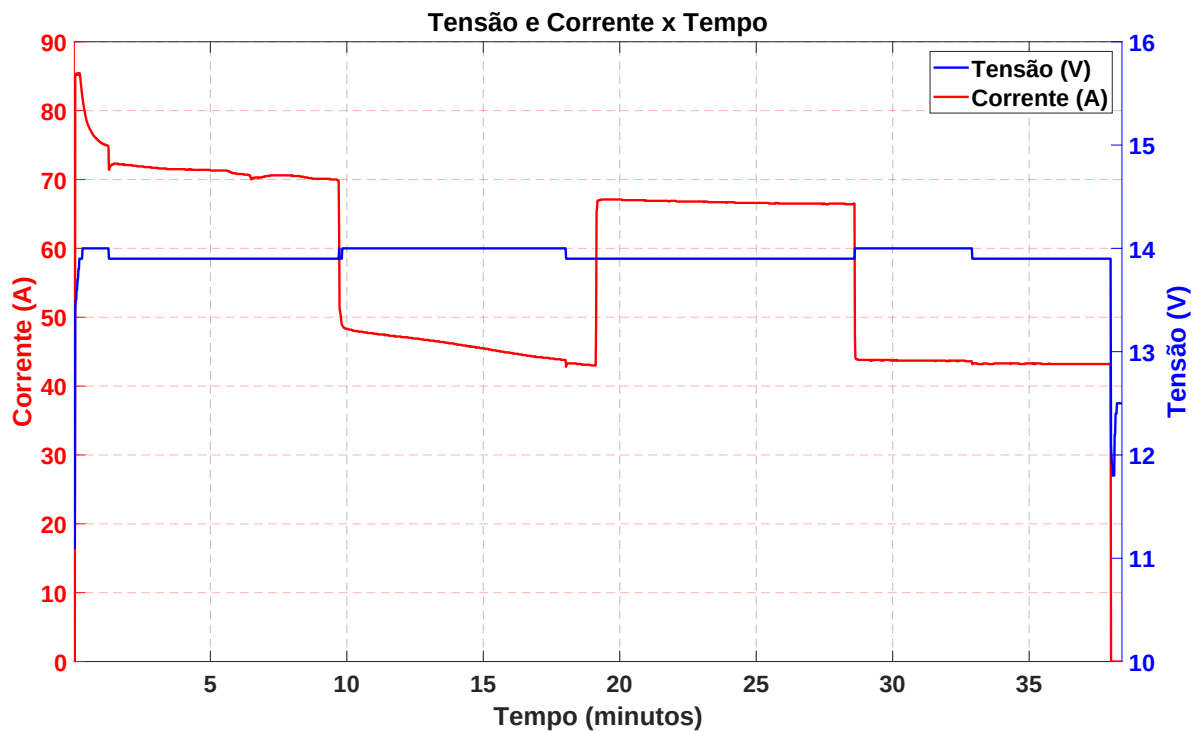


Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Observa-se que, neste teste, a temperatura atingiu o maior valor entre todos os ensaios (62,0 °C), o que se deve à alta demanda de corrente do conversor. Ainda assim, esse valor permanece significativamente abaixo do limite máximo suportado, que, segundo o *datasheet*, é de 85 °C — temperatura a partir da qual o conversor pode apresentar falhas.

A Figura 88 mostra o gráfico combinado da tensão e corrente ao longo do tempo. A análise permite concluir que os momentos em que a tensão fornecida pelo conversor oscila entre 14 V e 13,9 V coincidem com quedas abruptas de corrente, provocadas tanto pelos degraus de carga quanto pelos eventos já discutidos na Seção 4.3.

Figura 88 – Gráfico Tensão e Corrente x Tempo — Teste 4.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Ao observar novamente a Figura 79, é possível constatar o mesmo comportamento, o que reforça a justificativa para as variações de tensão durante a carga da bateria.

Conclui-se, ao final do teste 4, que o conversor APM tem capacidade de carregar a bateria de BT enquanto alimenta simultaneamente as demais cargas do sistema. Isso é evidenciado pelo fato de que, em determinado momento, a corrente fornecida à bateria alcança os 5 A, indicando que ela está quase completamente carregada, e o conversor continua operando apenas para suprir as cargas.

Como resultado da análise, foi identificado um erro na lógica do circuito de acionamento do *enable*. Durante o funcionamento normal do carro, algumas cargas permanecerão ligadas continuamente — como as bombas d'água —, o que impediria o APM de desligar mesmo com a bateria carregada. Isso ocorre porque a corrente total consumida pelas cargas excede o limiar de desligamento programado (5 A), impedindo que essa condição seja atingida.

4.5 TESTE 5: CORREÇÃO NA LÓGICA DO CIRCUITO DE *ENABLE*

Uma solução encontrada para o funcionamento correto da lógica de acionamento do *enable* foi adicionar os valores de corrente das cargas que estarão sempre ligadas ao limiar programável de 5 A.

Esta seção visa testar essa alteração lógica para comprovar a viabilidade do circuito.

O *setup* do teste foi idêntico ao da Seção 4.3, porém agora a carga utilizada para descarregar a bateria de BT permaneceu ligada durante o processo de carga também.

Além disso, este teste não foi mais realizado com a fonte bidirecional, e sim conectado diretamente à bateria de AT, com o intuito de verificar o funcionamento real do conversor. Os parâmetros da bateria de AT (tensão, corrente e SOC) enviados pelo BMS foram armazenados junto às demais informações durante o teste.

Assim, os equipamentos utilizados neste teste foram:

- Conversor APM;
- Alicates amperímetro;
- Multímetro;
- Bateria de 12 V;
- Bateria de 360 V;
- Fusível automotivo de 100 A e 12 V;
- Disjuntor CC de 1000 V e 10 A;
- Arduino Mega;
- Módulo MCP2515;
- Módulo leitor de cartão micro SD (para aquisição de dados);
- Bomba d'água maior;
- Dois resistores de 1 k Ω e 0,25 W;
- CI SN7417N;
- Notebook (para leitura dos dados via monitor serial).

Como as medições de tensão e SOC da bateria de AT tendem a permanecer constantes, não se fez necessário plotar gráficos com esses parâmetros. Assim, os valores iniciais e finais de tensão e SOC na bateria de AT são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – V_{in} e SOC da bateria de AT — início e fim do teste 5.

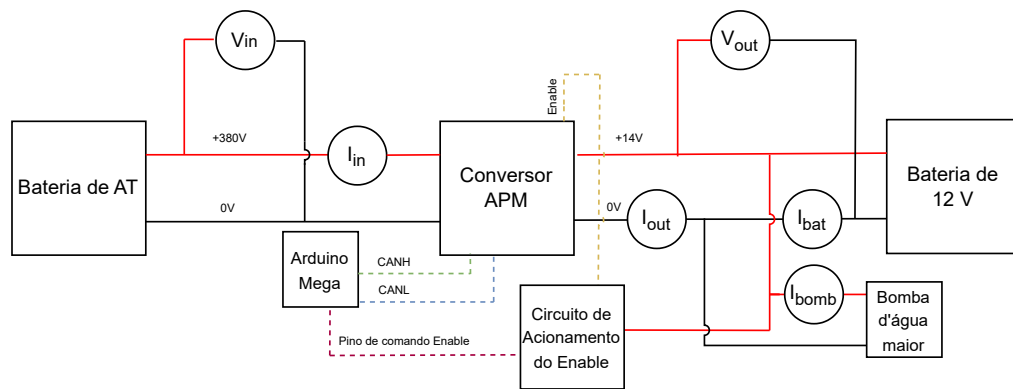
Parâmetro	Inicial	Final
V_{in} (V)	369	368
SOC (%)	79	79

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Observa-se que a bateria de AT não sofreu uma descarga significativa durante o período de testes.

A Figura 89 apresenta o diagrama da montagem do teste 5.

Figura 89 – Diagrama da montagem do teste 5.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Como, neste teste, a carga que permanecerá constantemente ligada no sistema é a bomba d'água maior, ela foi conectada em 14 V (tensão típica durante o processo de carga da bateria de BT) e sua corrente foi registrada. Constatou-se que a corrente era de 13 A. Assim, considerando o antigo limiar de 5 A, o novo limite de corrente foi definido como 18 A.

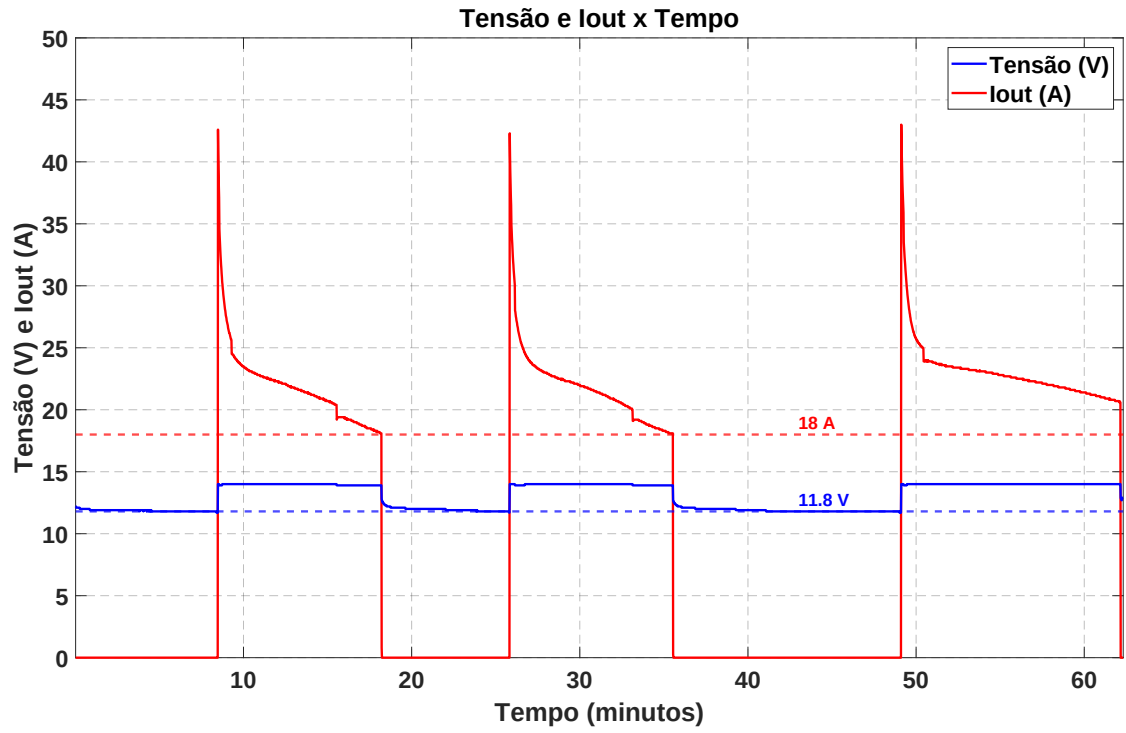
A Figura 90 mostra o gráfico de tensão e corrente de saída ao longo do tempo. Observa-se um comportamento muito similar ao gráfico da Figura 79, com a principal diferença sendo o limiar de corrente alterado. Assim, a modificação no circuito de acionamento do *enable* foi validada, possibilitando a implementação do circuito no veículo real.

Outro aspecto analisado neste teste foi o comportamento da bateria de AT como fonte de alimentação do sistema. A Figura 91 apresenta o gráfico das correntes de entrada (I_{in}) e de saída (I_{out}) do conversor ao longo do tempo. No entanto, como as medições de I_{in} foram realizadas pelo BMS da bateria de AT, o fundo de escala adotado era elevado, o que comprometeu a resolução dos dados e dificultou uma comparação precisa entre as correntes.

Durante os processos de carga da bateria, a curva de corrente de entrada manteve-se praticamente constante, impedindo uma análise adequada. Diante disso, foi necessário realizar

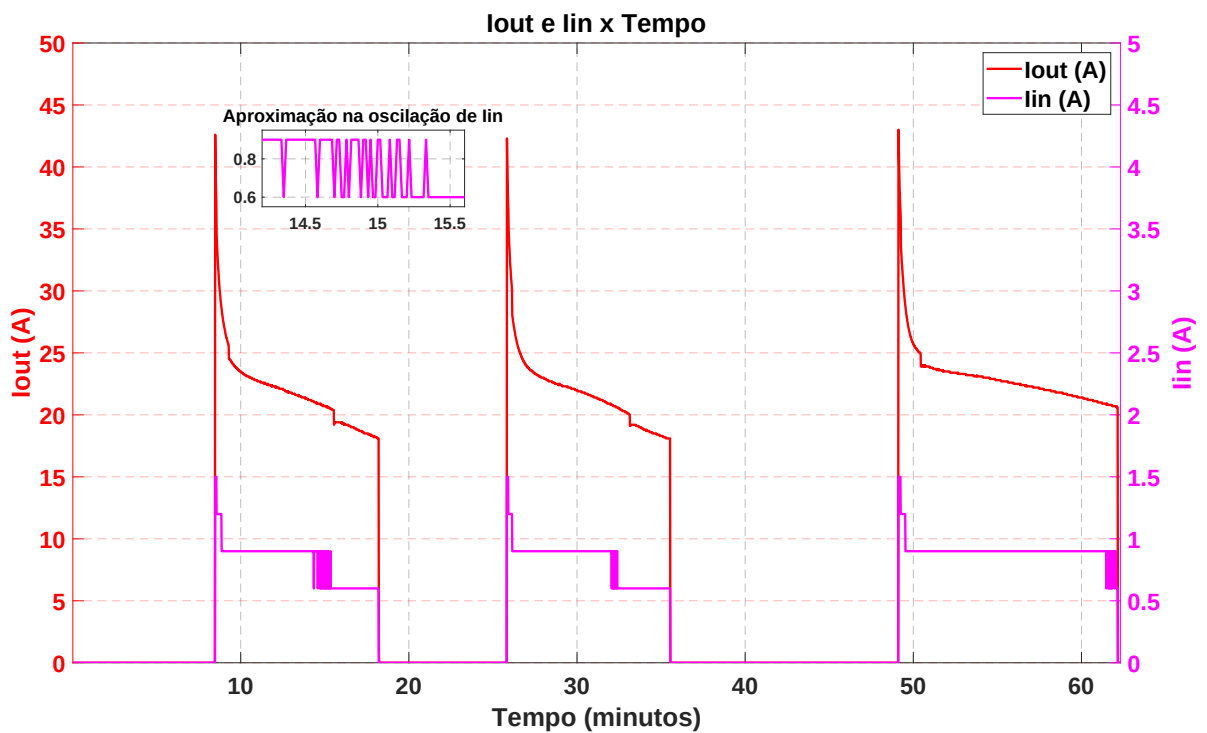
um complemento ao Teste 5, com o objetivo de observar mais claramente o comportamento comparativo entre as correntes de entrada e de saída do conversor.

Figura 90 – Gráfico Tensão e Corrente de saída x Tempo — Teste 5.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Figura 91 – Gráfico Corrente de entrada e de saída x Tempo — Teste 5.

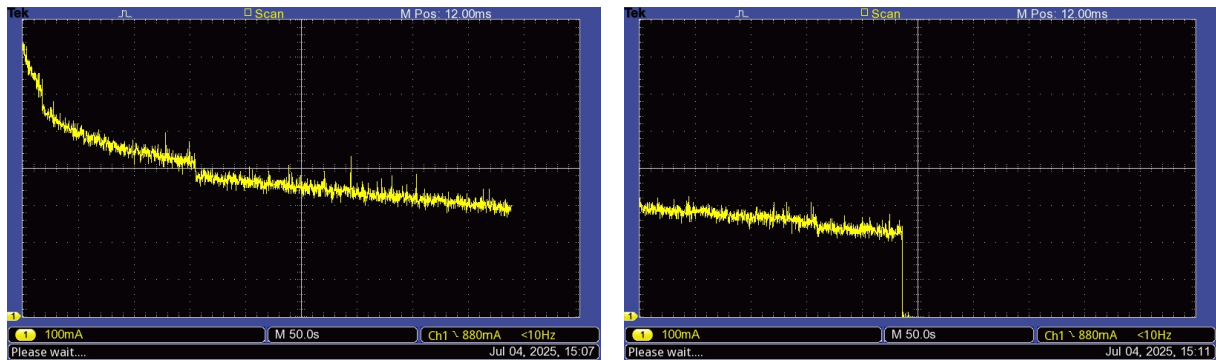


Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

4.5.1 Complemento do Teste 5

Para a realização deste complemento, manteve-se a montagem do Teste 5. No entanto, em vez de realizar a aquisição dos dados de corrente de entrada do conversor por meio do BMS, foi utilizado um osciloscópio com ponteira de corrente, conectado ao terminal positivo da bateria de AT. A escala de tempo foi ajustada para 50 segundos. Como o processo de carga teve duração aproximada de 10 minutos, foi necessário registrar duas imagens da tela do osciloscópio, apresentadas nas Figuras 92(a) e 92(b).

Figura 92 – Corrente de entrada do APM no complemento do Teste 5.



(a) Parte 1.

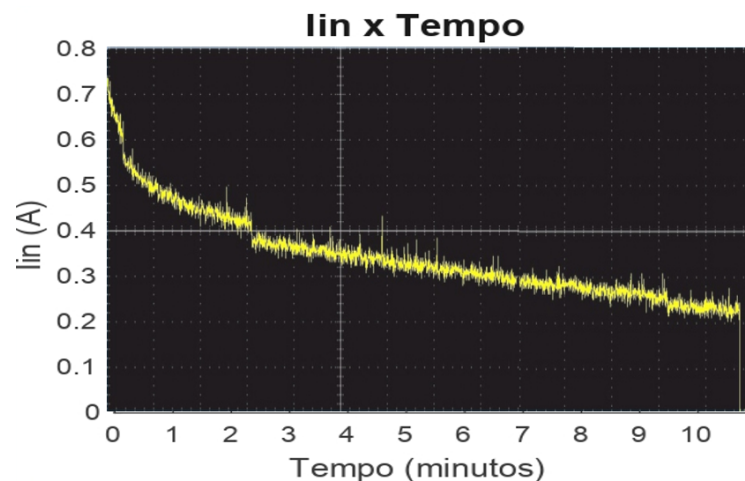
Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

(b) Parte 2.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

Posteriormente, as imagens foram unidas, e adicionaram-se escalas de tempo e corrente. A Figura 93 apresenta o gráfico obtido após esse processo.

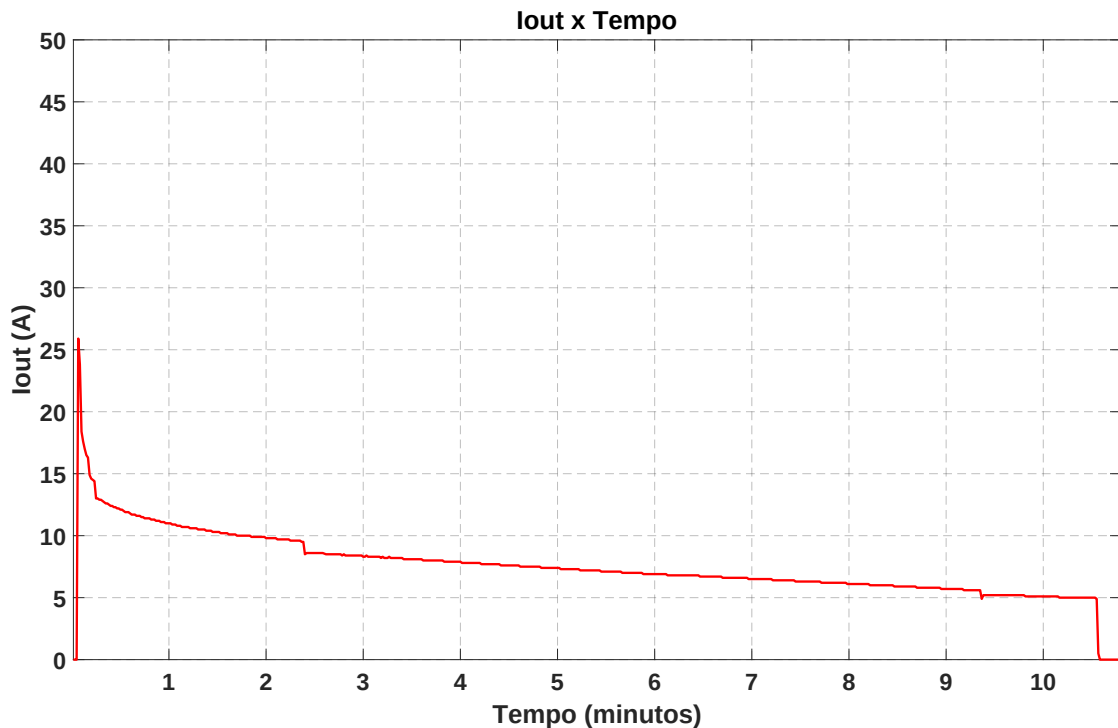
Figura 93 – Gráfico Corrente de entrada x Tempo – Complemento do Teste 5.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

A medição da corrente de saída foi fornecida pelo próprio conversor APM. A Figura 94 ilustra o comportamento da corrente de saída ao longo do tempo. Comparando os dois gráficos, observa-se que ambas as correntes apresentam comportamentos similares: ambas registram um pico elevado no início do processo e quedas significativas por volta dos minutos 2 e 9.

Figura 94 – Gráfico Corrente de saída x Tempo – Complemento do Teste 5.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

4.6 COMENTÁRIOS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram realizados cinco testes com o objetivo de validar a implementação do APM no sistema do EV a ser eletrificado.

No teste 1, foi comprovado o funcionamento correto do APM de acordo com as especificações do *datasheet*. No teste 2, estabeleceu-se a comunicação entre o conversor e a ECU auxiliar que será utilizada no EV. No teste 3, foi implementado um circuito para realizar o acionamento automático do conversor, com base em suas leituras paramétricas. No teste 4, foi validado o funcionamento do conversor em uma situação hipotética extrema, com todas as cargas do veículo operando em sua corrente máxima. Por fim, no teste 5, o circuito de acionamento automático do conversor foi corrigido, garantindo sua operação conforme o planejado durante o funcionamento do EV.

Apesar de a solução testada no teste 5 resolver o problema de funcionamento do APM, ela apresenta uma limitação importante: caso haja alteração na corrente de carga que permanecerá constantemente ligada no veículo, o usuário precisaria modificar o código implementado na ECU auxiliar. Embora o acesso à ECU seja possível e a alteração no código seja simples, não é recomendável que o usuário realize essas modificações, pois há risco de alterar acidentalmente outros trechos do código, comprometendo o funcionamento de outros sistemas controlados pela ECU.

Outras duas soluções foram cogitadas, mas também apresentaram desvantagens:

1. Um timer programável que inicia a contagem quando o conversor é ligado e, ao atingir um determinado tempo, o desliga. Caso a bateria de BT esteja com tensão superior ao limiar programado, ela alimentará as cargas de BT até se descarregar o suficiente para que o conversor seja religado. No entanto, se a bateria ainda estiver com tensão inferior ao limiar no momento do desligamento, a medição acusará que ela precisa ser carregada, fazendo com que o conversor seja religado instantaneamente.
2. Uma variável do tipo *int* armazena o número de vezes em que a medição de corrente atual foi igual à anterior. Caso seja igual, o valor da variável é incrementado em 1; caso contrário, ela é zerada. Como as medições ocorrem a cada 100 ms, quando a variável atingir, por exemplo, o valor 20.000, significa que se passaram aproximadamente 2.000 segundos (cerca de 33 minutos) sem alteração na corrente de saída do conversor. Essa estabilização indica que a bateria de BT foi carregada, permitindo o desligamento do conversor, que deixaria de ser controlado por um limiar de corrente.

O principal problema da solução 1 é que a implementação de controle por temporizadores em sistemas programáveis não é recomendada, pois pode ocasionar falhas e comportamentos inesperados, dependendo dos valores de tensão e corrente no momento do desligamento.

Já o problema da solução 2 é que, como nem todas as cargas funcionam continuamente no veículo, o acionamento ou desligamento de uma carga intermitente zeraria indevidamente a variável de contagem. Isso resultaria em alterações na corrente mesmo sem que a bateria ainda estivesse sendo carregada, invalidando a lógica de desligamento baseada na estabilização da corrente.

Adicionalmente, foi incorporado à lógica de controle do conversor o monitoramento do SOC da bateria de AT. Caso o SOC atinja um valor inferior a 20%, o circuito desativa automaticamente o APM, priorizando a preservação da bateria de tração em detrimento das cargas auxiliares. O APM volta a operar apenas quando a bateria for recarregada acima desse limite, promovendo uma operação mais segura e eficiente do sistema.

Outra sugestão para o projeto final consiste em não utilizar os valores de tensão e corrente para habilitar ou desabilitar o carregamento da bateria de BT. Nesse método, o APM seria desligado apenas quando o veículo fosse desligado ou quando o SOC da bateria de AT estivesse abaixo de 20%.

5 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu o estudo, a seleção, a aquisição e a validação de um APM adequado à eletrificação de uma van da Udesc. Durante o desenvolvimento, foi possível compreender as principais topologias de conversores disponíveis no mercado, bem como os requisitos técnicos necessários para sua aplicação em EVs. Além disso, foram projetados e implementados os sistemas periféricos indispensáveis ao funcionamento do APM.

A fundamentação teórica desenvolvida no Capítulo 2 auxiliou na compreensão da estrutura de um PHEV, dos sistemas componentes de um EV, bem como na análise do mercado mundial e nacional desses veículos. Também possibilitou a descrição das vantagens e desvantagens de diversas topologias de conversores aplicáveis ao projeto, além de pontuar as principais características desejáveis nesses dispositivos. Ademais, foram apresentados os principais métodos de carga de baterias de chumbo-ácido e os protocolos de comunicação utilizados em EVs, com destaque para o protocolo CAN padrão SAEJ1939, empregado na aplicação final.

O desenvolvimento do projeto foi descrito no Capítulo 3, no qual é detalhado o processo de montagem da estrutura necessária para a implementação do conversor APM. O capítulo se inicia com o levantamento das cargas de BT, com o objetivo de estimar a potência do conversor a ser adquirido. Em seguida, foi realizada uma pesquisa de mercado, avaliando os APMs mais adequados entre os oferecidos por empresas líderes no setor de componentes para EVs.

Ainda no Capítulo 3, foram descritas as características do conversor escolhido, TDC-IY-320-12, com destaque para seus esquemáticos e o mapa CAN da sua comunicação. Também foram detalhadas as etapas de dimensionamento, projeto e aquisição da PDU e da caixa de fusíveis, sistemas fundamentais para o funcionamento do APM. Por fim, foram apresentados os sistemas periféricos auxiliares desenvolvidos, como o circuito de acionamento via *enable* e a IHM de monitoramento do conversor.

No Capítulo 4, foram descritos os testes realizados para validação do conversor, com a apresentação dos objetivos de cada ensaio, bem como análises quantitativas e qualitativas dos resultados obtidos. Ao final do capítulo, são relatadas as modificações realizadas no programa da ECU auxiliar, além de serem propostas possíveis soluções para os problemas identificados.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a integração do APM com os demais componentes do *powertrain* do veículo e a realização de testes em condições reais de uso. Destaca-se também a importância de investigar soluções que possibilitem o desligamento do conversor de forma mais inteligente, evitando o consumo desnecessário de energia da bateria de AT.

REFERÊNCIAS

- AMAZON, W. S. O que é o modelo osi? EUA, 2024. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/osi-model/>. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 41.
- CCS, E. Can bus the ultimate guide. Soeren Frichs Vej 38K, 8230 Aabyhoej, Denmark, 2023. Disponível em: <https://www.csselectronics.com/pages/can-bus-ultimate-guide>. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado 6 vezes nas páginas 28, 42, 43, 44, 45 e 46.
- COPPERHILL, T. A brief introduction to the sae j1939 protocol. 21 Mohawk Trail PMB 264 Greenfield, MA 01301, EUA, s.d. Disponível em: <https://copperhilltech.com/a-brief-introduction-to-the-sae-j1939-protocol/>. Acesso em: 4 jun. 2025. Citado na página 45.
- DELTA. 2024 delta electronics. 2024. Disponível em: <https://www.deltaww.com/en-US/index>. Acesso em: 21 nov. 2024. Citado na página 51.
- DILONG. 2024 dilong charger. 2024. Disponível em: <https://www.powerdilong.com>. Acesso em: 21 nov. 2024. Citado na página 48.
- DILONG. **APM Specification Sheet**. [S.l.], 2024. V001.002. Acesso em: 21 nov. 2024. Citado 4 vezes nas páginas 49, 53, 54 e 55.
- DORLECO. Ecu vs vcu. 2024. Disponível em: <https://dorleco.com/ecu-vs-vcu/>. Acesso em: 13 fev. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- DUAN, C.; BAI, H.; GUO, W.; NIE, Z. Design of a 2.5-kw 400/12-v high-efficiency dc/dc converter using a novel synchronous rectification control for electric vehicles. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 1, n. 1, p. 106–114, 2015. Acesso em: 28 mai. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- EHSANI, M.; GAO, Y.; LONGO, S.; EBRAHIMI, K. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles**. 3. ed. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2018. Acesso em: 7 out. 2024. Citado na página 28.
- EMADI, A. **Advanced Electric Drive Vehicles**. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2015. Acesso em: 4 out. 2024. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 24, 25 e 30.
- EMADI, A.; WILLIAMSON, S.; KHALIGH, A. Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 21, n. 3, p. 567–577, 2006. Acesso em: 3 out. 2024. Citado na página 18.
- EMANET, B.; KİYAK, Performance effective battery management system(bms) design of mini electric vehicles. In: **2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 744–749. Acesso em: 5 jun. 2025. Citado na página 30.
- EVPT. **User Manual**. [S.l.], 2023. V1.3. Acesso em: 21 nov. 2024. Citado 6 vezes nas páginas 50, 53, 54, 55, 56 e 71.
- EVPT. 2024 tianjin. 2024. Disponível em: <https://www.evpt.com.cn/en/>. Acesso em: 21 nov. 2024. Citado na página 50.

EXRO. The brain behind evs: The role of a vehicle control unit. 2025. Disponível em: <https://www.exro.com/industry-insights/the-role-of-a-vehicle-control-unit>. Acesso em: 13 fev. 2025. Citado na página 29.

FARJAH, A.; BAGHERI, E.; SEIFI, A. R.; GHANBARI, T. Main and auxiliary parts of battery storage, aimed to fast charging of electrical vehicles. *In: 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 277–282. Acesso em: 6 out. 2024. Citado na página 31.

FERREIRA, A. A.; GUIMARÃES, E. R.; CONTADOR, J. C. Patente como instrumento competitivo e como fonte de informação tecnológica. **Gestão & Produção**, Universidade Federal de São Carlos, v. 16, n. 2, p. 209–221, Apr 2009. ISSN 0104-530X. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2009000200005>. Acesso em: 28 mai. 2025. Citado na página 40.

GNANAVENDAN, S.; SELVARAJ, S. K.; DEV, S. J.; MAHATO, K. K.; SWATHISH, R. S.; SUNDARAMALI, G.; ACCOUCHE, O.; AZAB, M. Challenges, solutions and future trends in ev-technology: A review. **IEEE Access**, v. 12, p. 17242–17260, 2024. Acesso em: 3 out. 2024. Citado na página 18.

HANNAN, M. A.; HOQUE, M. M.; HUSSAIN, A.; YUSOF, Y.; KER, P. J. State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. **IEEE Access**, v. 6, p. 19362–19378, 2018. Acesso em: 5 out. 2024. Citado na página 29.

HASAN, S. M. N.; ANWAR, M. N.; TEIMORZADEH, M.; TASKY, D. P. Features and challenges for auxiliary power module (apm) design for hybrid/electric vehicle applications. *In: 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6. Acesso em: 3 out. 2024. Citado na página 31.

HAYES, J. G.; GOODARZI, G. A. **Electric Powertrain**: Energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. 1. ed. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2018. Acesso em: 5 jun. 2025. Citado na página 31.

HOLJEVAC, N.; CHELI, F.; GOBBI, M. A study over hybrid electric vehicles role in vehicle concept design. *In: 2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5. Acesso em: 3 out. 2024. Citado na página 22.

HORKOS, P. G.; YAMMINE, E.; KARAMI, N. Review on different charging techniques of lead-acid batteries. *In: 2015 Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 27–32. Acesso em: 6 out. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

HOU, R.; MAGNE, P.; BILGIN, B.; EMADI, A. A topological evaluation of isolated dc/dc converters for auxiliary power modules in electrified vehicle applications. *In: 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1360–1366. Acesso em: 3 out. 2024. Citado 6 vezes nas páginas 18, 35, 36, 38, 39 e 40.

IEA, P. Global ev outlook 2024. França, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Acesso em: 11 jun. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

IEA, P. Global ev outlook 2025. França, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>. Acesso em: 11 jun. 2025. Citado 5 vezes nas páginas 18, 21, 25, 26 e 27.

IEA, P. Renewables share of electricity generation. ca.2023. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/>. Acesso em: 4 out. 2024. Citado na página 27.

KHALIGH, A.; D'ANTONIO, M. Global trends in high-power on-board chargers for electric vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 68, n. 4, p. 3306–3324, 2019. Acesso em: 5 jun. 2025. Citado na página 30.

KHALIGH, A.; LI, Z. 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. Acesso em: 17 jun. 2025. Citado na página 31.

KIM, I.-S. The novel state of charge estimation method for lithium battery using sliding mode observer. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 163, n. 1, p. 584–590, 2006. Acesso em: 17 jul. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

KIM, S. J.; KIM, K.-S.; KUM, D. Feasibility assessment and design optimization of a clutchless multimode parallel hybrid electric powertrain. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 21, n. 2, p. 774–786, 2016. Acesso em: 3 out. 2024. Citado na página 22.

KRISMER, F.; KOLAR, J. W. Accurate small-signal model for the digital control of an automotive bidirectional dual active bridge. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 12, p. 2756–2768, 2009. Acesso em: 7 out. 2024. Citado na página 37.

KUMAR, R. R.; BHARATIRAJA, C.; UDHAYAKUMAR, K.; DEVAKIRUBAKARAN, S.; SEKAR, K. S.; MIHET-POPA, L. Advances in batteries, battery modeling, battery management system, battery thermal management, soc, soh, and charge/discharge characteristics in ev applications. **IEEE Access**, v. 11, p. 105761–105809, 2023. Acesso em: 5 out. 2024. Citado na página 29.

LI, X.; WILLIAMSON, S. S. Comparative investigation of series and parallel hybrid electric vehicle (hev) efficiencies based on comprehensive parametric analysis. *In: 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 499–505. Acesso em: 3 out. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

MATHEUS, Y. Modelo osi: Entenda seu conceito e camadas de funcionamento. **Alura**, Brasil, 2018. Disponível em: https://www.alura.com.br/artigos/conhecendo-o-modelo-osi?srsId=AfmBOorcygZds9NFXMdtTP_QMvDRWDkkAuyRpdfZ6TdUtNlwXVT0FbeV. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 41.

NOLTE, T.; HANSSON, H.; BELLO, L. Automotive communications-past, current and future. *In: 2005 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 8 pp.–992. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 42.

OVAR. 2017 ovartech. 2017. Disponível em: <https://www.ovartech.com>. Acesso em: 22 nov. 2024. Citado na página 52.

OVAR. **User Manual**. [S.l.], s.d. V1.3. Acesso em: 21 nov. 2024. Citado 4 vezes nas páginas 52, 53, 54 e 55.

PATTNAIK, T.; GARG, A.; VERMA, S. R.; BALLAL, M. S.; WATH, M. G.; WAKODE, S. A. Design of a basic bms: A warning system. *In: 2023 5th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6. Acesso em: 5 jun. 2025. Citado na página 30.

RAN, L.; JUNFENG, W.; HAIYING, W.; GECHEN, L. Design method of can bus network communication structure for electric vehicle. *In: International Forum on Strategic Technology 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 326–329. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 42.

RATHORE, R. S.; HEWAGE, C.; KAIWARTYA, O.; LLORET, J. In-vehicle communication cyber security: Challenges and solutions. *Sensors*, v. 22, n. 17, 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/17/6679>. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 40.

ROKICKI, K.; BRUKALSKI, M.; SAR, H. Application of can bus data in road tests of automobiles. *In: 2020 XII International Science-Technical Conference AUTOMOTIVE SAFETY*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 43.

S, P.; REDDY, N. N.; VARGHESE, S. G.; SABHAHIT, J. N. Review on communication technologies used in electric vehicles. *In: 2024 IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 445–451. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 40.

SALES, L. da S. Estudo e implementação de um carregador embarcado para veículos elétricos (on-board charger). 2025. Acesso em: 11 jun. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 74.

SANTOS, W. dos. Estudo e integração de um powertrain híbrido em veículos comerciais. 2025. Acesso em: 11 jun. 2025. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 66.

SERHAN, H. A.; AHMED, E. M. Effect of the different charging techniques on battery life-time: Review. *In: 2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 421–426. Acesso em: 6 out. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

SHUYU, C.; SRIRAM, V.; TAFTI, H. D.; KISHORE, K. R.; LI, Y. H.; TRIPATHI, A.; POU, J. Modular dab dc-dc converter low voltage side dc link capacitor two-stage charging-up control for solid state transformer application. *In: 2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7. Acesso em: 13 jun. 2025. Citado na página 58.

SINGHAI, A.; BANGAR, V.; KIRAR, M. K. Modeling and analysis of a battery management system for electrical vehicles. *In: 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 1–6. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 31.

TECH, H. . H. Why does can adopt twisted pair layout? China, 2022. Disponível em: <https://wireharness.com/can-adopt-twisted-pair/>. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 43.

TEXAS, I. Snx407 and snx417 hex buffers and drivers with open-collector high-voltage outputs. 2016. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn7407.pdf?ts=1749829540259&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Acesso em: 14 jun. 2025. Citado na página 72.

TIDD, J.; PAVITT, K. Managing innovation: Integrating technological, market and organizational change. 01 2011. Acesso em: 28 mai. 2025. Citado na página 40.

VARDHAN, V. V.; SINGH, S. K.; GATLA, R. k.; SRIDHAR, P.; CHATTERJEE, S. Choice of batteries and battery management for new generation electric vehicles. *In: 2022 International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1279–1282. Acesso em: 6 out. 2024. Citado na página 32.

WANG, C.; ZHENG, P.; BAUMAN, J. A review of electric vehicle auxiliary power modules: Challenges, topologies, and future trends. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 38, n. 9, p. 11233–11244, 2023. Acesso em: 3 out. 2024. Citado 6 vezes nas páginas 18, 28, 31, 35, 36 e 37.

XU, C.; LIU, S.; GUO, X.; XIAO, C.; ZOU, X.; ZHANG, L.; LIU, C.; JIANG, W. A novel converter integrating buck-boost and dab converter for wide input voltage. *In: IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 2877–2882. Acesso em: 7 out. 2024. Citado na página 37.

ZHANG, G.; WANG, X.; QIN, P.; SUN, Y. Design of a high-speed can fd transmitter with low electromagnetic interference. *In: 2024 IEEE 2nd International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 526–530. Acesso em: 2 jun. 2025. Citado na página 42.

ZHOU, X.; SHENG, B.; LIU, W.; CHEN, Y.; WANG, L.; LIU, Y.-F.; SEN, P. C. A high-efficiency high-power-density on-board low-voltage dc–dc converter for electric vehicles application. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 36, n. 11, p. 12781–12794, 2021. Acesso em: 6 out. 2024. Citado na página 36.

ZULKIFLI, S.; MOHD, S.; SAAD, N.; AZIZ, A. Split-parallel through-the-road hybrid electric vehicle: Operation, power flow and control modes. *In: 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–7. Acesso em: 3 out. 2024. Citado na página 23.

ANEXO A - LINK DE ACESSO AOS CÓDIGOS PARA ARDUINO

Link de acesso ao drive com os códigos utilizados no Arduino