

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Desenvolvimento de Carregador Rápido para Veículos Elétricos

Marcelo Granato Siqueira

Itajubá, 28 de julho de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Marcelo Granato Siqueira

Desenvolvimento de Carregador Rápido para
Veículos Elétricos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétri-
cos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Robson Bauwelz Gonzatti
Coorientador: Prof. Dr. Rondineli Rodrigues Pereira

28 de julho de 2023
Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Desenvolvimento de Carregador Rápido para Veículos Elétricos.

Marcelo Granato Siqueira

Dissertação aprovada por banca examinadora em
14 de Julho de 2023, conferindo ao autor o título
de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Robson Bauwelz Gonzatti
Prof. Dr. Rondineli Rodrigues Pereira
Prof. Dr. Wilson Cesar Santana
Profa. Dra. Silvia Costa Ferreira

Itajubá
2023

Agradecimentos

À Deus, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigado por trilhar meu caminho, por ter abençoado todos os dias da minha vida, por cuidar do meu destino e me dar forças para seguir sempre em frente.

Aos meus pais agradeço hoje e sempre por todo amor que me dedicaram e por toda educação que me proporcionaram. Vocês são meu exemplo de vida e base da minha existência.

À minha família que sempre me apoiou durante toda a minha vida.

Aos meus orientadores, Robson e Rondineli pela dedicação, competência, apoio e todo conhecimento compartilhado. Obrigado pelo carinho, amizade, paciência e respeito.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

Ao P&D ANEEL pelos recursos laboratoriais disponibilizados.

À todos os professores do programa de pós-graduação que contribuíram na minha formação.

À todos que de maneira direta ou indireta para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

“O Presente Que Se Ignora Vale O Futuro”
(Machado de Assis, 1884)

Resumo

O aumento da combustão de combustíveis fósseis para atender à crescente demanda de energia é uma das principais causas para o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. Em uma tentativa de frear esta crescente poluição ambiental, a grande maioria das nações mundiais se comprometeu a reduzir as emissões de CO_2 e outros gases de efeito estufa. Tendo isto em vista, a transição dos veículos a combustão para os elétricos (EVs) é vista por muitos autores como uma das evoluções mais promissoras para se reduzir as emissões de gases de efeito estufa e melhorar a qualidade do ar. No entanto o grande empecilho para a popularização deste tipo de veículo é o tempo necessário para recarregar suas baterias, durante uma viagem por exemplo. Dito todos estes paradigmas, esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um carregador rápido trifásico para bateria de veículos elétricos. Nominalmente este carregador é projetado para fornecer até 50 [kW] e 100 [A] nominal para a bateria. O primeiro estágio de carregamento consiste em um conversor CA/CC acoplado a um filtro LCL e conectado à rede elétrica em 220 [V] Fase-Fase. O segundo estágio é composto por um conversor CC/CC *interleaved*, este é conectado ao barramento CC em 500 [V]. O carregador é acoplado à bateria afim de validar o carregamento por meio do método de CC-CV (Corrente Constante - Tensão Constante). A operação do conversor e sua técnica de controle são validadas por meio de simulações no software *Matlab*, por meio da ferramenta *Simulink*. Em seguida, o carregador é construído utilizando o primeiro estágio CA/CC e seu funcionamento é demonstrado utilizando um banco de baterias. A estratégia de controle é implementada no DSP TMS320F28379D da *Texas Instruments*, por meio do software *Code Composer*. Foram obtidos resultados satisfatórios no controle de carregamento das baterias e, apesar de a implementação prática ser feita em escala reduzida, o sistema de controle pode ser facilmente utilizado em potências maiores, apenas com ajustes nos ganhos do controle. Destaca-se a importância de compensação dos *dead-times* que aparecem na parte prática.

Palavras-chaves: Eletrônica de Potência. Veículos Elétricos. Carregador de Bateria. Conversores.

Abstract

The increase in the combustion of fossil fuels to meet the growing demand for energy is one of the main causes for the increase in the concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere. In an attempt to slow this growing environmental pollution, the vast majority of the world's nations have committed to reduce emissions of CO₂ and other greenhouse gases. With this in mind, the transition from combustion vehicles to electric vehicles (EVs) is seen by many authors as one of the most promising developments for reducing greenhouse gas emissions and improving air quality. However, the biggest obstacle to the popularization of this type of vehicle is the time needed to recharge its batteries, during a trip for example. Having said all these paradigms, this dissertation presents the development of a three-phase fast charger for electric vehicle batteries. Nominally this charger is designed to deliver up to 50 [kW] and 100 [A] nominal to the battery. The first charging stage consists of an AC/DC converter coupled to an LCL filter and connected to the power grid at 220 [V] Phase-Phase. The second stage consists of a DC/DC interleaved converter, which is connected to the DC bus at 500 [V]. The charger is coupled to the battery in order to validate charging through the CC-CV method (Constant Current - Constant Voltage). The operation of the converter and its control technique are validated through simulations in the Matlab software, using the Simulink tool. Then, the charger is built using the AC/DC first stage and its operation is demonstrated using a bank of batteries. The control strategy is implemented in the DSP TMS320F28379D from Texas Instruments, using the software Code Composer. Satisfactory results were obtained in the battery charging control although the practical implementation is done on a small scale, the control system can be easily used at higher powers, just with adjustments in the control gains. The importance of compensating the dead-times that appear in the practical part is highlighted.

Key-words: *Power Electronics. Electric Vehicles. Battery Charger. Converters.*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração da arquitetura dos modelos HEV e PEHV.	22
Figura 2 – Principais tipos de veículos elétricos.	22
Figura 3 – Estrutura cilíndrica de uma bateria de Íon-Lítio	25
Figura 4 – Modelos de packs de bateria de NiMH	29
Figura 5 – Curva de carregamento para baterias de Íons de Lítio	30
Figura 6 – Curva de carregamento para baterias de Chumbo-Ácido	31
Figura 7 – Conjunto de baterias	32
Figura 8 – Protocolo de comunicação CAN em veículos elétricos	34
Figura 9 – Protocolo de comunicação FlexRay em veículos elétricos	35
Figura 10 – Topologia monofásica bidirecional - conversor Meia-Ponte	38
Figura 11 – Topologia trifásica bidirecional - conversor Meia-Ponte	39
Figura 12 – Topologia monofásica bidirecional - conversor Ponte-Completa	41
Figura 13 – Topologia trifásica bidirecional - conversor <i>Ponte-Completa</i> com re- torno para o neutro	42
Figura 14 – Topologia trifásica bidirecional - conversor Ponte-Completa sem re- torno para o neutro	42
Figura 15 – Topologia trifásica bidirecional - Conversor CA/CC Three-level diode clamped	44
Figura 16 – Diagrama de blocos conversores CC não isolados	46
Figura 17 – Diagrama de blocos conversores CC isolados	47
Figura 18 – Diagrama de blocos de um veículo elétrico	48
Figura 19 – Conversor unidirecional (a) <i>Buck</i> (b) <i>Boost</i>	49
Figura 20 – Conversor bidirecional <i>Buck/Boost</i>	49
Figura 21 – Conversor bidirecional de um braço (<i>Buck/Boost Meia-Ponte</i>)	50
Figura 22 – Conversor bidirecional <i>Buck-Boost Cascade</i>	51
Figura 23 – Conversor bidirecional CUK	52
Figura 24 – Conversor intercalado bidirecional não isolado (IBC)	52
Figura 25 – Conversor intercalado bidirecional não isolado (IBC), formas de onda e chaveamento	53
Figura 26 – Conversor Flyback unidirecional	54
Figura 27 – Conversor Flyback bidirecional	54
Figura 28 – Conversor Forward unidirecional	55
Figura 29 – Conversor Forward bidirecional	56
Figura 30 – Topologia do conversor bidirecional Push-Pull	57
Figura 31 – Topologia do conversor unidirecional Meia-Ponte	58
Figura 32 – Topologia do conversor bidirecional CC/CC <i>Meia-Ponte</i>	58

Figura 33 – Topologia do conversor unidirecional <i>Ponte-Completa</i>	59
Figura 34 – Topologia do conversor bidirecional <i>Ponte-Completa</i>	60
Figura 35 – Topologia bidirecional - conversor Multiport	61
Figura 36 – Modelagem do conversor CA/CC e filtro LCL	63
Figura 37 – Esquemático do conversor interleaved CC/CC e bateria	63
Figura 38 – Diagrama de blocos do controle SRF - Prático	65
Figura 39 – Diagrama de blocos do controle SRF - Simulação	66
Figura 40 – Formas de onda de uma fase do retificador com <i>dead-time</i>	67
Figura 41 – Filtro de harmônicos no sistema <i>dq0</i>	69
Figura 42 – Diagrama de blocos do retificador CA e filtro LCL	71
Figura 43 – Diagrama de blocos do controle do retificador CA	72
Figura 44 – Formas de onda de tensão e corrente CA entre a rede e o filtro	73
Figura 45 – Formas de onda de tensão e corrente CA entre o filtro e o conversor	73
Figura 46 – Formas de onda de tensão e corrente CC	74
Figura 47 – Diagrama de blocos do conversor CC/CC	75
Figura 48 – Formas de onda de saída de tensão e corrente do conversor CC/CC	76
Figura 49 – Diagrama de blocos do carregador de baterias	77
Figura 50 – Formas de onda da tensão e corrente na rede	78
Figura 51 – Formas de onda da tensão no link CC e estado de carga da bateria	79
Figura 52 – Formas de onda da tensão e corrente na bateria	79
Figura 53 – Erro em regime	80
Figura 54 – THD - Corrente	81
Figura 55 – THD - Tensão	82
Figura 56 – Diagrama de blocos do sistema real	83
Figura 57 – Detalhe do DSP TMDSCNCD28379D na placa de condicionamento	89
Figura 58 – Placa de condicionamento	89
Figura 59 – Retificador trifásico com IGBTs	90
Figura 60 – Filtro LCL	90
Figura 61 – Banco de baterias	91
Figura 62 – Formas de onda de tensão e corrente - Carga	92
Figura 63 – Formas de onda real da corrente e tensão após condicionamento	93
Figura 64 – Formas de onda de tensão e corrente - Descarga	94
Figura 65 – Tensões e Corrente CA - Filtro	95
Figura 66 – Tensão CA e Correntes CA e CC - Variação positiva controle	96
Figura 67 – Tensão CA e Correntes CA e CC - Variação negativa controle	97
Figura 68 – Tensões e Corrente CA - Transitório da variação durante a carga	98
Figura 69 – Tensões e Corrente CA - Transitório da variação positiva controle	99
Figura 70 – Correntes CA - Rede	100
Figura 71 – Desequilíbrio na rede elétrica - Carregador desligado	100

Figura 72 – Desequilíbrio na rede elétrica - Carregador ligado	101
Figura 73 – Distorção harmônica corrente na rede durante carga - Fluke	101
Figura 74 – Distorção harmônica tensão na rede durante carga - Fluke	102
Figura 75 – Distorção harmônica corrente na rede durante descarga - Fluke	102
Figura 76 – Distorção harmônica tensão na rede durante descarga - Fluke	103
Figura 77 – Corrente e Tensão CC - Carga da Bateria	104
Figura 78 – Detalhes da Placa de Condicionamento	109

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros nominais de uma bateria Íon-Lítio	25
Tabela 2 – Parâmetros nominais de uma bateria Chumbo-Ácido	27
Tabela 3 – Parâmetros nominais de uma bateria NiCd	28
Tabela 4 – Parâmetros nominais de uma bateria NiMH	29
Tabela 5 – Tipos de carregamento de acordo com a norma SAE J1772	36
Tabela 6 – Tipos de carregamento de acordo com a norma IEC 61851-1	36
Tabela 7 – Lógica de chaveamento do conversor CC (<i>Buck-Boost Meia-Ponte</i>) . . .	50
Tabela 8 – Possibilidades de chaveamento do conversor <i>Buck-Boost Cascade</i> . . .	51
Tabela 9 – Ordem dos harmônicos para retificadores trifásicos	68
Tabela 10 – Parâmetros do Retificador CA	70
Tabela 11 – Parâmetros do filtro LCL	71
Tabela 12 – Parâmetros do conversor CC/CC	75
Tabela 13 – Parâmetros da bateria	78
Tabela 14 – Parâmetros do DSP	84
Tabela 15 – Parâmetros da Placa de Condicionamento	85
Tabela 16 – Parâmetros do Retificador CA	86
Tabela 17 – Parâmetros do filtro LCL	86
Tabela 18 – Parâmetros da Bateria	87
Tabela 19 – Parâmetros do Banco de Baterias	87
Tabela 20 – Parâmetros do controle de carga e descarga das baterias	88
Tabela 21 – Parâmetros do controle de harmônicos - PR	88
Tabela 22 – Parâmetros das entradas e saídas da Placa de Condicionamento	110

Lista de abreviaturas e siglas

A	<i>Amperes</i>
Ah	<i>Ampère-hora</i>
BEV	<i>Batery Electric Vehicle (Veículo Elétrico a Bateria)</i>
BMS	<i>Sistema de Gerenciamento da Bateria</i>
BUS	<i>Barramento</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
CAN	<i>Controller Area Network (Rede de Área de Controle)</i>
CC	<i>Corrente Constante</i>
CC	<i>Corrente Contínua</i>
CD	<i>Collision Detection (Detecção de Colisão)</i>
CO ₂	<i>Dióxido de Carbono</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access (Acesso Múltiplo por Detecção de Portadora)</i>
CV	<i>Tensão Constante</i>
EBV	<i>Electric Battery Vehicle (Bateria do Veículo Elétrico)</i>
FF	<i>Fase-Fase</i>
GPS	<i>Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor (Tiristor com Desligamento pelo Gate)</i>
h	<i>Hora(s)</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle (Veículo Elétrico Híbrido)</i>
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current (Corrente Contínua em Alta Tensão)</i>
Hz	<i>Hertz</i>
IBC	<i>Interleaved Bidirectional Converter (Conversor Intercalado Bidirecional)</i>

IEC	<i>International Electrotechnical Commission Standard (Norma da Comissão Eletrotécnica Internacional)</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Gate Isolado)</i>
kg	<i>Quilograma</i>
Km/L	<i>Quilômetro por litro</i>
kW	<i>Quilowatt</i>
Li-ion	<i>Íon-Lítio</i>
Li-Po	<i>Lítio-Polímero</i>
Mbit	<i>Megabit</i>
min	<i>Minuto(s)</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Transistor de Efeito de Campo Semicondutor de Óxido Metálico)</i>
NaS	<i>Sódio-Enxofre</i>
NiCd	<i>Níquel Cádmio</i>
NiMH	<i>Níquel Hidreto Metal</i>
PFC	<i>Power Factor Correction (Correção do Fator de Potência)</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Veículo Elétrico Híbrido com Plugue)</i>
PI	<i>Proporcional-Integral</i>
PLL	<i>Phase-Locked Loop (Malha de Controle de Fase)</i>
ppm	<i>Partes por milhão</i>
PR	<i>Proporcional Ressonante</i>
PTC	<i>Coeficiente de Temperatura Positivo</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)</i>
rad	<i>Radianos</i>
RMS	<i>Root Mean Square (Valor Quadrático Médio)</i>
s	<i>Segundos</i>

SAE	<i>Society of Automotive Engineers (Sociedade de Engenheiros Automotivos)</i>
SC	<i>Supercapacitor</i>
SLI	<i>Starting Lighting Ignition (Partida Iluminação Ignição)</i>
SRF	<i>Synchronous Reference Frame (Frame de Referência Síncrona)</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion (Distorção Harmônica Total)</i>
V	<i>Volts</i>
Vca	<i>Tensão Alternada</i>
Vcc	<i>Tensão Contínua</i>
VE	<i>Veículo Elétrico</i>
W	<i>Watt</i>
Wh	<i>Watt-Hora</i>
WhL	<i>Watt-Hora Litro</i>
ZnBr	<i>Zinco-Bromo</i>
ZVSC	<i>Zero Voltage Switching Converter (Conversor com Comutação em Zero de Tensão)</i>

Lista de símbolos

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\%$	Por cento
K_p	Ganho do controle Proporcional
K_i	Ganho do controle Integral
ω_0	Frequência harmônica a ser cancelada em radianos/s
Ω	Ohms
F	Farad
H	Henry
m	mili
μ	micro
n	nano

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação	19
1.2	Organização do trabalho	20
2	OS VEÍCULOS ELÉTRICOS	21
2.1	Tipos de veículos elétricos	21
2.2	Tipos de Baterias	23
2.2.1	Baterias de Íon-Lítio (<i>Li-ion</i>)	23
2.2.2	Baterias de Lítio-Polímero (<i>Li-Po</i>)	26
2.2.3	Baterias de Chumbo-Ácido (<i>Lead-Acid</i>)	26
2.2.4	Baterias de Níquel Cádmio (<i>NiCd</i>)	27
2.2.5	Baterias de Níquel Hidreto Metal (<i>NiMH</i>)	28
2.3	Métodos de Carregamento	30
2.4	Sistema de Gerenciamento da Bateria (BMS - <i>Battery Management System</i>)	31
2.5	Protocolos de Comunicação	33
2.5.1	Protocolos de Comunicação CAN	33
2.5.2	Protocolos de Comunicação FlexRay	34
2.6	Níveis de Carregamento	35
3	TOPOLOGIA DOS CONVERSORES CA/CC	37
3.1	Conversor CA/CC Meia-Ponte	37
3.2	Conversor CA/CC Ponte-Completa	40
3.3	Conversor CA/CC Multinível PWM	43
3.3.1	Conversor CA/CC Three-level diode clamped	43
4	TOPOLOGIA DOS CONVERSORES CC/CC	45
4.1	Conversores CC/CC	45
4.2	Topologias de Conversores CC/CC aplicadas em veículos elétricos	48
4.2.1	Topologia de Conversores CC/CC Não Isolados	48
4.2.1.1	Buck-Boost	49
4.2.1.2	Buck-Boost em Cascata	50
4.2.1.3	CUK	51
4.2.1.4	Conversor Multifásico Intercalado Bidirecional	52
4.2.2	Topologia de Conversores CC/CC Isolados	53
4.2.2.1	Flyback	53

4.2.2.2	Forward	55
4.2.2.3	Push-Pull	56
4.2.2.4	Meia-Ponte/ZVSC	57
4.2.2.5	Ponte-Completa	59
4.2.2.6	Multiporta	60
5	DEFINIÇÃO DOS CONVERSORES UTILIZADOS NO SISTEMA DE TESTES	62
5.1	Conversores	62
5.1.1	Conversor CA/CC	62
5.1.2	Conversor CC/CC	63
5.2	Sistemas de controle	64
5.2.1	Controle do <i>link</i> CC	64
5.2.2	Controle de harmônicos de baixa frequência	66
6	SIMULAÇÕES/RESULTADOS	70
6.1	Simulações	70
6.1.1	Conversor CA/CC	70
6.1.2	Conversor CC/CC	74
6.1.3	Carregador de baterias - estágios CA/CC e CC/CC	77
6.2	Resultados Práticos	83
6.2.1	Componentes e equipamentos utilizados	83
6.2.2	Resultados obtidos	91
7	CONCLUSÕES	105
7.1	Trabalhos Futuros	106
	ANEXOS	107
	ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO	108
	ANEXO B – PLACA DE CONDICIONAMENTO	109
	REFERÊNCIAS	111

1 Introdução

As mudanças climáticas são definidas como mudanças ou alterações de longo prazo no clima de um local específico, região ou de todo o planeta. O clima da Terra variou significativamente ao longo de seu passado geológico. Houve eras glaciais em que a temperatura média global era cerca de 5 °C mais baixa que seu valor atual e períodos interglaciais, quando a temperatura média era cerca de um grau mais alta que o valor atual. Essas variações foram causadas por mudanças solares, emissões vulcânicas e gases de efeito estufa [1].

A concentração de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases do efeito estufa, na atmosfera tem variado entre 180 e 310 ppm durante os últimos 400.000 anos [2]. No entanto, ao longo dos últimos dois séculos, a concentração atmosférica de CO₂ aumentou de aproximadamente 280 ppm no início da revolução industrial para cerca de 368 ppm no início deste século [1]. Acredita-se que esse alto nível de concentração de CO₂ seja o grande responsável pelas mudanças climáticas induzidas pelo homem. Os cientistas reuniram provas convincentes para afirmar inequivocamente que a maior parte do aquecimento observado nos últimos 50 anos é atribuível às atividades humanas [3]. A comunidade científica também concorda que a temperatura média global provavelmente aumentará de 1,4 a 5,8 °C nos próximos 100 anos.

Nas últimas décadas, como consequência da alta emissão de poluentes na atmosfera, tratados internacionais como o Protocolo de Kyoto, o Crédito de Carbono e o Acordo de Paris, surgiram na tentativa de limitar os efeitos desta poluição. Isto aliado com a volatilidade e incertezas relacionadas aos combustíveis fósseis, são alguns dos fatores que fizeram com que o investimento em energias renováveis crescesse de forma elevada [4].

Diante das premissas da redução da emissão de poluentes e devido ao fato de os veículos a combustão serem uma das principais fontes de poluição atmosférica [5, 6], o mercado global de veículos elétricos vem crescendo e buscando novas tecnologias. O aumento na produção de veículos elétricos (VE's) tem crescido a uma taxa anual de aproximadamente 60% desde 2014, atingindo o valor de 11 milhões de veículos em 2020 e com projeção para 350 milhões em 2030 [7].

O desenvolvimento dos VEs está intimamente ligado ao desenvolvimento tecnológico em geral. Um dos principais obstáculos que impedem o uso generalizado de veículos elétricos são atualmente as propriedades das baterias. Os preços das baterias variam de acordo com os parâmetros de seus sistemas de armazenamento e modelos operacionais. Consequentemente, os preços das baterias para automóveis de passageiros diferem significativamente do preço das baterias destinadas à veículos comerciais como ônibus e

caminhões por exemplo [8, 9]. Outro inconveniente dos veículos elétricos contemporâneos é a limitada autonomia da bateria.

Deste modo, além da redução dos custos das baterias, existem dois fatores limitantes à popularização dos veículos elétricos. Um deles é a infraestrutura de carregamento mal desenvolvida e o outro é o longo tempo de carregamento das baterias. As tecnologias de bateria usadas atualmente não permitem o carregamento imediato. Dependendo da fonte de alimentação e da capacidade da bateria, o tempo de carregamento de baterias descarregadas pode variar de 20 min a mais de 50 h [10].

Portanto, fica claro que os problemas relacionados à infraestrutura e velocidade de carregamento precisam ser resolvidos para a popularização dos veículos elétricos. Neste sentido, este trabalho aborda os carregadores rápidos e propõe o desenvolvimento de conversores para carregamento de veículos elétricos.

Como explorado adiante, o trabalho conta com simulações envolvendo o desenvolvimento de conversores CA/CC, CC/CC e filtro LCL, demonstrando o processo de carga da bateria por meio do controle de corrente e tensão.

Por fim, são explorados os resultados práticos obtidos com a construção do estágio CA/CC do carregador de baterias. Nesta etapa é abordado o fenômeno conhecido como *dead-time*, que implica no aparecimento de harmônicos de baixa frequência no processo de conversão e não é visto na simulação. Também é apresentado um método para realizar o controle destes harmônicos diretamente no sistema *dq*.

1.1 Motivação

Atualmente, vive-se um crescimento constante na busca por energias alternativas e, principalmente, oriundas de fontes renováveis, com objetivo de se mitigar as causas e consequências da poluição ambiental.

A fabricantes de automóveis Volvo, por exemplo, se comprometeu desde 2017 a eletrificar toda a gama de veículos de passeio por ela produzidos [11]. Países como França e Reino Unido já estipulam que nos próximos anos, nenhum veículo a combustão deverá ser produzido [12]. Em 2020, a empresa Iberdrola fez acordo também com a fabricante Porsche para entrega de 35 estações de recarga e ainda prevê a instalação de 150.000 em residências, empresas e vias públicas nos próximos 5 anos [13]. Já a Tesla, empresa pioneira na produção e comercialização de veículos elétricos em larga escala, em junho de 2020 ultrapassou a GM (*General Motors*), Ford e BMW para se classificar como a fabricante de automóveis mais valiosa do mundo no mercado de ações [14].

Deste modo, fica claro que o carro elétrico vem se popularizando novamente, e mais, tem a premissa de se tornar o principal e, talvez, a única versão disponível para

comercialização de veículos novos em alguns anos.

Um grande dilema quando se fala da popularização de veículos totalmente elétricos (BEVs), é o tempo de carregamento da bateria destes veículos. Sendo que existe uma grande resistência por parte dos futuros compradores deste tipo de veículo, quando se imagina que viagens de longa distância gastaria-se varias horas aguardando que a bateria seja recarregada para se continuar a viagem.

Desta forma, este trabalho foca em pesquisas de técnicas para o carregamento mais rápido destas baterias, de modo que o tempo de recarga se aproxime do tempo de reabastecimento de veículos movidos à combustíveis fósseis.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está segmentado nos seguintes capítulos: O Capítulo 1 apresenta uma análise histórica da mudança climática, seus efeitos e medidas corretivas adotadas. Dentro das medidas corretivas é abordado o tema sobre veículos elétricos e desafios em sua popularização. Neste capítulo também são abordados a motivação, objetivos traçados, metodologia e a estrutura no qual o trabalho foi organizado. Em sequência, o Capítulo 2 traz uma revisão da literatura de conceitos envolvendo os veículos elétricos. Deu-se atenção aos aspectos teóricos a respeito das características das baterias, dos métodos de carregamento, do gerenciamento da bateria, protocolos de comunicação e níveis de carregamento. O Capítulo 3 apresenta os principais conversores CA/CC utilizados no carregamento de baterias dos VE's. Já o Capítulo 4 aborda o tema de conversores CC/CC e suas diversas topologias utilizadas para carregamento das baterias de veículos elétricos. O Capítulo 5 apresenta a contextualização do sistema utilizado, isto é, os conversores e métodos de controle utilizados. O Capítulo 6 mostra os resultados de simulação e práticos obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2 Os Veículos Elétricos

Neste capítulo, são abordados os aspectos técnicos referentes aos tipos de veículos elétricos existentes, bem como os principais tipos de bateria, métodos de carregamento, protocolos de comunicação e níveis de carregamento.

2.1 Tipos de veículos elétricos

Basicamente, um veículo elétrico possui um ou mais motores elétricos que movimentam seus eixos, transformando a energia elétrica em energia mecânica transferida para as rodas. Estes veículos se dividem em três tipos principais: Veículo Elétrico Híbrido (HEV - *Hybrid Electric Vehicle*), Veículo Elétrico Híbrido com Plugue (PHEV - *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) e o Veículo Elétrico a Bateria (BEV - *Battery Electric Vehicle*).

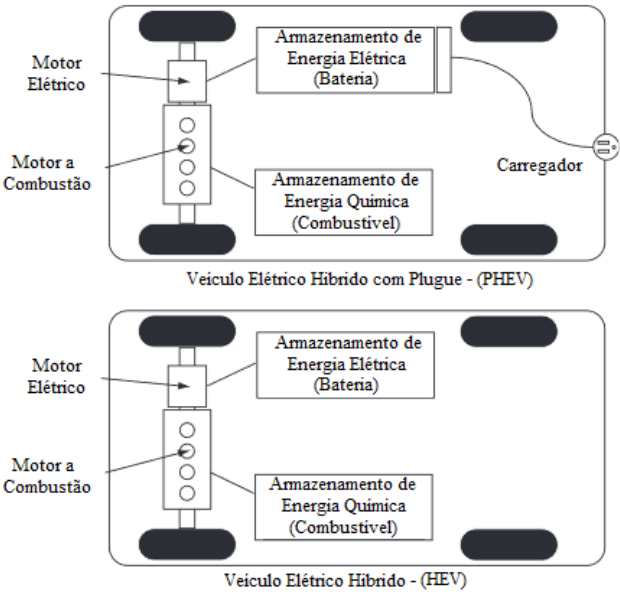
O HEV, consiste em um veículo que conta com dois tipos de motores para acionar as rodas, sendo um motor elétrico e um motor a combustão, podendo estes propulsores operarem paralelamente (configuração paralela) ou apenas pelo motor elétrico (configuração série), de modo que neste caso o motor a combustão funciona apenas como um gerador [15]. Utilizando tanto o motor elétrico, quanto o motor a combustão, os híbridos apresentam significativamente melhor eficiência do uso de combustível se comparados a veículos não híbridos. Eles também poluem menos e economizam no reabastecimento de combustível, já que o motor elétrico complementa a atividade do motor a combustão.

O PHEV se difere do HEV pois a bateria de tração pode ser carregada por fontes de energia externas, enquanto o HEV é carregado apenas pelo motor a combustão ou através da frenagem regenerativa [16], que é a conversão de parte da energia perdida na frenagem em eletricidade. Esse tipo de carro elétrico emite consideravelmente menos poluentes que os carros de motor a combustão, devido ao fato de serem carregados por eletricidade vindo da rede. Eles não geram gases de efeito estufa quando funcionando apenas com o motor elétrico, além disso, ganham eficiência no uso do combustível líquido. Uma vez que eles utilizam menos combustível devido ao motor elétrico, dirigir um PHEV gera redução de custos anuais, que seriam gastos em gasolina e diesel. O veículo Prius por exemplo, quando movido somente à gasolina produz médias de consumo de 50 milhas por galão (21,26 km/L) e quando movido à bateria e motor à combustão, produz médias de 95 milhas por galão (40,39 km/L) [17].

A Figura 1 apresenta uma ilustração comparativa da arquitetura dos dois modelos.

Finalmente, o último tipo é o BEV e, neste caso, o veículo é totalmente elétrico, sem qualquer tipo de motor a combustão e sua bateria é recarregada geralmente através

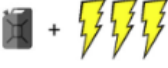
Figura 1 – Ilustração da arquitetura dos modelos HEV e PHEV.



Fonte: Adaptado de [16]

de pontos de carregamento [18]. Os BEV não emitem nenhum gás poluente ou de efeito estufa pelo escapamento, até porque eles nem possuem escapamento para tal. No entanto, a eletricidade que eles utilizam podem vir de fontes que produzem gases e outras poluições na fonte de sua geração ou na extração dos combustíveis fósseis. A quantidade de poluição emitida depende de como a eletricidade é fornecida. A Figura 2 traz uma ilustração referente às diferenças entres os tipos de veículos elétricos.

Figura 2 – Principais tipos de veículos elétricos.

	 Veículo Elétrico Híbrido/ Hybrid Electric Vehicle (HEV)	 Veículo Elétrico com Plug/ Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)	 Veículo Elétrico a Bateria/ Battery Electric Vehicle (BEV)
Fontes de Energia			
Consumo			
Emissões no Escape			Nenhuma 

Fonte: Adaptado de [18]

2.2 Tipos de Baterias

As baterias utilizadas em veículos elétricos podem ser divididas em 2 tipos principais: as baterias de tração, ou Bateria do Veículo Elétrico (EBV - *Electric Battery Vehicle*) e as baterias convencionais, também chamadas de baterias de Arranque, Iluminação e Ignição (SLI - *Starting Lighting Ignition*).

As baterias do tipo SLI, comumente do tipo chumbo-ácido, são utilizadas e produzidas em maior número do que qualquer outro tipo de bateria do tipo chumbo-ácido [19]. Seu principal uso está na alimentação do sistema de ignição dos veículos e na alimentação de seus periféricos como luzes, rádio, buzina etc.

Devido à forma como este tipo de bateria é construída, não é suportado que grandes taxas de descarga de corrente ocorram por um período prolongado, sendo portanto, uma bateria utilizada em processos que exigem uma corrente alta em um intervalo de tempo pequeno. A alternativa que permite este tipo de bateria oferecer alimentação contínua a um sistema, vem do fato de que quando 5% de sua carga é perdida, ela passa a ser recarregada pelo alternador do veículo, ao passo que se toda a carga da bateria é consumida, ela passa a sofrer danos internos [20]. Para o processo de tração em veículos elétricos, portanto, este tipo de bateria não é aceitável.

O grande desafio para os veículos elétricos, é que sua bateria de tração (EVB) precisa ter uma alta capacidade na relação capacidade por peso e volume, uma vez que esta bateria é acoplada ao veículo. Outra característica, é que este tipo de bateria costuma ter formato tubular, que favorece o processo de ventilação e proporciona um melhor desempenho durante seu descarregamento, além disso, estas baterias são projetadas para suportar inúmeros ciclos de carga-descarga e, também, para proporcionar um carregamento rápido, geralmente dentro de 24 horas [21].

Por fim, existem diversos tipos de composições químicas para as baterias de tração, sendo as principais delas: Íon-Lítio (Li-ion), Lítio-Polímero (Li-Po), Chumbo-Ácido, Níquel-Metal Hidreto (NiMH), Níquel-Cádmio (NiCd). Cada composição tem suas vantagens e desvantagens, incluindo custo, tempo de vida, massa, volume e sensibilidade à temperatura [22]. Outros tipos menos comuns são: Níquel-Ferro (NiFe), Zinco-Bromo (ZnBr) e Sódio-Enxofre (NaS) [23].

Nas próximas seções, serão apresentados alguns aspectos das baterias que são mais comumente utilizadas em veículos elétricos.

2.2.1 Baterias de Íon-Lítio (*Li-ion*)

Este tipo de bateria foi introduzido por volta dos anos 90 e apresenta vantagens enormes referentes ao peso e a energia específica que ela possui, se comparada com outros

modelos de bateria. Um dos problemas que esta tecnologia possui, é que o controle de tensão deve ser muito preciso, se a tensão for muito alta, podem ocorrer danos à bateria e se for muito baixa, a carga será insuficiente [24].

Atualmente, esta tecnologia é considerada a mais promissora na aplicação para veículos elétricos, em algumas literaturas, é a única a ser estudada em detalhes [25]. Ela ainda apresenta longa vida útil, alta eficiência, não possui efeito memória e tem alto potencial para aprimoramentos. Outros problemas referentes a esta tecnologia, são o seu custo de produção e risco de incêndio, caso haja sobrecarga [25].

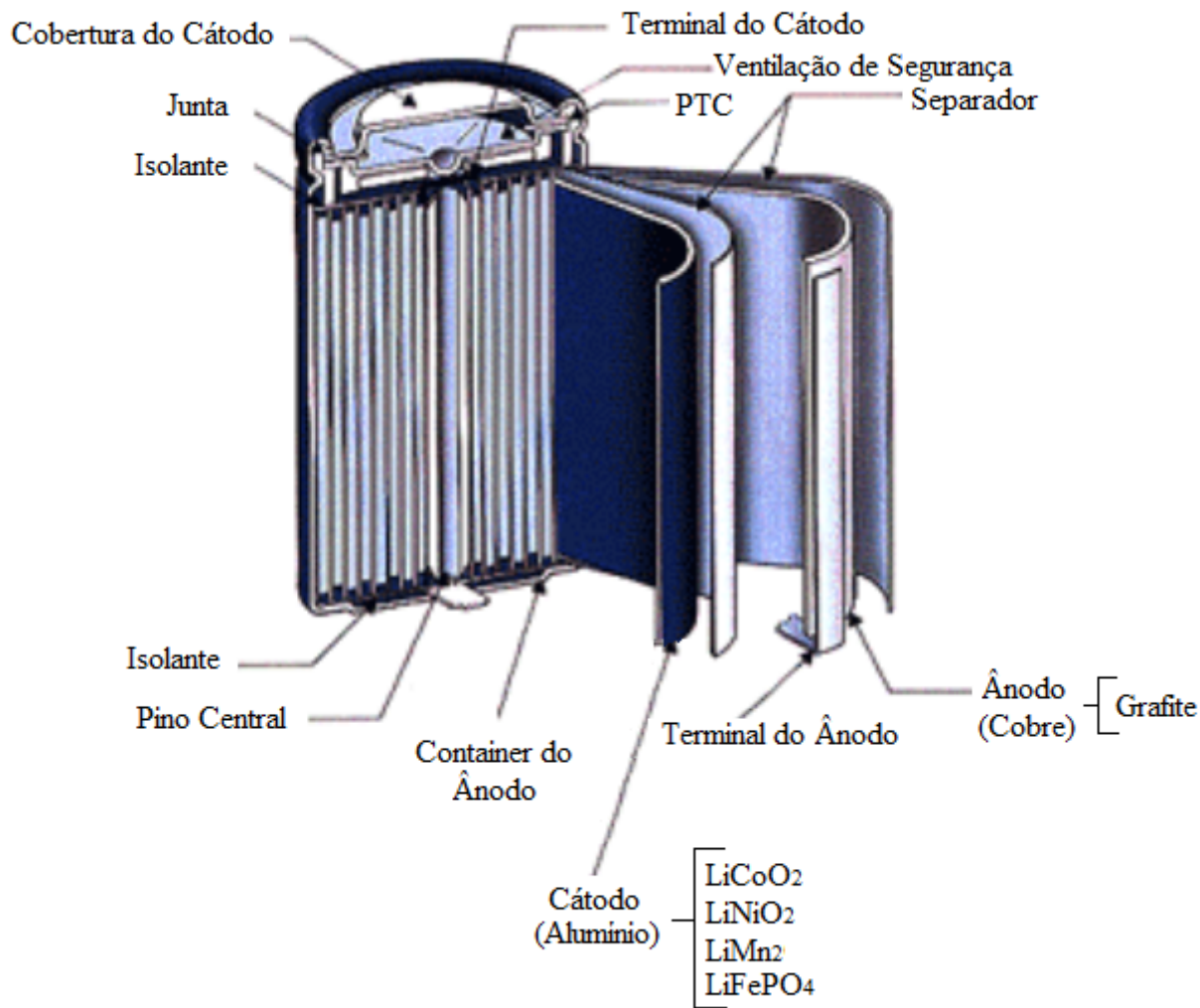
Segundo [26], o processo de funcionamento destas baterias se baseia no movimento dos íons de lítio entre o anodo e o catodo, produzindo assim eletricidade.

No ciclo de descarga, o lítio no anodo é ionizado e enviado para o eletrólito. Os íons de lítio se movem então através de um plástico separador poroso e são inseridos em tamanho atômico no catodo. Ao mesmo tempo, os elétrons são liberados do anodo. Este processo envia a corrente elétrica para um circuito externo. Já para o processo de carregamento, os íons de lítio vão do catodo para o anodo através do separador. Como este é um processo químico reversível, a bateria pode ser recarregada.

A Figura 3 apresenta um modelo de uma bateria de Íon-Lítio utilizada no veículo elétrico GM Volt. Nesta bateria, folhas de cobre e de alumínio são usadas como coletores de corrente no ânodo e cátodo, respectivamente. Diversos compostos de Lítio podem ser utilizados no cátodo, sendo que no ânodo são utilizados materiais carbonáceos, de forma a aumentar a energia.

A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros característicos de uma bateria Íon-Lítio.

Figura 3 – Estrutura cilíndrica de uma bateria de Íon-Lítio.



Fonte: Adaptado de [27]

Tabela 1 – Parâmetros nominais de uma bateria Íon-Lítio [24].

Energia Específica	140 Wh kg ⁻¹
Densidade de Energia	250-620 WhL ⁻¹
Potência Específica	300-1500 W kg ⁻¹
Tensão Nominal da Célula	3.5 V
Eficiência Amperè-hora	Muito Bom
Resistência Interna	Muito Baixa
Disponibilidade Comercial	Se tornou a bateria padrão para veículos elétricos
Temperatura de Operação	Ambiente
Descarga Própria	Muito Baixa, 10% ao mês
Número de Ciclo de Vida	>1000
Tempo de Recarga	2-3 h, mas pode atingir 80% da capacidade em menos de 1 h

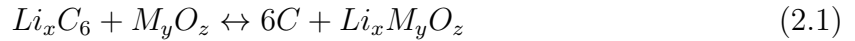
2.2.2 Baterias de Lítio-Polímero (*Li-Po*)

As baterias de Lítio-Polímero têm um funcionamento parecido com as baterias de Íon-Lítio, uma das principais diferenças é que o eletrodo negativo não é composto de carbono e, sim, de Lítio sólido.

Isto causa a este tipo bateria problemas como queda na performance e problemas com a segurança durante seu uso. Outra diferença, é o fato de usarem gel polímero como eletrólito [28].

Além disso, estas baterias foram amplamente substituídas pelas baterias de Íon-Lítio [24]. Por outro lado, as baterias Li-Po admitem maiores variações de temperatura em seu funcionamento.

As Equações 2.1 e 2.2 representam um comparativo entre as reações químicas nas baterias de Li-ion e Li-Po respectivamente. Sendo que para as baterias de Li-ion, a energia elétrica é obtida por meio da combinação do carbono de lítio e do óxido metálico de lítio para formar o óxido metálico de carbono e lítio. Já nas de Li-Po, o carbono não está presente e o lítio se combina com o óxido metálico para formar um óxido metálico de lítio e liberar energia.

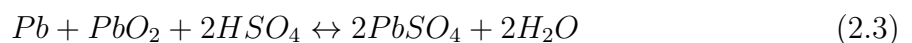


Onde M é um metal de transição.

2.2.3 Baterias de Chumbo-Ácido (*Lead-Acid*)

As baterias Chumbo-Ácido (*Lead-Acid*) são o tipo mais antigo de baterias utilizadas em veículos. Elas apresentam como característica seus eletrodos positivos e negativos mergulhados em solução ácida. Elas são consideradas a forma mais madura de baterias para veículos elétricos, entretanto, possuem energia específica muito baixa e peso muito alto se comparado a outros tipos de baterias [29].

De forma geral, o ácido sulfúrico combina com o chumbo e o óxido de chumbo para produzir sulfato de chumbo e água [24]. A equação da reação química deste tipo de bateria pode ser vista na Equação 2.3.



Para ser utilizada na tração de veículos elétricos, este tipo de bateria precisou sofrer alterações no seu processo de fabricação, já que seu número de ciclos de vida é

muito pequeno e a razão disto é a corrosão que ocorre no anodo (eletrodo positivo) da bateria [30].

Uma das formas de sanar este problema, é realizar a compressão mecânica de suas placas internas, principalmente se for realizada no formato de placas tubulares, assim, o ciclo de vida pôde ser aumentado em mais de 10 vezes [30].

Infelizmente, um outro problema que ocorre com este tipo de bateria, é o auto descarregamento da mesma. Isto ocorre, pois o chumbo e o dióxido de chumbo não são estáveis no ácido sulfúrico e acabam se decompondo [24]. Desta forma, as reações que ocorrem no eletrodo positivo e negativo ficam respectivamente como nas Equações 2.4 e 2.5. A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros característicos de uma bateria Chumbo-Ácido.

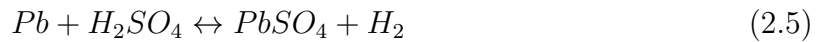
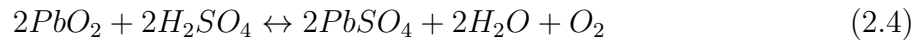


Tabela 2 – Parâmetros nominais de uma bateria Chumbo-Ácido [24].

Energia Específica	20-35 Wh kg ⁻¹ , dependendo do uso
Densidade de Energia	54-95 WhL ⁻¹
Potência Específica	250 W kg ⁻¹
Tensão Nominal da Célula	2 V
Eficiência Amperè-hora	80%, varia com a taxa de descarga e temperatura
Resistência Interna	Extremamente Baixa
Disponibilidade Comercial	Facilmente encontrada de diferentes fabricantes
Temperatura de Operação	Ambiente, performance ruim em frio extremo
Descarga Própria	2% ao dia
Número de Ciclo de Vida	Até 800 para 80% da capacidade
Tempo de Recarga	8 h, mas pode atingir 90% da capacidade em 1 h

2.2.4 Baterias de Níquel Cádmio (NiCd)

As baterias de Níquel Cádmio (NiCd) foram por muito tempo consideradas uma das principais concorrentes das baterias de Chumbo-Ácido para uso em veículos elétricos. Este tipo de bateria possui a vantagem de ter alta potência específica, longo ciclo de vida e uma boa faixa de temperatura de operação. Elas foram utilizadas com sucesso em carros elétricos como o Peugeot 106, Citroen AX e Renault Clio [24].

Tais baterias precisam de carga rápida e pulsada, já que o carregamento lento provoca formações de cristal e provocam o “efeito memória”, o que acarreta na redução de potência. O uso diário dessas baterias, requer que em certos intervalos de tempo elas sejam totalmente descarregadas e carregadas totalmente em sequência [31].

Os grandes problemas referentes a este tipo de bateria estão no uso do cádmio, que além de prejudicial ao ambiente, é cancerígeno e, portanto, ao longo dos anos as baterias de NiCd vem sendo substituídas pelas baterias de Níquel-Metal Hidreto (NiMH) [24]. Conforme [32], a equação geral da reação química das baterias de NiCd pode ser vista na Equação 2.6. A Tabela 3 apresenta alguns parâmetros característicos de uma bateria NiCd.

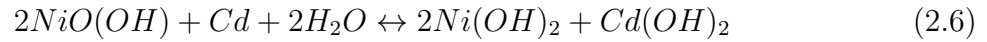


Tabela 3 – Parâmetros nominais de uma bateria NiCd [24].

Energia Específica	40-55 Wh kg ⁻¹ , dependendo da corrente
Densidade de Energia	70-90 WhL ⁻¹ , dependendo da corrente
Potência Específica	125 W kg ⁻¹
Tensão Nominal da Célula	1.2 V
Eficiência Amperè-hora	Boa
Resistência Interna	Muito Baixa
Disponibilidade Comercial	Facilmente encontrada apenas em pequenos tamanhos
Temperatura de Operação	-40 até +80 °C
Descarga Própria	0.5% ao dia, muito baixo
Número de Ciclo de Vida	Até 1200 para 80% da capacidade
Tempo de Recarga	1 h, até 60% da capacidade em 20 min

2.2.5 Baterias de Níquel Hidreto Metal (NiMH)

Como visto na seção anterior, as baterias de Níquel Hidreto Metal surgiram como alternativa às baterias de Níquel Cádmio. A comercialização destas baterias só ocorreu na última década do século 20 e possuem performance similar às baterias de NiCd, sendo que a principal diferença está no fato de as baterias de NiMH possuírem o terminal negativo composto de hidrogênio absorvido em uma liga, na forma de hidreto metálico, ao invés de cádmio [24].

Além de livre de Cádmio, as baterias de NiMH tem a vantagem de serem até 4 vezes mais baratas que as de Íon-Lítio [26]. Atualmente, sua aplicação ocorre mais em veículos híbridos, como exemplo o Toyota Prius, sendo considerada insuficiente para os propósitos de veículos totalmente elétricos [25]. Isto, pois, atualmente as baterias de Li-ion apresentam maior energia específica e maior densidade de energia [33].

Conforme [24], a equação geral da reação química das baterias de NiMH pode ser vista na Equação 2.7. A Tabela 4 apresenta alguns parâmetros característicos de uma bateria NiMH.

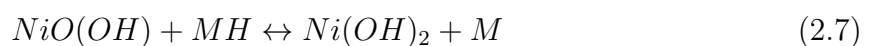
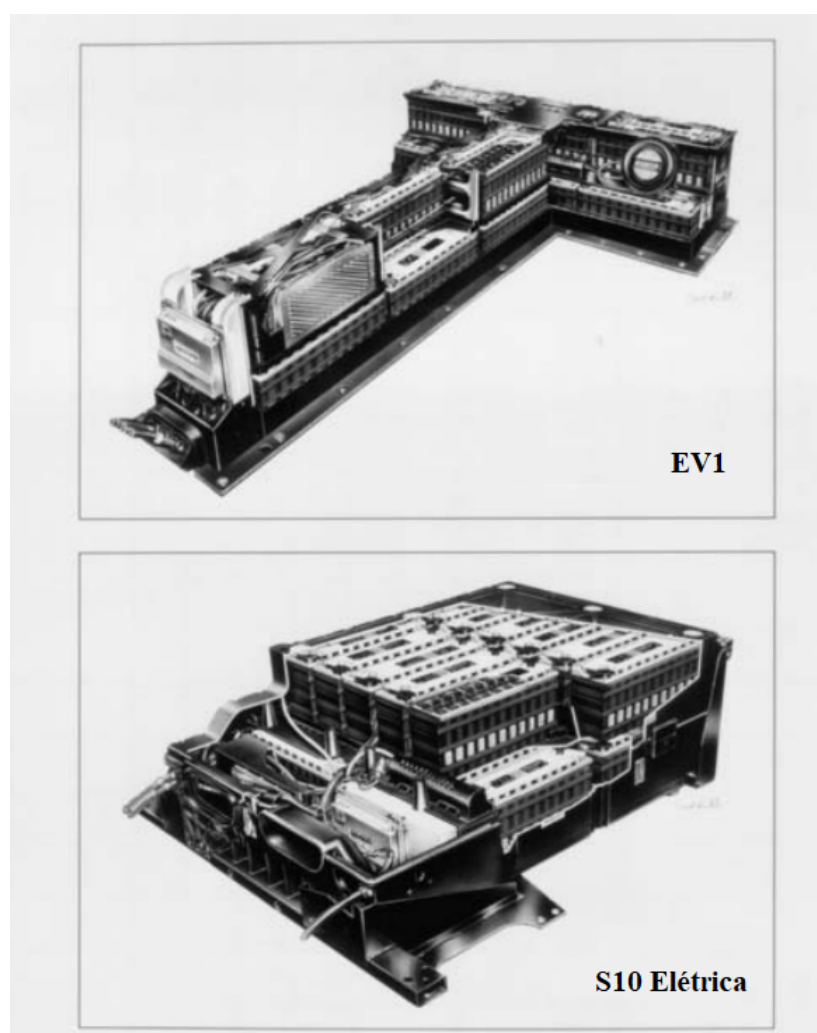


Tabela 4 – Parâmetros nominais de uma bateria NiMH [24].

Energia Específica	65 Wh kg ⁻¹ , dependendo da potência
Densidade de Energia	150 WhL ⁻¹ , dependendo da corrente
Potência Específica	200 W kg ⁻¹
Tensão Nominal da Célula	1.2 V
Eficiência Amperè-hora	Muito Boa
Resistência Interna	Muito Baixa
Disponibilidade Comercial	Facilmente encontrada apenas em pequenos tamanhos
Temperatura de Operação	Ambiente
Descarga Própria	Ruim, até 5% ao dia
Número de Ciclo de Vida	Até 1000 para 80% da capacidade
Tempo de Recarga	1 h, até 60% da capacidade em 20 min

Segundo [31], nos anos 90 as baterias de NiMH foram testadas em veículos totalmente elétricos pela General Motors nos modelos EV1 e S-10. Na Figura 4, pode-se ver o formato do conjunto (*pack*) de baterias para os modelos citados.

Figura 4 – Modelos de packs de bateria de NiMH.



Fonte: Adaptado de [31]

2.3 Métodos de Carregamento

Um carregador tem três funções principais: fornecer carga à bateria; otimizar a taxa de carregamento; e interromper a carga [34].

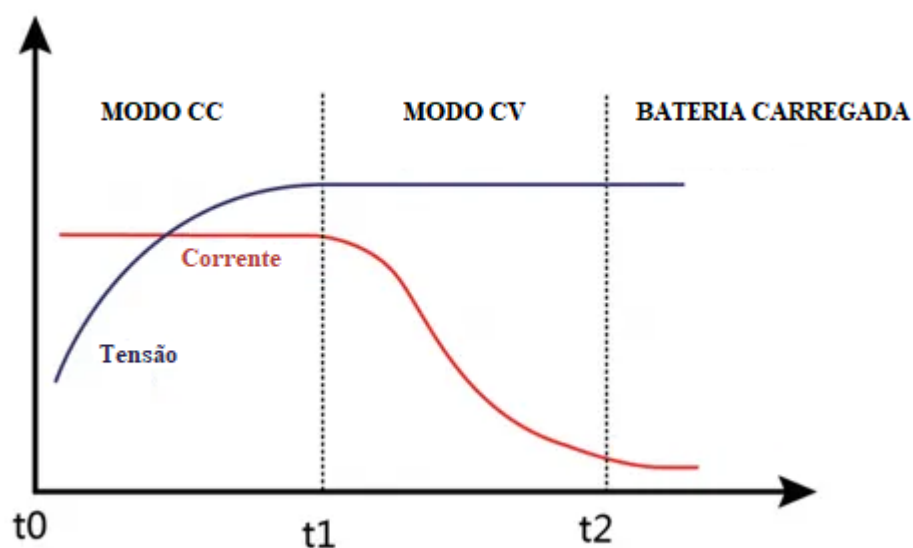
A carga pode ser fornecida à bateria através de diferentes métodos de carregamento, dependendo da composição química da bateria. Para baterias de Íon-Lítio, o método de carregamento denominado “Corrente Constante - Tensão Constante” (CC-CV) é muito popular e comumente usado no carregamento destas baterias devido à facilidade de implementação e simplicidade [34–36].

As baterias Íon-Lítio requerem inicialmente uma Corrente Constante (CC) para carregar a bateria até que a tensão da bateria atinja um limite de segurança predefinido (tensão máxima de carga), no qual o carregamento por Corrente Constante (CC) é interrompido e o carregamento por Tensão Constante (CV) começa e é mantido até a bateria completar sua carga.

Durante o carregamento por tensão constante, a tensão de carregamento é mantida na tensão de carga máxima, enquanto, simultaneamente, a corrente de carga se reduz exponencialmente.

O carregamento por Tensão Constante (CV) é usado para limitar a corrente e, assim, evitar que a bateria sobrecarregue. O processo de carregamento termina quando a corrente de carregamento atinge um pequeno valor predefinido. A curva de carregamento do método CC-CV é mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Curva de carregamento para baterias de Íons de Lítio.



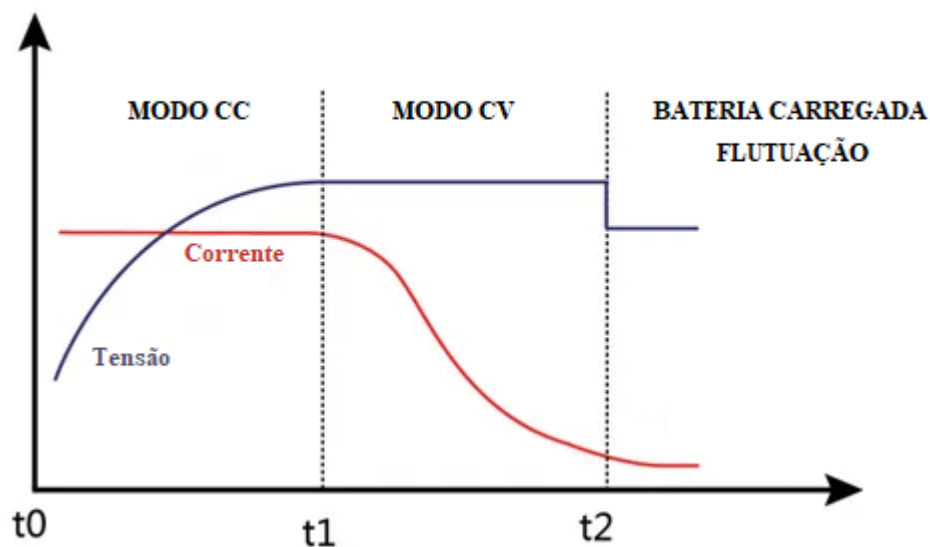
Fonte: Autor

No caso da bateria de Chumbo-Ácido, para esta ser carregada até a capacidade total e prolongar sua vida útil, o processo de carga deve ser feito em três etapas, sendo: Corrente Constante (CC), Tensão Constante (CV) e Flutuação (*Floating*).

Inicialmente, a bateria deve ser carregada com corrente constante e quando a tensão atingir tensão máxima de carga, o carregador deve mudar para o modo de tensão constante, do mesmo modo que é feito nas baterias de Íon-Lítio. A diferença então ocorre quando a bateria está próxima de atingir a carga total, na qual o processo de carga entra em um novo estágio denominado Flutuação.

Neste estágio de flutuação, a tensão é reduzida para o valor nominal da tensão de flutuação da bateria e um pequeno valor de corrente continua fluindo através da bateria, de modo a compensar a auto-descarga da bateria de chumbo ácido e manter a bateria totalmente carregada. A curva de carregamento do método CC-CV-Flutuação é mostrada na Figura 6.

Figura 6 – Curva de carregamento para baterias de Chumbo-Ácido.



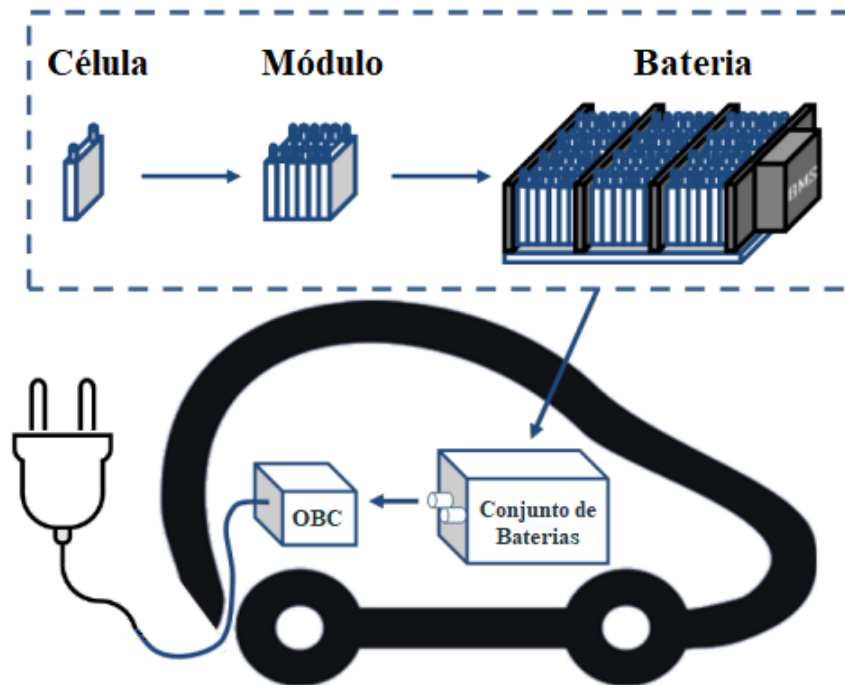
Fonte: Autor

2.4 Sistema de Gerenciamento da Bateria (BMS - *Battery Management System*)

Baterias utilizadas em veículos elétricos costumam ser complexas e frágeis, de modo que é imprescindível um bom monitoramento e controle. Os conjuntos (*packs*) de baterias utilizados nestes veículos são compostos por inúmeras células de bateria, as quais podem causar danos se não forem carregadas de modo adequado [37]. A representação dos

packs de bateria pode ser vista na Figura 7, onde OBC - *On Board Charger* (Carregador integrado ao veículo).

Figura 7 – Conjunto de baterias.



Fonte: Adaptado de [38]

Assim, um sistema de gerenciamento das baterias (BMS - *Battery Management System*) faz-se necessário. Este sistema monitora, protege e minimiza as chances, por exemplo, de uma sobrecarga nas células (que pode levar a uma explosão). Desta forma, o bom e correto planejamento do BMS é fundamental.

Para o funcionamento adequado de todo este complexo sistema de baterias, faz-se necessário que existam protocolos de comunicação entre o BMS e os dispositivos de aquisição de dados, como o de temperatura e tensão das células e os dispositivos de carregamento e controle, como o módulo de aceleração do veículo e os carregadores [39].

A escolha dos protocolos de comunicação não depende da bateria, mas sim do tipo de aplicação, como no caso de veículos elétricos, na qual os principais protocolos de comunicação entre os módulos do veículo são o CAN (*Controller Area Network*) e o *FlexRay*, sendo que ainda existem alguns protocolos que se destinam a simplificar o monitoramento de corrente e tensão internamente ao *pack* de baterias, como os protocolos SPI e I2C [39–43].

2.5 Protocolos de Comunicação

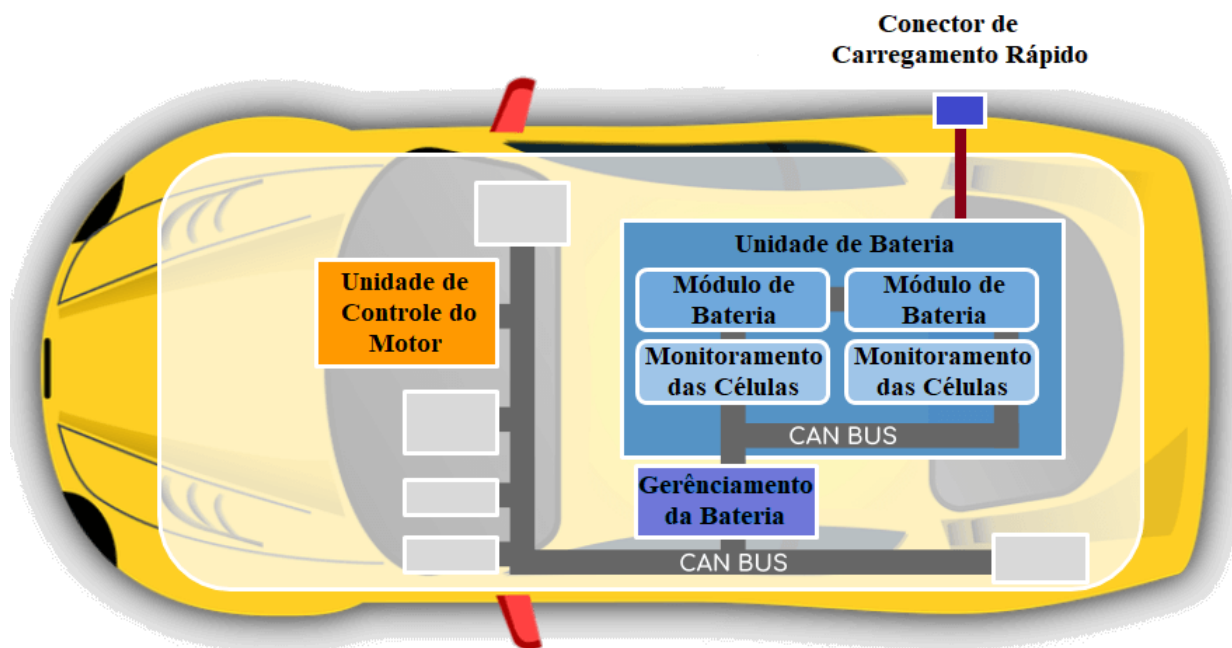
Nas subseções seguintes, os principais protocolos de comunicação entre os módulos são mais detalhados.

2.5.1 Protocolos de Comunicação CAN

Historicamente, o protocolo CAN foi desenvolvido em 1986 pela Bosch e era capaz de fazer a comunicação com as unidades de controle eletrônicas (ECU's - *Electronic Control Units*), sensores e microcontroladores de forma fácil e totalmente gerenciável, se tornando robusto no ramo de veículos em 1993 [44]. Assim, atualmente este é o protocolo mais utilizado nas aplicações automotivas [45]. Ele utiliza o formato CSMA/CD. Onde CSMA se refere a Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora (*Carrier Sense Multiple Access*) e quer dizer que cada nó no sistema deve monitorar o barramento por um período sem atividade antes de tentar enviar uma mensagem ao barramento (*Carrier Sense*), sendo que neste período qualquer nó do barramento tem oportunidade igual para transmitir uma mensagem. CD é referência para Detecção de Colisão (*Collision Detection*) e significa que se dois nós transmitirem ao mesmo tempo, os nós irão detectar a duplicidade (colisão) e tomar as medidas necessárias [46]. A grande vantagem deste protocolo, é que outros nós podem ser adicionados ao sistema, sem que haja necessidade de reprogramar todos os outros nós para reconhecer estas adições [46]. Por fim, para garantir que a energia requerida esteja disponível, a comunicação entre o BMS e o conversor ocorre através da rede interna do veículo e pode ser via CAN ou FlexRay [47–50].

Uma ilustração desta comunicação pode ser vista na Figura 8. Sendo que nesta imagem é possível observar que a rede CAN é responsável por fazer a comunicação entre a Unidade de Controle do Motor do veículo e o sistema de baterias, além de comunicar com outros dispositivos que utilizam sensores CAN, como exemplo, o módulo do painel, módulo da transmissão, módulo da direção elétrica etc.

Figura 8 – Protocolo de comunicação CAN em veículos elétricos.



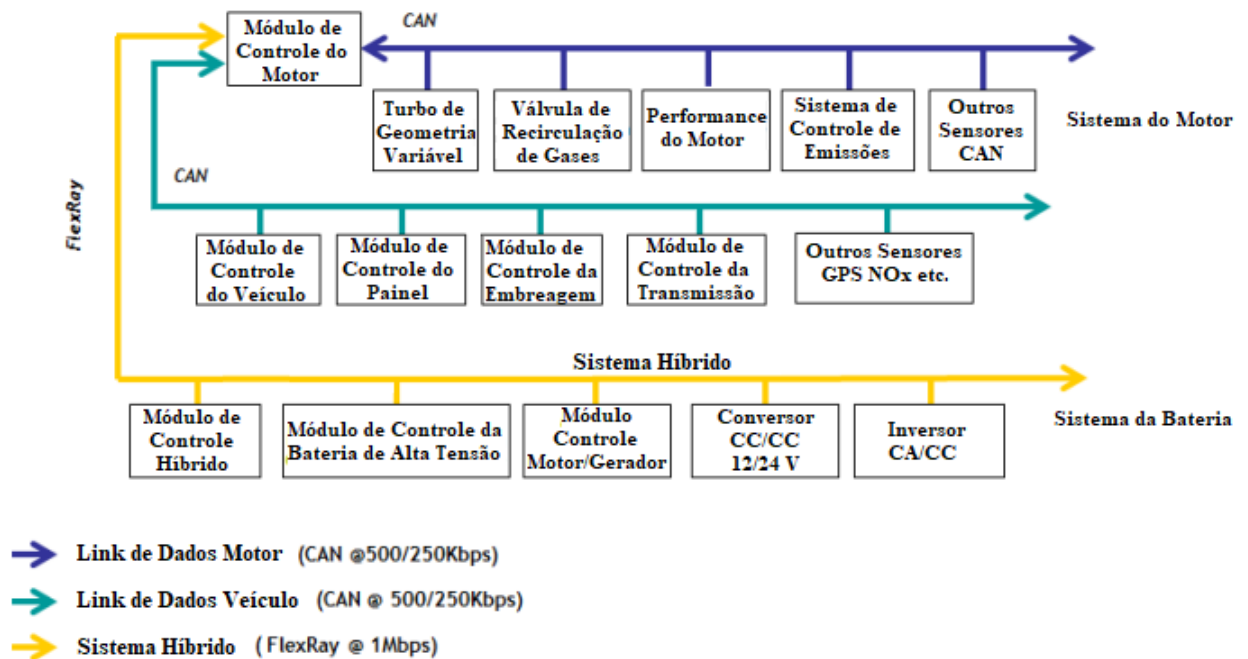
Fonte: Autor

2.5.2 Protocolos de Comunicação FlexRay

O protocolo FlexRay surgiu nos anos 2000 através da união entre BMW, Daimler-Chrysler, Philips e Motorola, sendo que este foi pensado para substituir o antigo e consagrado protocolo CAN [51]. Existe um grande consenso na indústria automotiva de que este protocolo pode vir a se tornar o protocolo padrão no desenvolvimento de novos veículos [51]. Este protocolo foi pensado para ser mais confiável que o protocolo CAN, porém, mais caro. Além disso, o protocolo FlexRay é tolerante a falhas e muito flexível, suportando taxas de transferência de até 10Mbit/s [41]. Em seu princípio de funcionamento, são utilizados dois canais de informação, sendo que cada canal pode funcionar independentemente ou podem ser utilizados para transmitir a mesma informação e, assim como no protocolo CAN, “nós” podem posteriormente ser acrescentados sem maiores problemas [51].

A Figura 9 mostra como o protocolo FlexRay pode ser adicionado ao sistema de carregamento de veículos elétricos. É possível observar que o protocolo FlexRay pode atuar paralelamente com o protocolo CAN. No exemplo, o protocolo FlexRay (representado pela linha amarela) é responsável pela comunicação entre os módulos e conversores do sistema de baterias. Já o protocolo CAN (linhas azul e verde) fica responsável pela comunicação dos módulos de conforto do veículo e os módulos de um motor à combustão por exemplo.

Figura 9 – Protocolo de comunicação FlexRay em veículos elétricos.



Fonte: Adaptado de [41]

2.6 Níveis de Carregamento

O tempo de carregamento é um dos principais desafios para os veículos totalmente elétricos (BEVs), onde o tempo para carga total varia de 2 a 6 horas [52].

Os diferentes tipos de esquema de carregamento são descritos em duas normas principais: na *International Electrotechnical Commission Standard* (IEC 61851-1) e na *Society of Automotive Engineers standard* (SAE J1772) [53, 54]. Os níveis de carregamento foram padronizados para mostrar os cenários de carregamento lento e rápido. O carregamento lento (com duração entre 7 e 17h) geralmente é realizado em casa ou em escritórios, enquanto o carregamento rápido (normalmente 15 min a 1 h), é feito em estações de carregamento presentes em locais comerciais e/ou públicos.

Conforme mostrado na Tabela 5 (referente aos tipos de carregamento presentes na norma SAE J1772), o Nível CA 1 é tipicamente realizado em ambiente doméstico, enquanto os Níveis CA 2 e 3 são adequados para áreas públicas e comerciais como locais de trabalho, cinemas, shoppings etc. Por sua vez, o carregamento rápido CC (Níveis 1–3) são previstos para abranger os postos de carregamento públicos, privados ou comerciais [54, 55].

A Tabela 6 apresenta os diferentes modos de carregamento previstos na norma IEC 61851. Nesta norma, os Modos 1, 2 e 3 como carregamento lento e o Modo 4 como carregamento rápido, sendo que os Modos 1 e 2 são utilizados em ambientes residenciais

Tabela 5 – Tipos de carregamento de acordo com a norma SAE J1772 [54].

Tipo de Carga	Nível	Tensão de Alimentação [V]	Corrente [A]	Potência de Saída [kW]	Tempo estimado de carregamento [h]	Tipo de Carregamento
Carregamento CA	Nível 1	120 Vca (1-fase)	até 16 A	até 1,92 kW	7-17 h	Lento
	Nível 2	240 Vca (1-fase)	até 80 A	até 19.2 kW	0,4-7 h	Médio
	Nível 3	240 Vca (3-fases)	até 400 A	até 96 kW	<0,5 h	Semi-Rápido
Carregamento CC	Nível 1	200-450 Vcc	até 80 A	até 36 kW	0,4-7 h	Rápido
	Nível 2	200-450 Vcc	até 200 A	até 90 kW	0,2-0,3 h	Rápido
	Nível 3	200-600 Vcc	até 400 A	até 240 kW	<0.2 h	Ultra Rápido

e ambientes privados como escritórios [56]. Os Modos 3 e 4 são utilizados em estações públicas de recarga [56].

Os sistemas de carregamento CC são instalados em locais fixos e são construídos com fiação dedicada [57]. Além disso, esses sistemas de carregamento são conhecidos como sistemas de carregamento rápido, pois podem lidar com níveis de energia mais altos, carregando os veículos elétricos em menos tempo em comparação com os carregadores CA de nível 1. Embora cada bateria de VE requiera um nível de alimentação específico, as modernas estações de carregamento CC implementaram um sistema que identifica o nível de tensão da bateria e se ajusta a ele [57].

Dependendo do fluxo de energia permitido pelo carregador, dois tipos de sistemas de carregamento podem ser encontrados – unidirecional ou bidirecional [58]. Quando a energia flui apenas em uma direção (da rede para a bateria), o sistema é chamado de unidirecional. Por outro lado, quando a energia também flui da bateria para a rede, o sistema recebe o nome de bidirecional.

Tabela 6 – Tipos de carregamento de acordo com a norma IEC 61851-1 [53, 56].

Tipo de Carga	Modo	Tensão de Alimentação [V]	Corrente [A]	Potência de Saída [kW]	Tempo estimado de carregamento [h]	Tipo de Carregamento
Carregamento CA	Modo 1	250 Vca (1-fase)	até 16 A	até 11 kW	13,7 h	Lento
		480 Vca (3-fases)	até 16 A		@3,5 kW	Lento
	Modo 2	250 Vca (1-fase)	até 32 A	até 22 kW	4,3 h	Lento
		480 Vca (3-fases)	até 32 A		@11 kW	Lento
	Modo 3	250 Vca (1-fase)	até 32 A	até 22 kW	2,15 h	Lento
		690 Vca (3-fases)	até 250 A	até 170 kW	@22 kW	Lento
Carregamento CC	Modo 4	até 1500 Vcc	até 400 A	50-600 kW	<0.2-1,28 h	Rápido

3 Topologia dos conversores CA/CC

O conversor CA/CC é um componente fundamental durante a etapa de conversão em qualquer carregador de bateria de veículos elétricos, sendo que ele faz a interface entre a rede e o barramento (*link*) de corrente contínua. Assim, ele deve atender tanto às especificações e requisitos da rede, quanto do *link* CC [59].

Durante a conversão CA/CC são gerados harmônicos de corrente indesejados no sistema da rede de distribuição, levando a um efeito negativo na qualidade de energia da rede. Deste modo, os conversores CA/CC são usados em conjunto com filtros passivos, fazendo interface com a rede elétrica, devido à problemas de qualidade de energia como em [60–63].

Os conversores CA/CC bidirecionais devem ter a capacidade de transformar corrente alternada em corrente contínua durante o processo de carga da bateria e converter corrente contínua em corrente alternada no processo de descarga da bateria.

Os conversores CA/CC geralmente são desenvolvidos utilizando diodos, tiristores e chaves controladas para fornecer energia CC em aplicações de alta potência. Quando se olha para a literatura, pode-se observar que os conversores trifásicos com PFC (*Power Factor Correction*) vem sendo usados para carregamento rápido devido à sua eficiência [55, 64–71].

Existem vários métodos de controle para os conversores trifásicos com PFC [72, 73]. Sendo que o retificador PWM trifásico tem sido usado cada vez mais, devido às suas vantagens, como fluxo de potência bidirecional, baixa distorção harmônica da corrente de entrada, alto fator de potência (próximo da unidade) e tensão de barramento CC controlável [74].

Nas subseções a seguir são apresentadas as principais topologias de conversores CA/CC utilizadas no carregamento de veículos elétricos.

3.1 Conversor CA/CC Meia-Ponte

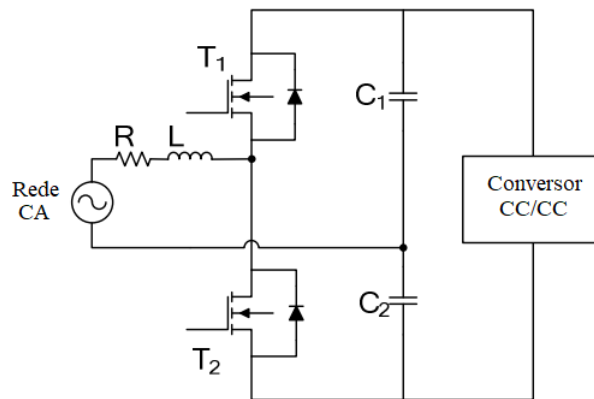
Essa topologia é a mais simples de todos os conversores bidirecionais CA/CC utilizados no carregamento de veículos elétricos. Em sua versão monofásica, são utilizadas duas chaves controláveis e em sua versão trifásica são utilizadas seis chaves controláveis para fazer a conversão CA/CC [75]. A desvantagem dessa topologia é o estresse nas chaves devido à alta tensão (igual à tensão do lado CC). Os dois grandes capacitores no lado CC aumentam o peso e o tamanho do carregador, além de afetar negativamente sua vida útil.

O controlador é normalmente composto por uma malha (*loop*) externo para regular a tensão do lado CC e um *loop* interno para modelagem da corrente do lado CA e controle do fator de potência.

A topologia monofásica bidirecional do conversor *Meia-Ponte* (Figura 10) consiste de um indutor (L), um resistor (R), dois capacitores (C_1 e C_2) e duas chaves controláveis (T_1 e T_2) que possuem diodos internos [75]. Quando a fonte CA está fornecendo uma tensão positiva, o diodo interno de T_1 é ligado e o diodo interno de T_2 é desligado. Isso conecta efetivamente C_1 na fonte CA. Quando a fonte CA fornece uma tensão negativa, ocorre o oposto e C_2 é efetivamente conectado à fonte CA. Para a retificação ativa, os transistores podem ser ligados quando os diodos estiverem polarizados diretamente.

Por outro lado, quando o retificador monofásico está funcionando no modo de descarga da bateria, as chaves são ligadas e desligadas pelos controladores PWM. Para evitar correntes de curto-circuito, T_1 e T_2 não podem ser chaveados ao mesmo tempo. Assumindo que C_1 e C_2 são idênticos, T_1 e T_2 podem ser ligados e desligados para fornecer $\pm V_{CC}/2$ através de R , L e da fonte CA [75]. Um controlador PWM varia os tempos em que essas duas tensões são aplicadas, de modo que após ser filtrada por R e L , a corrente fornecida à fonte CA tenha uma forma senoidal aceitável.

Figura 10 – Topologia monofásica bidirecional - conversor Meia-Ponte.

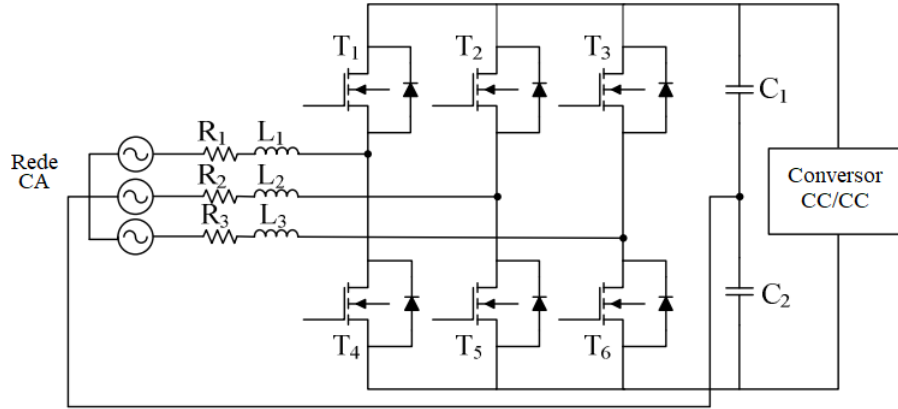


Fonte: Autor

O conversor *Meia-Ponte* trifásico (Figura 11) possui três indutores (L_1 , L_2 e L_3), três resistores (R_1 , R_2 e R_3), dois capacitores (C_1 e C_2) e seis chaves com diodos internos (T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 e T_6) [76]. O princípio de operação é essencialmente o mesmo tanto para a versão trifásica quanto para a monofásica. Durante o modo de carga da bateria, cada fonte CA carrega C_1 quando produz uma tensão positiva e carrega C_2 quando produz uma tensão negativa. A tensão resultante no conversor CA/CC trifásico bidirecional é aproximadamente a mesma da versão monofásica (tensão pico a pico de uma fonte), exceto que os capacitores de carga recebem uma corrente de carga maior, portanto, é possível carregar a bateria mais rapidamente. Com três vezes a corrente de

entrada, três vezes a corrente de saída é possível, resultando em três vezes a taxa teórica máxima de carregamento da bateria.

Figura 11 – Topologia trifásica bidirecional - conversor Meia-Ponte.



Fonte: Autor

Quando o carregador trifásico está operando no modo de descarga da bateria, o conversor CA/CC trifásico bidirecional atua como três circuitos monofásicos independentes trabalhando simultaneamente. T1 e T4, T2 e T5 e T3 e T6 trabalham juntos para fornecer $\pm V_{CC}/2$ através de cada conjunto respectivo de um indutor, um resistor e uma fonte CA [75]. Assim como a versão monofásica, um PWM controla cada chave para que a combinação certa das duas tensões seja aplicada ao indutor, ao resistor e à fonte CA para resultar em uma tensão de saída senoidal limpa na fonte CA.

Um grande benefício da topologia *Meia-Ponte* é a simplicidade do projeto. Isso se traduz em menos componentes, o que, por sua vez, significa menor custo de fabricação. No entanto, esta topologia exibe altas tensões de componentes, o que pode exigir que os transistores sejam conectados em paralelo e/ou série para lidar com a alta corrente e/ou tensão [75].

A menos que devidamente filtrado, o conversor *Meia-Ponte* a diodos produz muitas correntes harmônicas durante o chaveamento, que podem ser prejudiciais à rede. Um filtro passivo convencional adequado para remover as correntes harmônicas exigiria componentes volumosos. Embora o baixo número de componentes faça com que o custo pareça baixo no papel, a implementação desse circuito em altos níveis de potência pode exigir custos adicionais [75]. Assim, é destacada a vantagem do conversor *Meia-Ponte* a IGBT's para altas potências.

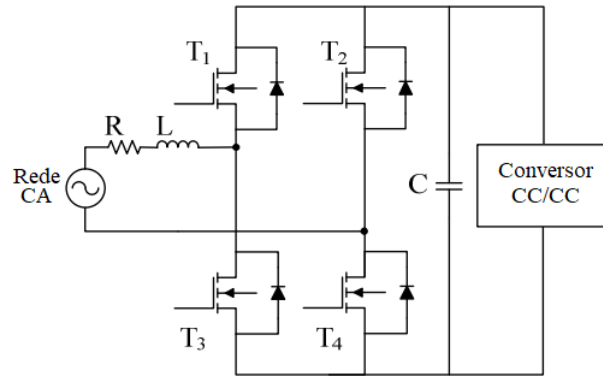
3.2 Conversor CA/CC Ponte-Completa

O conversor CA/CC *Ponte-Completa* é composto por quatro chaves controláveis em sua versão monofásica e em sua versão trifásica são utilizadas 8 chaves (se houver caminho de retorno para o neutro em um sistema a 4 fios) ou 6 chaves (quando o sistema não tem conexão de neutro), além de ser inerentemente um retificador Boost com capacidade de correção do fator de potência. Devido às tensões PWM de $\pm V_{CC}$ refletidas no lado CA (em contraste com $\pm V_{CC}/2$ do conversor *Meia-Ponte*), a mesma potência pode ser obtida com metade da corrente de comutação necessária em um conversor *Meia-Ponte*, exigindo menos das chaves, reduzindo assim as perdas de chaveamento e tornando a topologia *Ponte-Completa* adequada para aplicações de maior potência.

Como na topologia *Meia-Ponte*, a tensão do barramento CC contém um componente harmônico de baixa frequência com o dobro da frequência da rede, criando problemas de qualidade de forma de onda para a bateria e necessita de filtragens adicionais, como a filtragem ativa ou filtragem *notch* [77], sendo esta última para eliminar efeitos de ruídos periódicos. Os filtros sintonizados (*notch*) são filtros capazes de rejeitar uma faixa bastante estreita de frequências, assim sua utilização é recomendada quando o sinal a ser atenuado é bem definido. O controle é semelhante ao do conversor *Meia-Ponte*.

A versão monofásica do conversor CA/CC *Ponte-Completa* (Figura 12) consiste em um indutor (L), um resistor (R), um capacitor (C) e quatro chaves com diodos internos (T1, T2, T3 e T4) [75]. Assim como o circuito meia-ponte, as chaves permanecem abertas no modo de carregamento da bateria e os diodos internos retificam a corrente passivamente. Quando a fonte CA emite uma tensão positiva, C1 é efetivamente conectado em paralelo com a fonte CA através dos diodos internos de T1 e T4. Durante os momentos em que a fonte CA emite uma tensão negativa, os diodos internos de T2 e T3 conduzem para permitir que C1 seja novamente conectado em paralelo com a fonte CA, mas em uma configuração inversa. Para retificação ativa, as chaves podem ser ligadas quando os diodos estiverem polarizados diretamente.

Figura 12 – Topologia monofásica bidirecional - conversor Ponte-Completa.

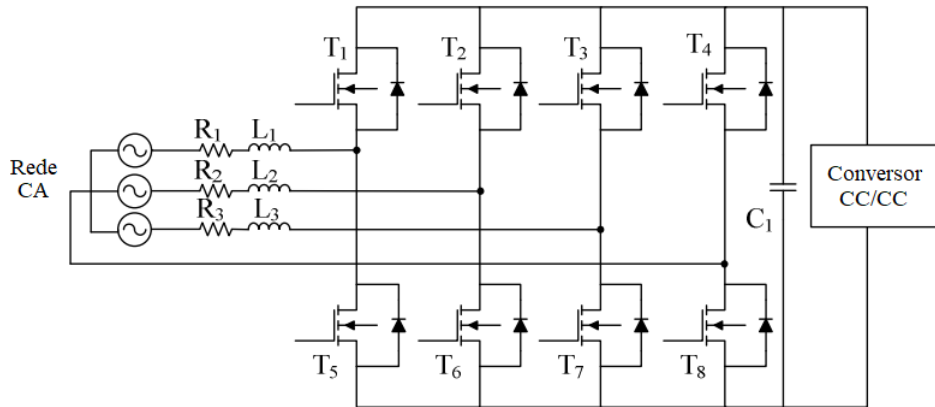


Fonte: Autor

Quando o conversor monofásico CA/CC *Ponte-Completa* atua no modo de descarga da bateria, T1 e T4 ou T2 e T3 podem ser ativados para aplicar $\pm V_{CC}$ na fonte CA. Certamente, ligar T1 e T2 ou T3 e T4 ao mesmo tempo produziria 0 volts. Por meio do controle PWM de cada transistor, o padrão de comutação adequado pode ser implementado. Quando esta combinação de V_{CC} , $-V_{CC}$ e pulsos de 0 volts é aplicada, o indutor e o resistor atenuam o sinal de chaveamento e a corrente passa a se assemelhar à onda senoidal CA desejada. [75].

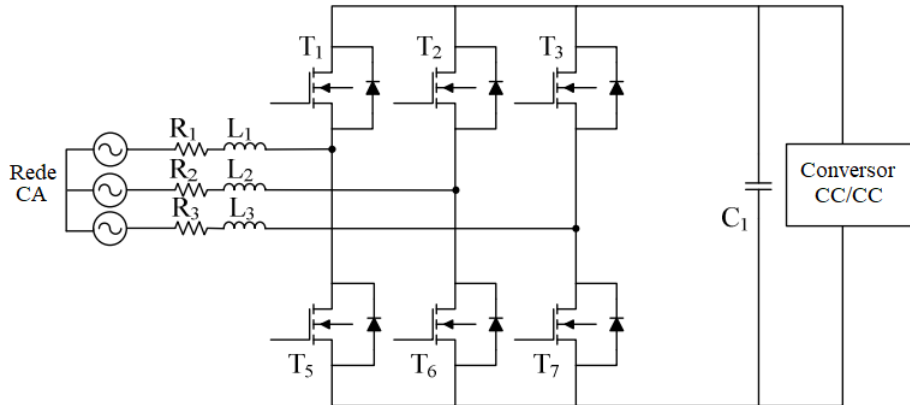
O circuito conversor CA/CC *Ponte-Completa* trifásico possui três indutores (L_1 , L_2 e L_3), três resistores (R_1 , R_2 e R_3), um capacitor (C_1) e oito chaves (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 e T8) - com retorno para o neutro (Figura 13) ou seis chaves (T1, T2, T3, T5, T6, T7) - sem retorno para o neutro (Figura 14), cada uma com diodos internos [76]. Mais uma vez, a versão trifásica do conversor em questão funciona quase exatamente como três circuitos monofásicos separados que compartilham o mesmo capacitor. Ter três fases em vez de uma resulta em nenhuma mudança na tensão fornecida ao barramento CC/CC sem carga, mas o circuito trifásico pode suportar uma carga muito maior. Em outras palavras, a taxa teórica máxima de carregamento é aumentada.

Figura 13 – Topologia trifásica bidirecional - conversor *Ponte-Completa* com retorno para o neutro.



Fonte: Autor

Figura 14 – Topologia trifásica bidirecional - conversor *Ponte-Completa* sem retorno para o neutro.



Fonte: Autor

Ao operar no modo de descarga da bateria, a versão trifásica do conversor se comporta como três circuitos monofásicos independentes que compartilham a fonte CC. T1 e T5, T2 e T6 e T3 e T7 trabalham em combinação com T4 e T8 (T4 e T8 apenas quando se tem retorno para o neutro) para fornecer V_{CC} , $-V_{CC}$ e 0 volts através de cada respectivo indutor, resistor e fonte CA. Através do controle de cada chave com o sinal PWM apropriado, a combinação certa de pulsos pode ser aplicada a cada indutor, resistor e fonte CA para fornecer a saída de tensão senoidal desejada à fonte CA [75].

Em comparação com o conversor PWM *Meia-Ponte*, o conversor *Ponte-Completa* tem um capacitor a menos e dois transistores a mais com diodos internos. Isso sugere que a *Ponte-Completa* teria um custo maior, pois possui mais componentes; no entanto, é importante ter em mente que as tensões dos componentes são menores no circuito de *Ponte-Completa*. Isso significa que, apesar de ter mais chaves, o custo de cada chave é

reduzido. O custo da eletrônica de potência pode ser um pouco semelhante, mas o *Ponte-Completa* exigirá o dobro de entradas PWM. Isso aumentará a complexidade e o custo dos circuitos de controle.

Semelhante ao conversor de *Meia-Ponte* a diodos, o retificador *Ponte-Completa* a diodos pode produzir correntes harmônicas se não for devidamente filtrado. É interessante notar que para um mesmo valor de potência, o circuito *Meia-Ponte* gera uma tensão de $\pm V_{cc}/2$, enquanto o *Ponte-Completa* pode produzir uma tensão de $\pm V_{cc}$. Isso pode desempenhar um papel significativo na escolha do conversor CC/CC, uma vez que o V_{cc} deve ser duas vezes maior com o conversor *Meia-Ponte*. Em outras palavras, para uma dada tensão de entrada no conversor CC/CC, a tensão de saída deve ser duas vezes maior ao usar o conversor CA/CC *Meia-Ponte*.

3.3 Conversor CA/CC Multinível PWM

Os conversores PWM multiníveis oferecem vantagens em termos de menores níveis de tensão nos dispositivos de chaveamento, perdas de comutação reduzidas devido à menores frequências de chaveamento, redução de harmônicos, fator de potência mais alto no lado CA e menores valores de ripple de tensão do lado CC. Os conversores multiníveis são adequados para aplicações de alta potência e alta tensão. As desvantagens incluem a complexidade do controle e o custo do circuito de alimentação, além do maior número de componentes, tornando-o difícil de justificar para aplicações que não necessitam de mais de um nível de carregamento [78].

IGBT's e MOSFET's são chaves ideais para aplicações de baixa e média potência, enquanto os GTO's são utilizados para aplicações de alta potência [79].

A seguir são apresentadas diferentes topologias de conversores multinível.

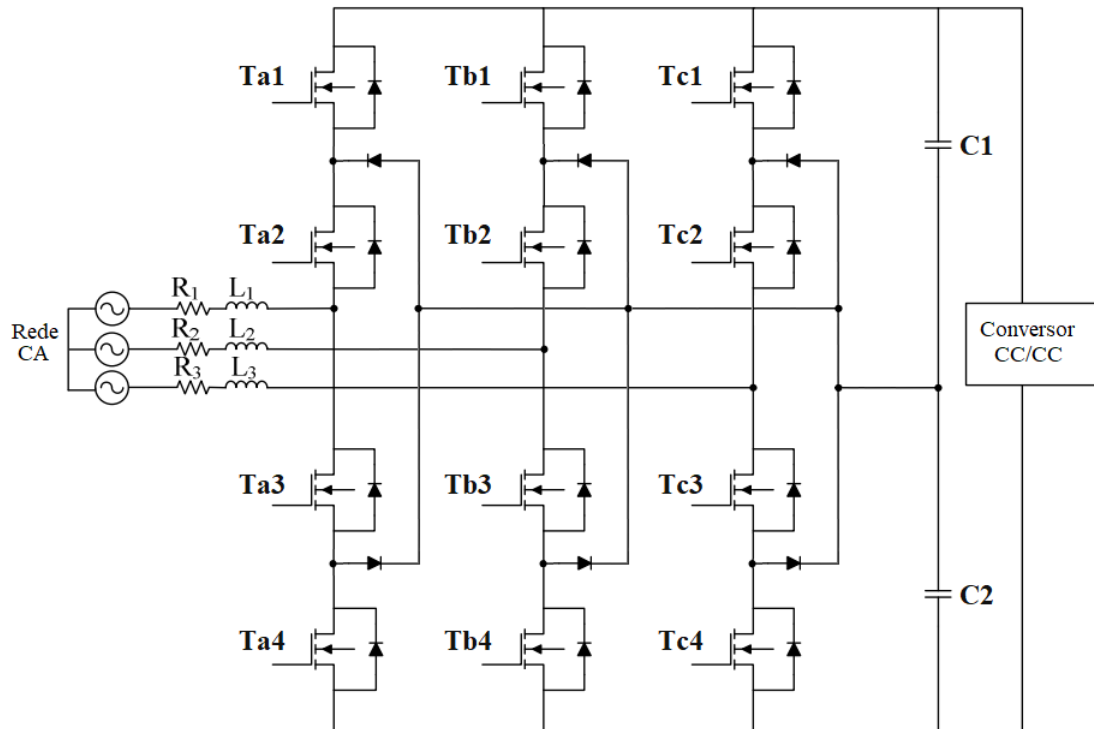
3.3.1 Conversor CA/CC Three-level diode clamped

Embora o retificador trifásico a diodo [55] (topologia unidirecional) e o retificador PWM ativo de 2 níveis [80] sejam as duas topologias mais populares para o estágio CA/CC do conversor, várias outras topologias foram encontradas na literatura, o que reduz os requisitos do filtro do carregador. Por exemplo, [47, 68] propôs uma topologia de conversor CA/CC trifásica denominada *three-level diode clamped*, que é apresentada na Figura 15. Devido à operação em três níveis e à estratégia de modulação PWM, a topologia pode reduzir o tamanho do filtro de entrada. Embora o nível de tensão em cada dispositivo semicondutor seja reduzido, o número de dispositivos semicondutores é dobrado em comparação com o retificador ativo de dois níveis.

Se comparado ao conversor *Ponte-Completa*, o nível de tensão nas chaves deste

conversor pode ser reduzida, dependendo da estratégia de controle [81].

Figura 15 – Topologia trifásica bidirecional - Conversor CA/CC Three-level diode clamped.



Fonte: Autor

Existem ainda alguns outros tipos de conversores menos utilizados, como o T-type Neutral-Point Clamped, Five-Level Flying Capacitor, Five-Level Flying Diode, etc.

4 Topologia dos conversores CC/CC

Com o desenvolvimento da indústria de veículos elétricos, vem surgindo novos desafios envolvendo principalmente o tempo de carregamento das baterias destes veículos, assim, é necessário o aprimoramento de técnicas para promover um menor tempo de carregamento, aumentar o número de pontos de carregamento, aumentar a autonomia que as baterias podem oferecer, proporcionar reduções nos custos de produção etc.

Ao contrário dos carregadores CA, em que os veículos elétricos necessitam de um conversor CA/CC integrado chamado “carregador de bordo” que converte energia CA em energia CC, um carregador CC tem o conversor dentro do próprio carregador. Isso significa que ele pode fornecer energia diretamente à bateria do veículo e não precisa do carregador integrado para convertê-la. Os carregadores CC são maiores, mais rápidos e representam um avanço importante quando se trata de veículos elétricos.

Um conversor CC/CC pode ser considerado equivalente a um transformador CA, de modo que é possível obter uma tensão CC variável a partir de uma tensão constante [82]. Como um transformador CA, o conversor CC/CC pode ser usado para abaixar e/ou aumentar a tensão CC de determinada fonte de energia. No processo de transformação, primeiro a energia é transferida via chaves de eletrônica de potência (IGBT, Power BJT e Power MOSFET para aplicações de baixa potência e SCRs para aplicações em alta potência), para dispositivos armazenadores de energia (Indutores e/ou Capacitores) e então enviada dos armazenadores para a carga [82].

Estes conversores são largamente utilizados no controle dos motores de tração em veículos elétricos, guinchos marítimos, empilhadeiras [83]. Também são utilizados nos carregadores, que são o foco deste trabalho.

4.1 Conversores CC/CC

A topologia de conversores CC/CC pode ser dividida em duas categorias distintas. A primeira se refere aos conversores não isolados, na qual não se tem nenhum transformador isolador entre a entrada e a saída. Na segunda categoria, entram os conversores com isolamento, na qual um transformador se encarrega de isolar os estágios de entrada e saída, sendo estes utilizados principalmente quando os níveis de tensão de entrada e saída diferem significativamente [82].

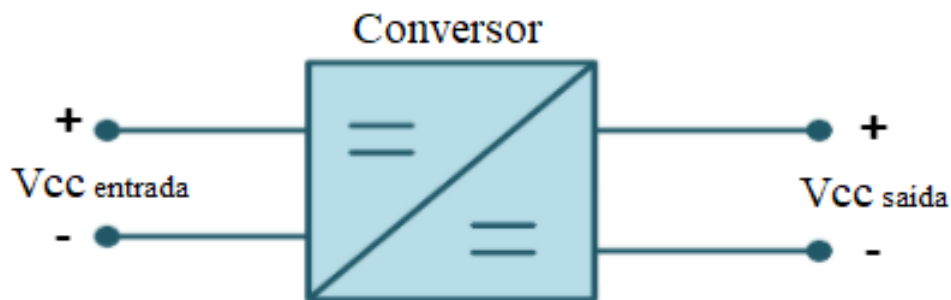
Segundo [82–85], os principais conversores CC/CC não isolados são:

- *Buck*;

- *Boost*;
- *Buck-Boost*;
- *Cuk*;
- *Conversor Bidirecional Intercalado (IBC - Interleaved Bidirectional Converter)*,

A Figura 16 apresenta um diagrama de blocos geral para os conversores não isolados.

Figura 16 – Diagrama de blocos conversores CC não isolados.



Fonte: Adaptado de [86]

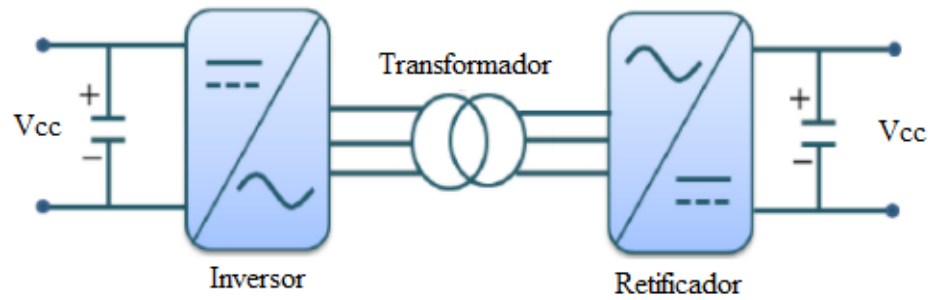
Para os conversores isolados, de acordo com [82, 87–89], os principais são:

- *Flyback*;
- *Forward*;
- *Ponte-Completa*;
- *Meia-Ponte*;
- *Push-pull*;
- *Chaveamento em Zero de Tensão (ZVSC - Zero Voltage Switching Converter)*;
- *Multiporta*.

A Figura 17 apresenta um diagrama de blocos geral para os conversores isolados.

Conforme pode ser visto em [90, 91], nos veículos elétricos tipo BEV e PHEV, a fonte de energia on-board (baterias e supercapacitores) são conectadas através de conversores CC/CC ao barramento de alta tensão (HVDC - *High-Voltage Direct Current*) e, consequentemente, aos carregadores, que podem ser representados pela frenagem regenerativa, pelo motor de tração e/ou ainda através da conexão com a rede elétrica externa.

Figura 17 – Diagrama de blocos conversores CC isolados.

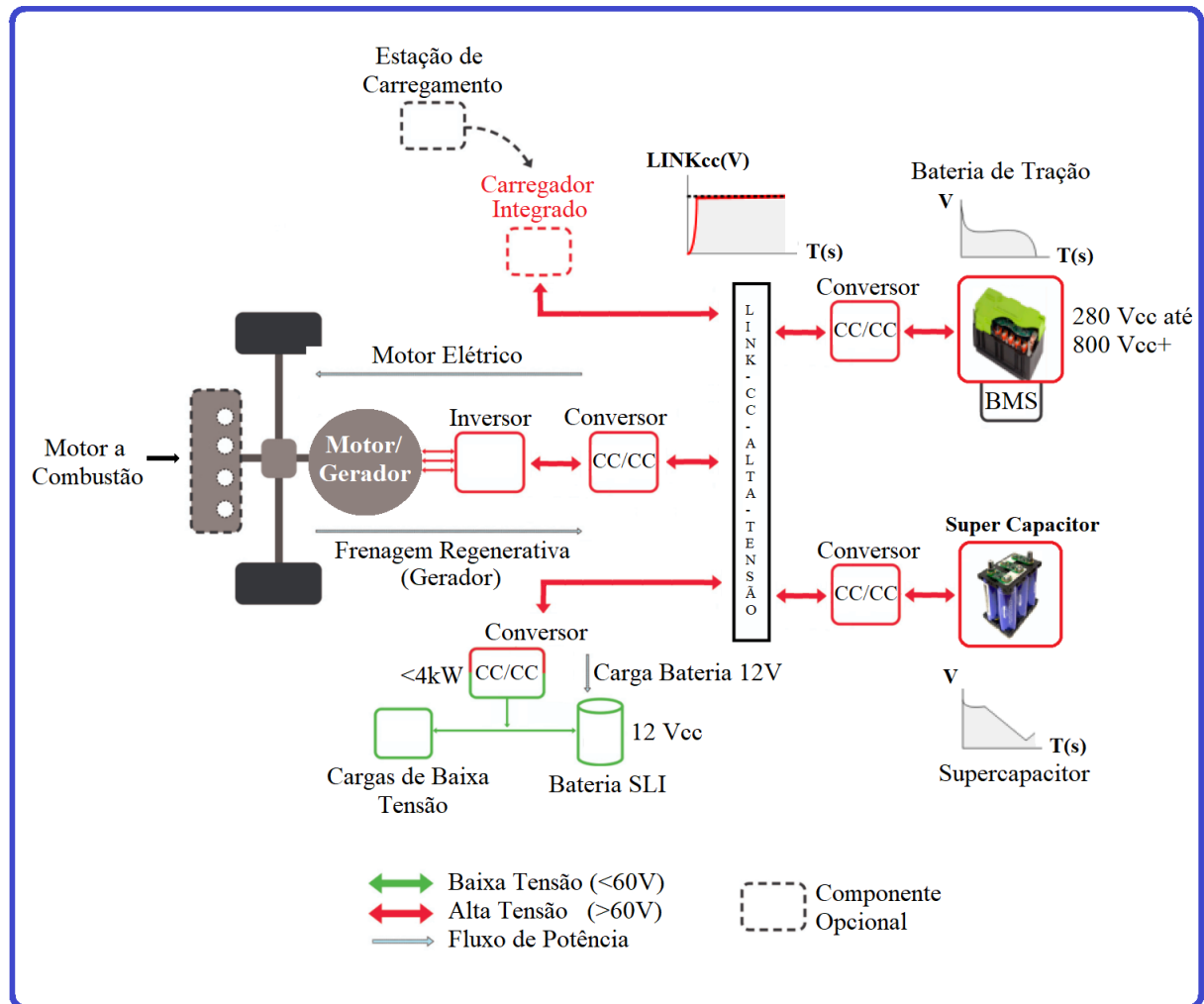


Fonte: Adaptado de [86]

Um exemplo da topologia dos veículos elétricos pode ser visto na Figura 18, mostrando como se integra a frenagem regenerativa, conversores, é mostrado ainda que opcionalmente o carregador pode ser integrado ao veículo ou o carregador ser a própria estação de recarga etc . Além disso, combinando baterias com supercapacitores, o estresse nas baterias é reduzido, garantindo uma resposta rápida e dinâmica e aumento da vida útil [91].

Além disso, as fontes de energia bidirecionais (ex. baterias e supercapacitores - SCs) presentes no diagrama, necessitam de conversores CC/CC bidirecionais para absorver a energia durante a frenagem regenerativa por exemplo. Acrescido ainda o fato de que estes conversores tem diferentes especificações devido às características da fonte de energia à qual são conectados, por exemplo, devido à capacidade de carga e descarga rápida dos SCs, os conversores necessitam de uma característica dinâmica mais rápida. Assim, evita-se incompatibilidades operacionais e maximiza-se a eficiência geral do sistema [92].

Figura 18 – Diagrama de blocos de um veículo elétrico.



Fonte: Autor

4.2 Topologias de Conversores CC/CC aplicadas em veículos elétricos

Como visto anteriormente, é mais usual que conversores CC/CC internos aos VEs e que são utilizados no carregamento das baterias sejam bidirecionais, entretanto, podem existir casos em que o carregamento seja feito a partir de conversores unidirecionais, como é o caso dos carregadores ligados à rede elétrica. As topologias de alguns destes conversores são apresentadas nas subseções abaixo.

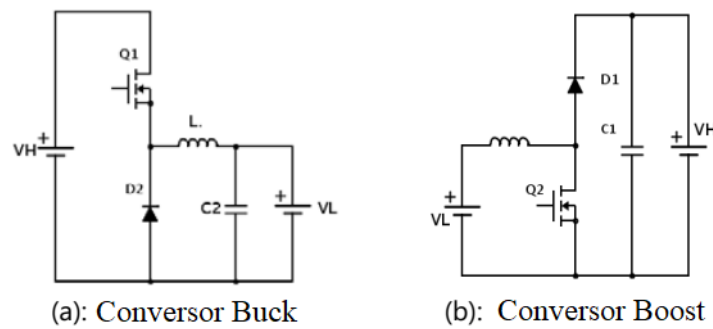
4.2.1 Topologia de Conversores CC/CC Não Isolados

Nesta subseção, encontram-se as principais topologias dos conversores para carregamento de baterias do tipo não isolados.

4.2.1.1 Buck-Boost

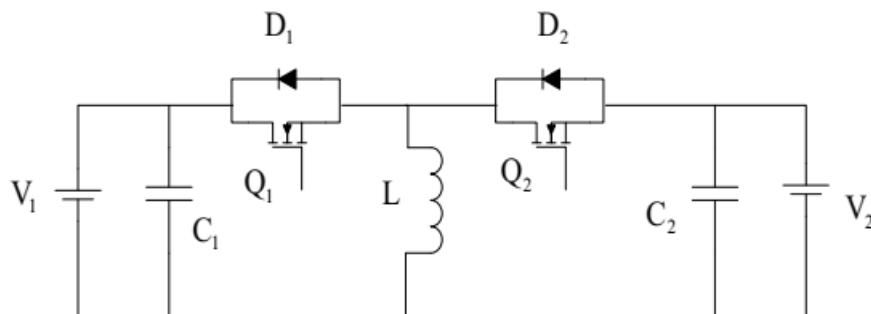
Como pode ser observado em [93,94], o conversor *Buck/Boost* bidirecional é derivado dos conversores *Buck* e *Boost* convencionais (Figura 19), que utilizam diodos e não permitem a condução em ambos sentidos. A solução para isto, é feito substituindo-se os diodos por MOSFET's ou IGBT's. Assim, o conversor bidirecional (Figura 20) funciona da seguinte maneira: para uma elevação da tensão de saída (*Boost*), a chave Q2 permanece desligada durante todo tempo e Q1 irá ligar e desligar de acordo com o estado do PWM. Para abaixar a tensão (*Buck*), Q1 permanece desligado todo tempo e Q2 irá ligar e desligar de acordo com o estado do PWM. Este conversor apenas atua como *Boost* no modo *Forward* ou Direto (V_1 para V_2) e como *Buck* no modo *Reverse* ou Reverso (V_2 para V_1).

Figura 19 – Conversor unidirecional (a)*Buck* (b)*Boost*.



Fonte: Adaptado de [94]

Figura 20 – Conversor bidirecional *Buck/Boost*.

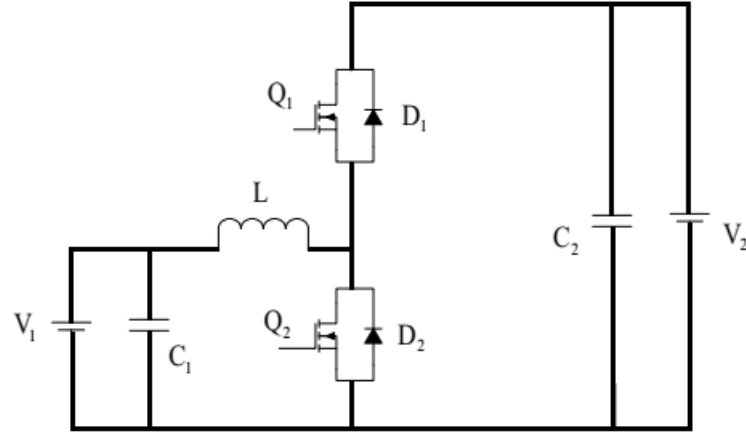


Fonte: [94]

Uma outra forma de representar o conversor *buck/boost*, pode ser vista na Figura 21. Devido ao seu arranjo simples, este conversor é um dos mais empregados no sistema de tração de VE's e HEV's, sendo utilizado em veículos como Toyota Prius, Camry e Ford Fusion [93]. Igualmente ao conversor da Figura 20, este conversor apenas atua como *Boost*

no modo *Forward* ou Direto (V_1 para V_2) e como *Buck* no modo Reverse ou Reverso (V_2 para V_1). A Tabela 7 apresenta a lógica de chaveamento.

Figura 21 – Conversor bidirecional de um braço (*Buck/Boost Meia-Ponte*).



Fonte: Adaptado de [93]

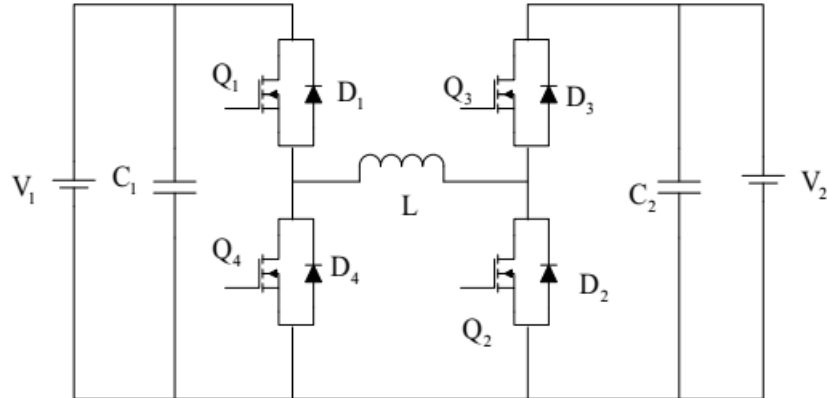
Tabela 7 – Lógica de chaveamento do conversor CC (*Buck-Boost Meia-Ponte*).

Modo de Operação	Q1	Q2
<i>Boost Forward</i> (Direto)	Desligado	PWM
<i>Buck Reverse</i> (Reverso)	PWM	Desligado

4.2.1.2 Buck-Boost em Cascata

Segundo [93–95], o conversor *Buck-Boost em Cascata* (Figura 22) é obtido fazendo-se uma cascata entre os conversores *Buck* e *Boost* bidirecionais. A combinação de correntes e chaves, faz com que a tensão de saída seja maior ou menor que a tensão de entrada. Para o processo de aumento direto da tensão de saída, as chaves Q_3 e Q_4 permanecem sempre desativadas e a chave Q_1 sempre ativa, enquanto Q_2 conduz conforme o ciclo de trabalho. Já o processo de redução direta da tensão de saída, Q_2 , Q_3 e Q_4 estão sempre desligadas enquanto Q_1 conduz de acordo com o ciclo de trabalho.

A Tabela 8 mostra um resumo das combinações possíveis com o conversor *Buck-Boost em Cascata*.

Figura 22 – Conversor bidirecional *Buck-Boost Cascade*.

Fonte: [94]

Tabela 8 – Possibilidades de chaveamento do conversor *Buck-Boost Cascade*.

Modo de Operação	Q1	Q2	Q3	Q4
<i>Buck Forward</i> (Direto)	PWM	Desligado	Desligado	Desligado
<i>Boost Forward</i> (Direto)	Ligado	PWM	Desligado	Desligado
<i>Buck-Boost Forward</i> (Direto)	PWM	PWM	Desligado	Desligado
<i>Buck Reverse</i> (Reverso)	Desligado	Desligado	PWM	Desligado
<i>Boost Reverse</i> (Reverso)	Desligado	Desligado	Ligado	PWM
<i>Buck-Boost Reverse</i> (Reverso)	Desligado	Desligado	PWM	PWM

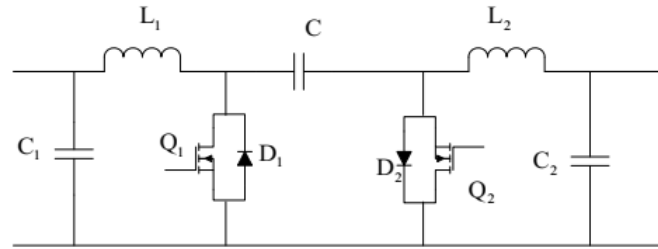
4.2.1.3 CUK

O conversor CUK bidirecional pode ser utilizado no carregamento de baterias de veículos elétricos da mesma maneira que o conversor *Buck-Boost*, com vantagem de que esta topologia tem baixos valores de *ripple* na corrente, tanto na entrada quanto na saída do conversor. Além disso, o método de controle Proporcional-Integral (PI) é utilizado para se obter um valor constante de corrente no processo de recarga da bateria [96].

Como o conversor CUK é baseado nos conversores *Buck* e *Boost*, seu funcionamento também é similar, desta forma, no modo direto, o MOSFET Q1 atuará como uma chave controlada por um sinal do tipo PWM e Q2 estará *OFF*, já no modo reverso, Q2 será controlado pelo sinal PWM e Q1 estará *OFF* [96].

Os capacitores C1 e C2 atuam como capacitores de acoplamento e o capacitor C atua como elemento armazenador de energia [94]. Um esquema da topologia deste conversor pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Conversor bidirecional CUK.



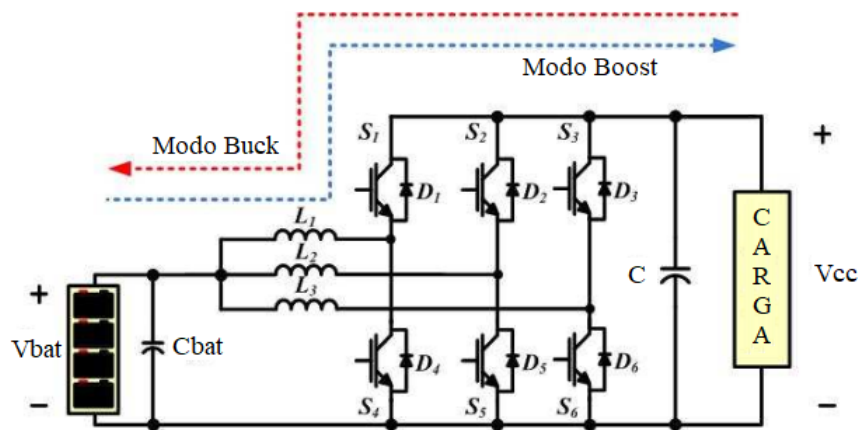
Fonte: [94]

4.2.1.4 Conversor Multifásico Intercalado Bidirecional

Os conversores multifásicos apresentam a vantagem de ter maior eficiência, permitir uma relação de transformação maior que 4 vezes e, também, proporcionam a diminuição do valor de *ripple* das correntes e tensões de entrada e saída [97]. Como a corrente é menor, o tamanho e peso dos capacitores e indutores podem ser reduzidos [98, 99].

Assim, este tipo de conversor permite uma maior capacidade de gerenciamento da potência. A Figura 24, apresenta a topologia deste conversor, onde em veículos elétricos, a representação da carga (*load*) é na verdade o barramento HVDC ou um inversor acoplado a um motor.

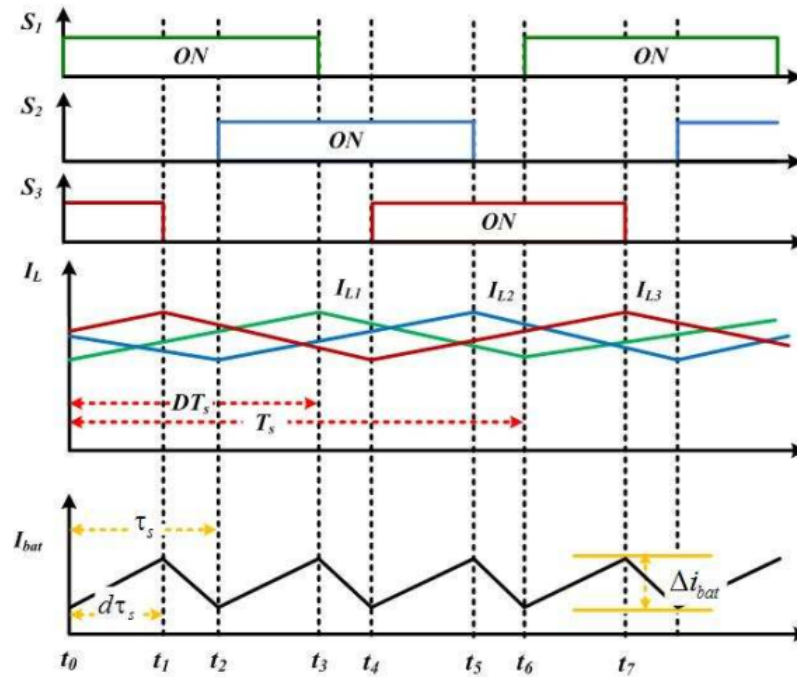
Figura 24 – Conversor intercalado bidirecional não isolado (IBC).



Fonte: Adaptado de [100]

Na Figura 25, são mostrados os sinais aplicados nas chaves e, também, as formas de onda da corrente no conversor.

Figura 25 – Conversor intercalado bidirecional não isolado (IBC), formas de onda e chaveamento.



Fonte: [100]

4.2.2 Topologia de Conversores CC/CC Isolados

Nesta subseção, encontram-se as topologias dos conversores para carregamento de baterias do tipo isolados.

4.2.2.1 Flyback

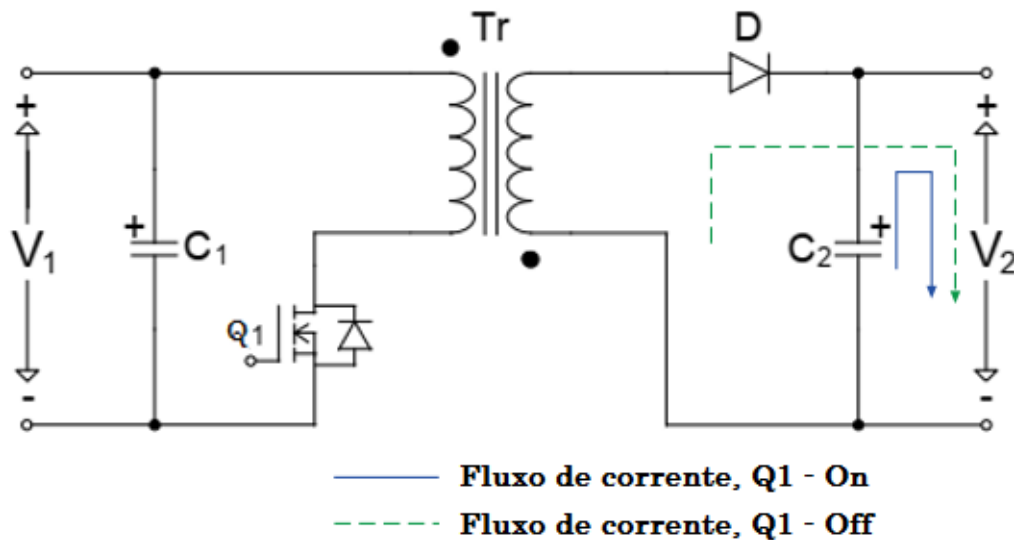
A topologia do conversor *Flyback* é considerada a mais simples entre os conversores isolados unidirecionais, sendo que sua topologia, diferentemente da topologia dos demais conversores, dispensa o uso de indutor [101]. Esta topologia costuma ser a mais utilizada dentre os conversores isolados, principalmente por seu baixo custo e facilidade de uso, entretanto, apresenta baixa utilização do transformador e valores altos de *ripple* da corrente, o que demanda o uso de capacitores maiores [102]. Geralmente é um conversor utilizado em aplicações de baixa potência.

A representação unidirecional deste conversor pode ser conferida na Figura 26.

No funcionamento deste conversor (Figura 26), quando a chave Q1 está no estado ON, flui uma corrente através do enrolamento primário do transformador T_r , gerando um fluxo magnético no lado secundário e, conseqüentemente, uma tensão negativa surge devido à relação entre os enrolamentos. Neste momento, não flui nenhuma corrente através do diodo D, pois este encontra-se no modo de bloqueio, fazendo com que a corrente seja

provida pelo capacitor C_2 . Quando a chave Q_1 fica *OFF*, o colapso do fluxo magnético faz com que a polaridade do primário e secundário se inverta, o diodo D entra em condução e a corrente flui do secundário do transformador para o capacitor C_2 e, também, para alguma carga acoplada entre os terminais de V_2 [103].

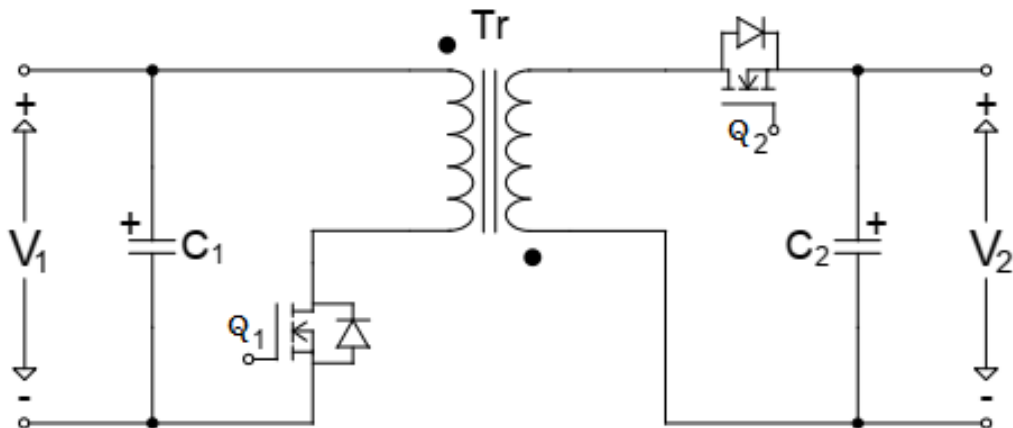
Figura 26 – Conversor Flyback unidirecional.



Fonte: Autor

Conforme dito anteriormente, como os veículos elétricos exigem cada vez mais uma troca de potência entre a carga e a fonte, é mais usual que os conversores sejam bidirecionais. A maneira mais simples de obter um conversor bidirecional é substituir o diodo (D) do conversor unidirecional por chaves controladas por PWM [104]. Assim, a Figura 27 apresenta a topologia bidirecional deste conversor.

Figura 27 – Conversor Flyback bidirecional.



Fonte: Autor

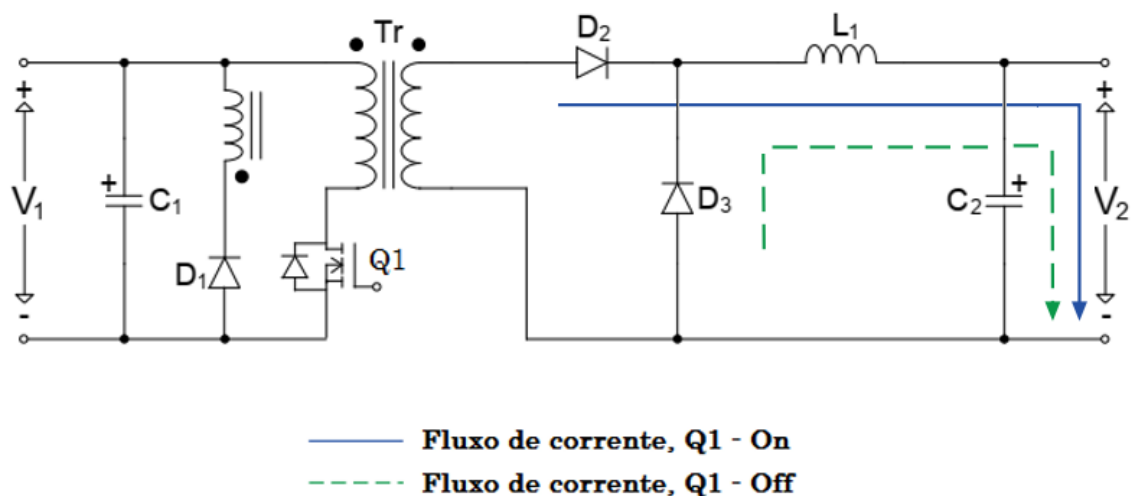
4.2.2.2 Forward

A topologia do conversor *Forward* geralmente é empregada em aplicações de média potência e assim como o conversor *Flyback*, apresenta má utilização do transformador devido ao ciclo de trabalho limitado. As Figuras 28 e 29 apresentam, respectivamente, as topologias unidirecional e bidirecional do conversor *Forward*.

Como na topologia *Flyback*, quando a chave Q1 (Figura 28) é fechada, é induzida uma corrente no secundário do transformador [103]. Esta corrente circula através do diodo retificador D2, promovendo o armazenamento de energia no indutor L1 e no capacitor C2. Quando o capacitor atinge um determinado valor de energia, é enviado um comando para abertura da chave Q1.

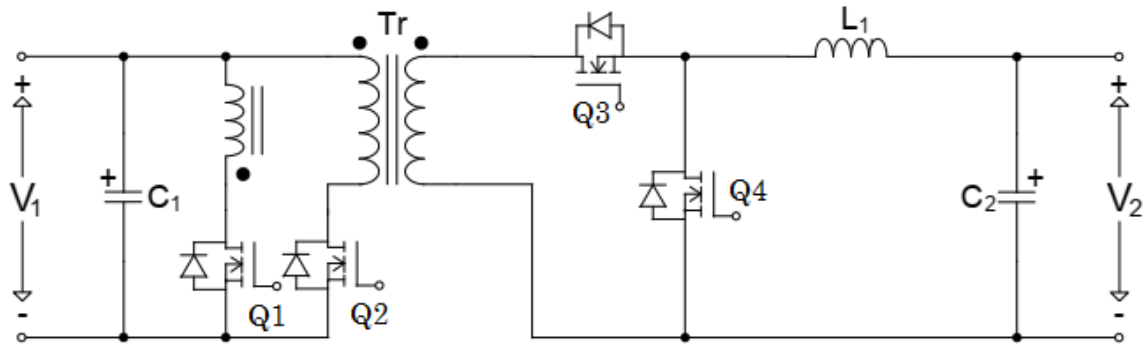
Quando a chave é aberta, o enrolamento com o diodo D1 impede que ocorra o colapso do campo magnético, assim, ocorre a polarização reversa do enrolamento secundário e a uma corrente negativa flui através do diodo D3 para o indutor L1 e finalmente para o capacitor C2 e para a carga [103]. Quando a tensão no capacitor se reduz abaixo de determinado limite, a chave Q1 é acionada e o ciclo se reinicia.

Figura 28 – Conversor Forward unidirecional.



Fonte: Autor

Figura 29 – Conversor Forward bidirecional.



Fonte: Autor

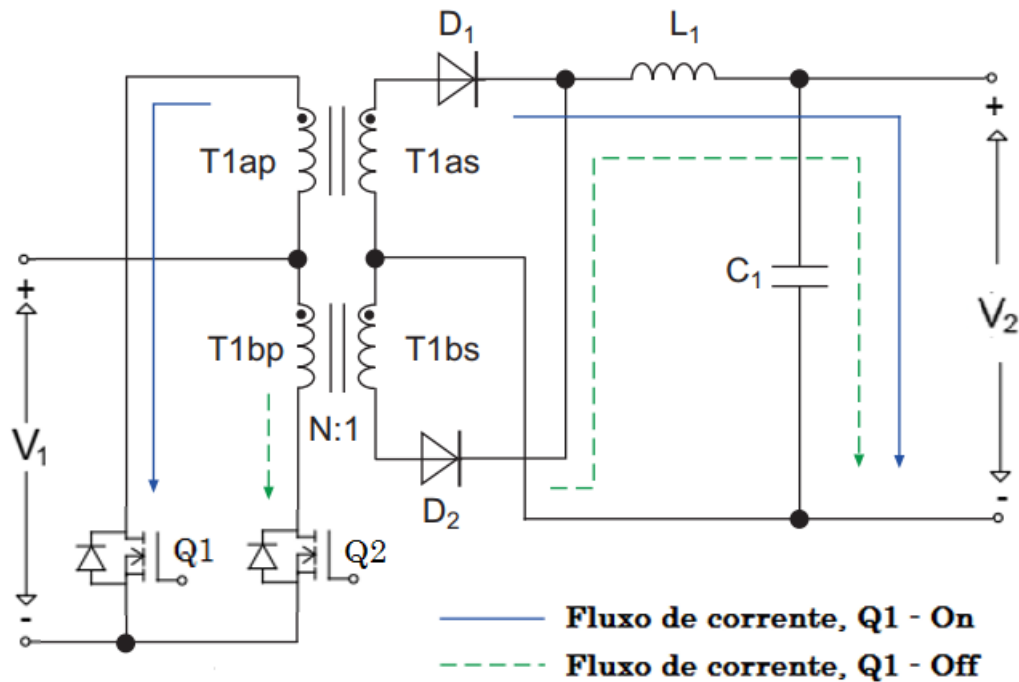
4.2.2.3 Push-Pull

O conversor *Push-Pull* é capaz de converter uma tensão de entrada em uma tensão maior ou menor na saída, entretanto, este conversor necessita de enrolamentos divididos tanto para o lado primário, quanto para o lado secundário do transformador. A Figura 30 apresenta a topologia do conversor unidirecional Push-Pull.

Quando a chave Q1 (Figura 30) muda para o estado *ON*, a corrente aumenta no enrolamento T1ap e simultaneamente flui uma corrente pelo secundário (induzida pelo enrolamento TA1s) através do diodo retificador D1 e do indutor L1. Esta corrente também flui para a carga e carrega o capacitor C1. Quando a chave Q1 fica *OFF*, a polaridade se inverte e o diodo D1 bloqueia a tensão negativa no enrolamento secundário T1as, entretanto, a corrente ainda flui pelo indutor L1 através do enrolamento secundário T1bs e do diodo D2. A chave S2 então é fechada e a corrente agora passa a fluir no enrolamento secundário T1bs.

Como o ciclo de trabalho é aproximadamente igual para as chaves Q1 e Q2, é importante que se tenha um *delay* entre o fechamento de uma chave e, consequentemente, a abertura da outra chave, caso contrário pode ocorrer um curto circuito [103].

Figura 30 – Topologia do conversor bidirecional Push-Pull.



Fonte: Autor

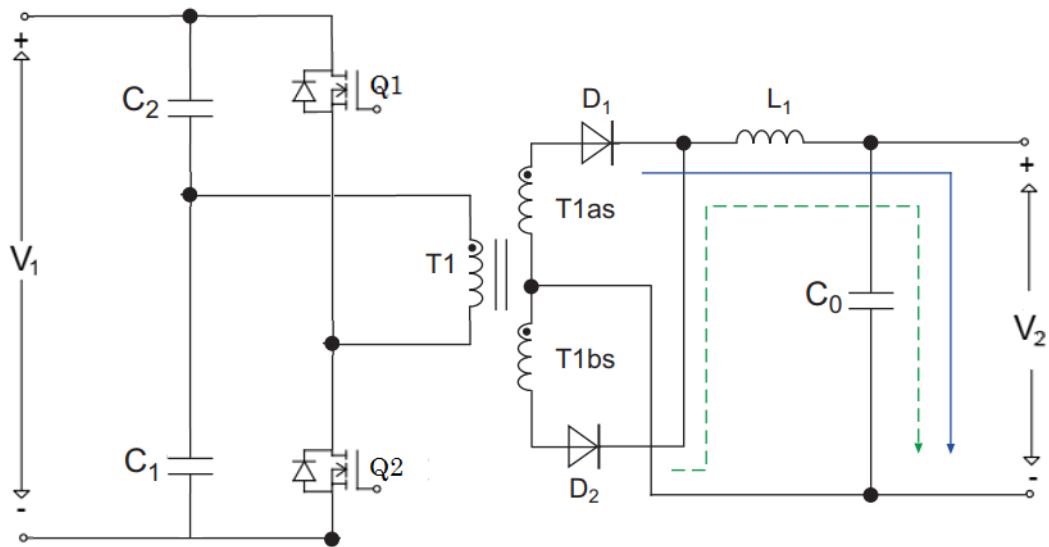
4.2.2.4 Meia-Ponte/ZVSC

O conversor CC/CC *Meia-Ponte* é similar ao conversor *Push-Pull*, entretanto, sua topologia não necessita da divisão do enrolamento no lado primário do transformador, ao invés disso, este conversor utiliza 2 chaves para direcionar a corrente no enrolamento primário. Sua topologia unidirecional é apresentada na Figura 31.

Em seu funcionamento, são utilizados dois capacitores $C1$ e $C2$, que são responsáveis por dividir em 2 a tensão de entrada $V1$ em um dos terminais do enrolamento primário e duas chaves $Q1$ e $Q2$ que são responsáveis por conectar a outra extremidade do enrolamento primário ao GND ou ao $V1+$, assim, como a tensão no enrolamento primário não supera $V1/2$, a taxa de transferência é reduzida pela metade se comparada à topologia *Push-Pull* [103].

Dentre as vantagens, este conversor apresenta alta eficiência e, consequentemente, é aplicado em processos que exigem alta potência. As desvantagens ficam por conta do alto valor de *ripple* nas correntes dos capacitores $C1$ e $C2$, que devem ser bem selecionados para não haver superaquecimento e, por último, o ciclo de trabalho é limitado em geralmente 45% para evitar que $Q1$ e $Q2$ estejam *ON* no mesmo instante durante o chaveamento [103].

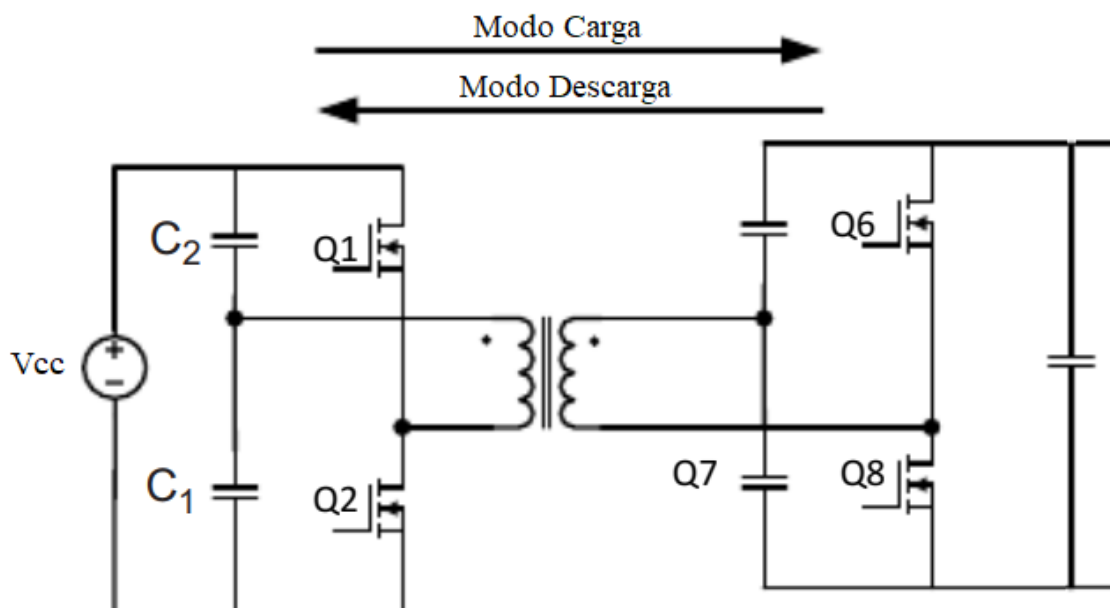
Figura 31 – Topologia do conversor unidirecional Meia-Ponte.



Fonte: Autor

Como nos outros conversores, sua topologia bidirecional pode ser obtida substituindo os diodos do lado secundário do transformador por chaves controladas. Esta estrutura bidirecional é também conhecida como conversor com chaveamento em zero de tensão (ZVSC - *Zero-Voltage Switching Converter*) [97] e pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 – Topologia do conversor bidirecional CC/CC Meia-Ponte.



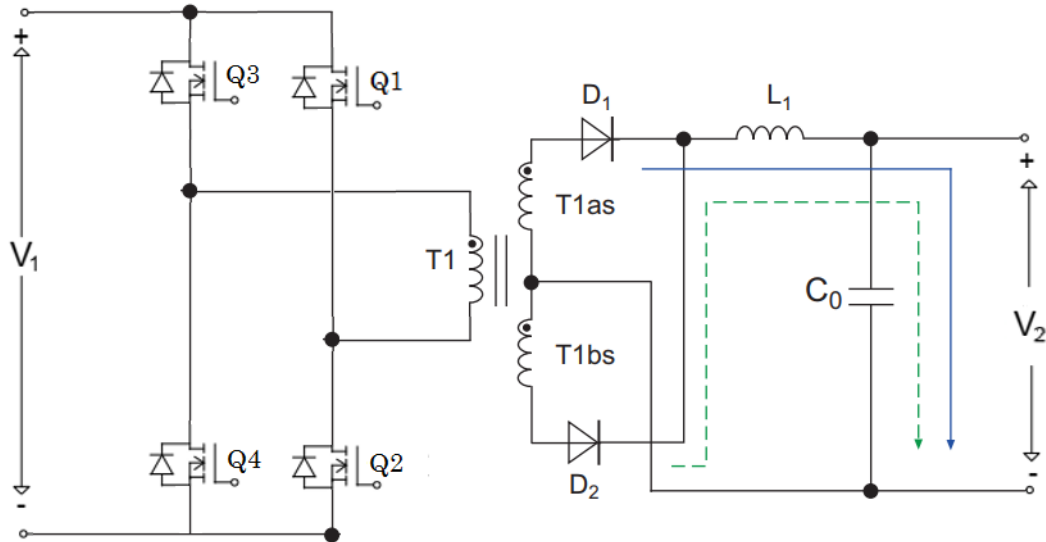
Fonte: Autor

4.2.2.5 Ponte-Completa

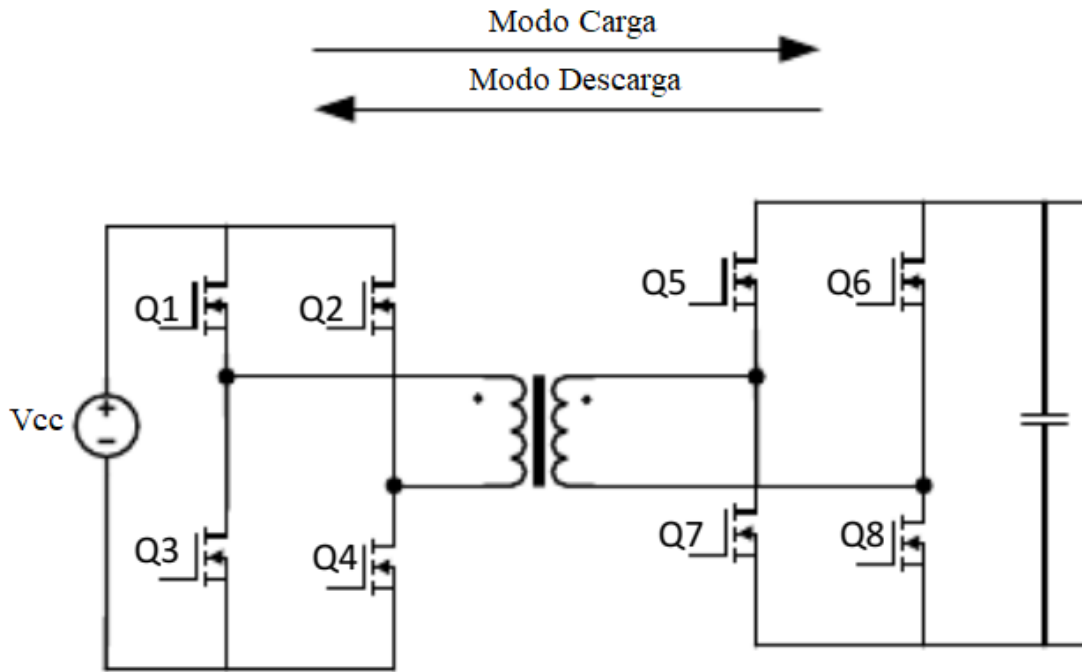
A topologia *Ponte-Completa* possui todas as vantagens da topologia *Meia-Ponte* e não possui nenhuma de suas desvantagens, entretanto, esta topologia necessita de duas chaves a mais e o circuito temporizador é mais complexo, fazendo com que esta topologia seja mais aplicada em circuitos que necessitem de potência mais alta e o custo dos componentes adicionais não seja significativo [103].

Ambas as topologias em *Ponte* sofrem menos estresse de tensão se comparado aos conversores *Flyback* e *Forward*, mas diferentemente do conversor *Meia-Ponte*, o conversor *Ponte-Completa* utiliza toda tensão do *link* CC [105]. As topologias unidirecional e bidirecional deste conversor são apresentadas respectivamente nas Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Topologia do conversor unidirecional *Ponte-Completa*.



Fonte: Autor

Figura 34 – Topologia do conversor bidirecional *Ponte-Completa*.

Fonte: Autor

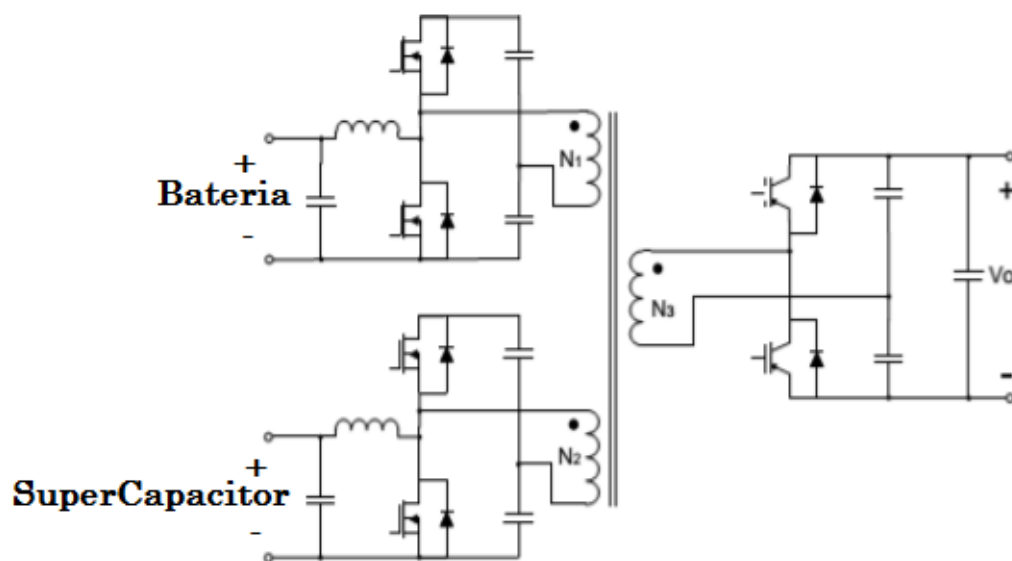
4.2.2.6 Multiporta

As topologias dos conversores CC *Multiporta* utilizam transformadores com múltiplos enrolamentos, de modo que é possível fazer a alimentação de diferentes dispositivos armazenadores de energia [106]. Esta topologia se baseia na utilização de conversores vistos nas seções anteriores, como exemplo, conversores *Ponte-Completa*.

A grande vantagem, é que as fontes de energia são totalmente isoladas umas das outras, assim, cada fonte de energia tem sua técnica de controle que garante uma alta performance do conversor e controle nos valores de *ripple* de tensões e correntes [97].

Um exemplo desta topologia pode ser visto na Figura 35, onde V_0 pode ser considerada, por exemplo, a tensão do link CC.

Figura 35 – Topologia bidirecional - conversor Multiport.



Fonte: Adaptado de [106]

5 Definição dos conversores utilizados no sistema de testes

5.1 Conversores

Considerando as características dos conversores CA/CC e CC/CC apresentados anteriormente, foi definido um sistema de testes para estudo de caso de um projeto de carregador rápido tipo 3 com 50 kW de potência, composto por um conversor CA/CC e um conversor CC/CC. Nas subseções seguintes são detalhadas as topologias escolhidas para cada estágio do carregador.

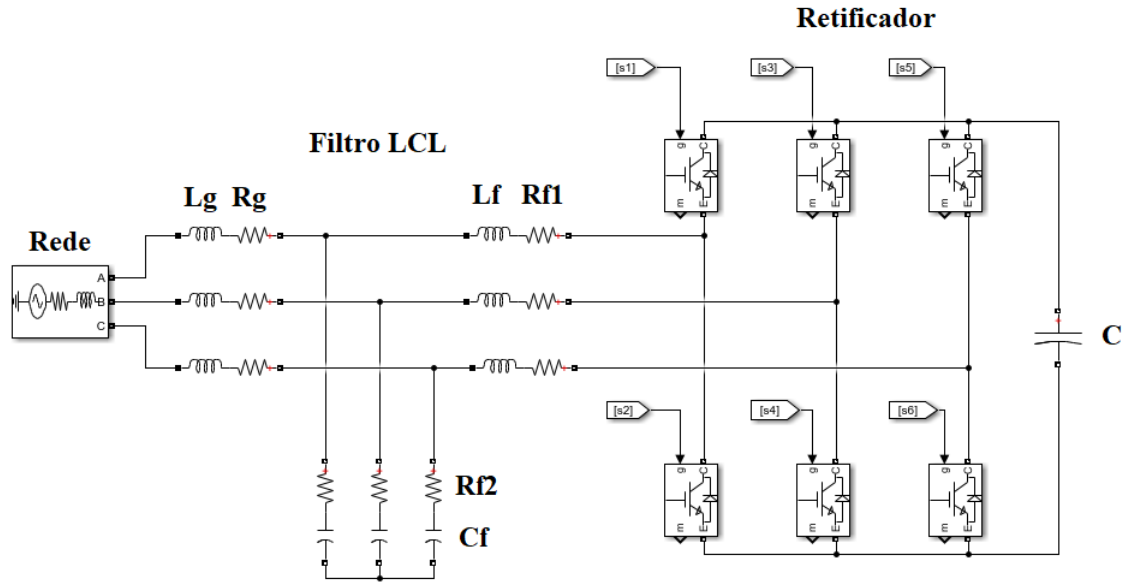
5.1.1 Conversor CA/CC

Para conversão CA/CC foi utilizado um retificador trifásico PWM de seis pulsos, também denominado de conversor *Ponte-Completa* sem retorno para o neutro. A escolha deste retificador se deu devido à tensão do *link* CC (até 500 Volts) e pela simplicidade do controle e menor número de componentes, se comparado por exemplo a um conversor NPC.

Este retificador é conectado à rede elétrica por meio de um filtro LCL, que é utilizado para atenuar as componentes harmônicas de alta frequência, oriundas do chaveamento do retificador. A Figura 36 apresenta a modelagem do retificador de 6 pulsos e filtro LCL conectados à rede.

Cabe destacar que o uso do filtro LCL se deve ao fato de que utilizar apenas o filtro L pode resultar em valores elevados de indutores em cada fase.

Figura 36 – Modelagem do conversor CA/CC e filtro LCL.



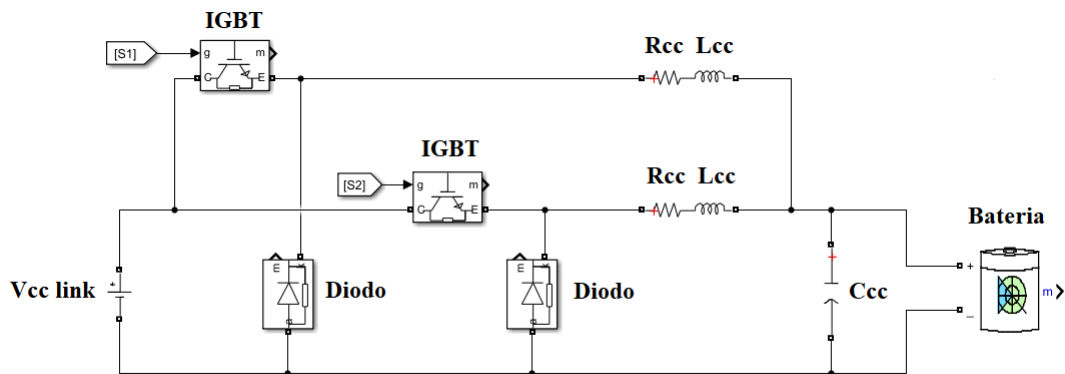
Fonte: Autor

5.1.2 Conversor CC/CC

Como o carregador de baterias foi idealizado para operar com potência de 50kW e tensão de 500V, resultaria em uma corrente de 100 Ampères no IGBT do conversor CC tipo *buck*. Isto representaria valores elevados de temperatura na junção do IGBT e demandaria dissipadores e ventiladores para evitar a queima dos mesmos.

Desta forma, optou-se por utilizar um conversor CC *inteleaved buck*, de modo que a corrente no IGBT foi reduzida pela metade. A saída deste conversor se conecta à bateria do veículo elétrico. A Figura 37 apresenta o esquemático do conversor CC/CC *Buck Intercalado* conectado à bateria.

Figura 37 – Modelagem do conversor interleaved CC/CC e bateria.



Fonte: Autor

5.2 Sistemas de controle

Nas subseções seguintes são apresentados os principais sistemas de controle utilizados na execução deste trabalho.

5.2.1 Controle do *link* CC

O esquema de controle adotado foi baseado no método SRF - *Synchronous Reference Frame Control* (Controle por Referência Síncrona), que também é conhecido como Controle *dq*.

Este esquema de controle utiliza a transformada do sistema *abc* para o sistema *dq*. Deste modo, a corrente e tensão da rede são transformados em um conjunto de referência que gira em sincronismo com a tensão da rede. Assim as variáveis de controle se tornam valores contínuos, facilitando o controle e a filtragem.

A estrutura de controle *dq* é normalmente associada a controladores proporcional-integral (PI), pois eles têm um bom comportamento quanto à regulação variáveis contínuas. Também são utilizadas técnicas de *voltage feedforward* (pré-alimentação de tensão) e de desacoplamento, para eliminar os efeitos do *cross-coupling terms* (acoplamento cruzado), melhorando assim a performance dos controladores PI.

Como a corrente controlada deve estar em fase com a tensão da rede, o ângulo de fase usado pela transformação $abc \rightarrow dq$ deve ser extraído das tensões da rede. Como solução, a técnica PLL - *Phase-Locked Loop* (Malha de Controle de Fase) foi utilizada.

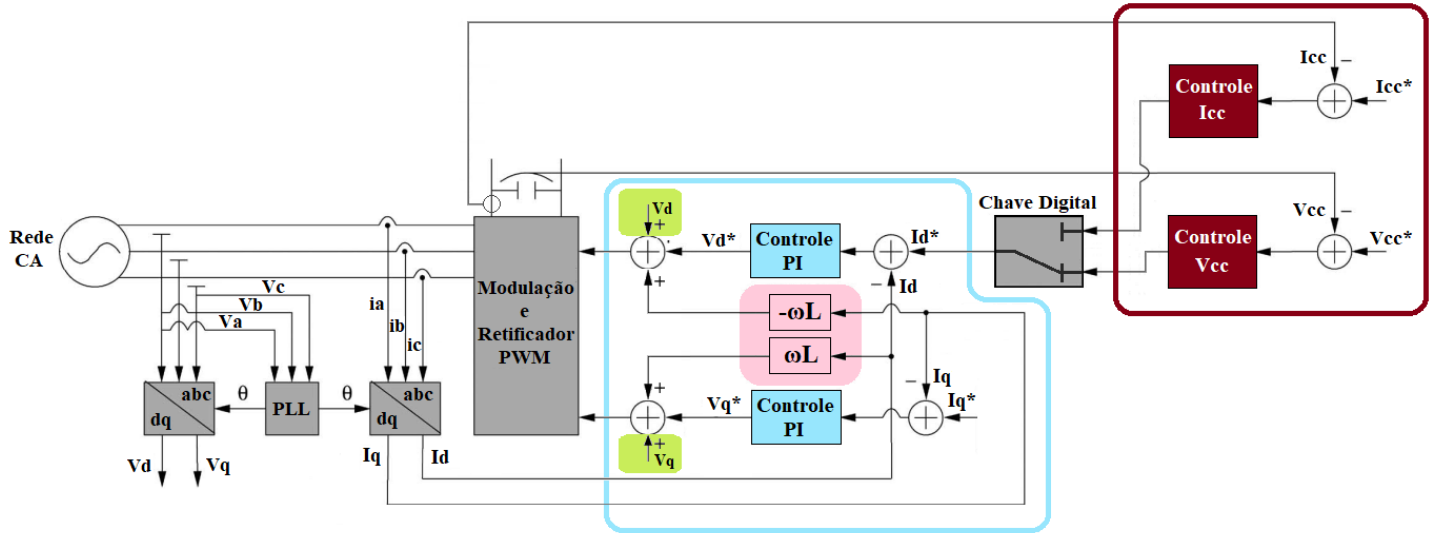
Um esquema do controle *dq* adaptado a este trabalho é representado na Figura 38. Nesta estrutura, a tensão do barramento CC ou a corrente CC são controladas de acordo com a potência de saída necessária. A saída deste controle é referência para o controlador de corrente ativa, ao passo que a referência para a corrente reativa é normalmente zerada. Caso a potência reativa necessite ser controlada, uma referência de potência reativa deve ser imposta ao sistema.

Na Figura 38, os blocos sombreados de rosa e verde representam respectivamente o desacoplamento e a realimentação de tensão (*voltage feedforward*). Já os blocos sombreados em azul e os demais blocos limitados pela linha azul representam a malha de controle mais interna. Por sua vez, os blocos dentro da borda vermelha representam a malha de controle mais externa.

Cabe destacar que a Figura 38 é aplicável somente ao conversor implementado em bancada, pois ele é composto apenas pelo estágio CA/CC. Assim, o controle de tensão e corrente é feito neste estágio. Para o sistema simulado, é necessário fazer apenas o controle de tensão do retificador CA/CC, já que o controle de tensão e corrente de carregamento é feito no estágio CC/CC. Assim, o sistema de controle para o retificador CA/CC da

simulação é apresentado na Figura 39.

Figura 38 – Diagrama de blocos do controle SRF - Prático.

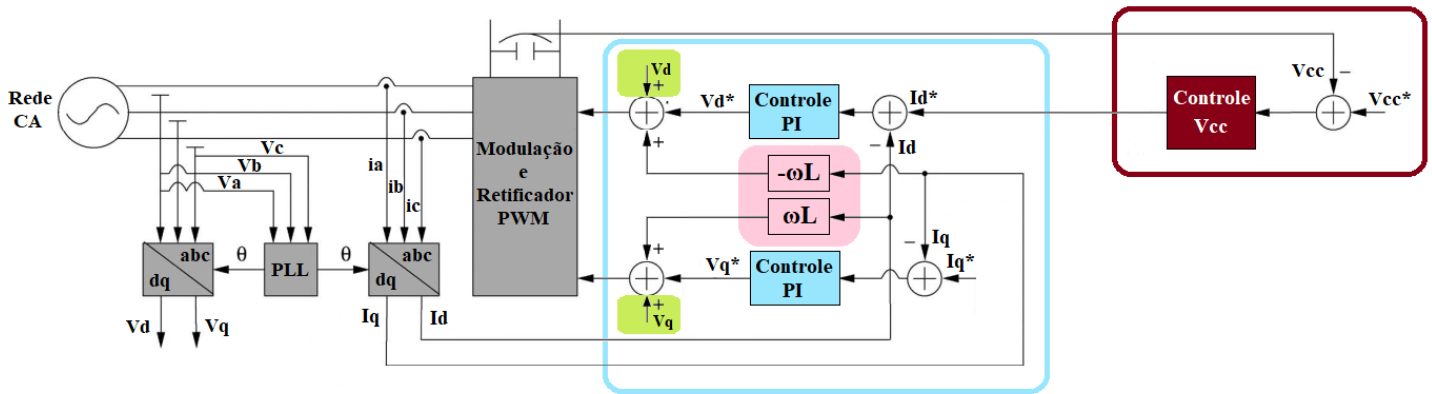


Fonte: Adaptado de [107]

Onde:

- V_d e I_d - Tensão e Corrente do eixo direto;
- V_q e I_q - Tensão e Corrente do eixo de quadratura;
- V_d^* e I_d^* - Tensão e Corrente de referência do eixo direto;
- V_q^* e I_q^* - Tensão e Corrente de referência do eixo de quadratura;
- V_{cc} e I_{cc} - Tensão e Corrente amostradas do ponto de acoplamento com a bateria;
- V_{cc}^* e I_{cc}^* - Tensão e Corrente de referência de carregamento da bateria;
- Chave Digital - Representa o referencial de Tensão na qual o controle é comutado entre o Controle I_{cc} e o Controle V_{cc} ;

Figura 39 – Diagrama de blocos do controle SRF - Simulação.



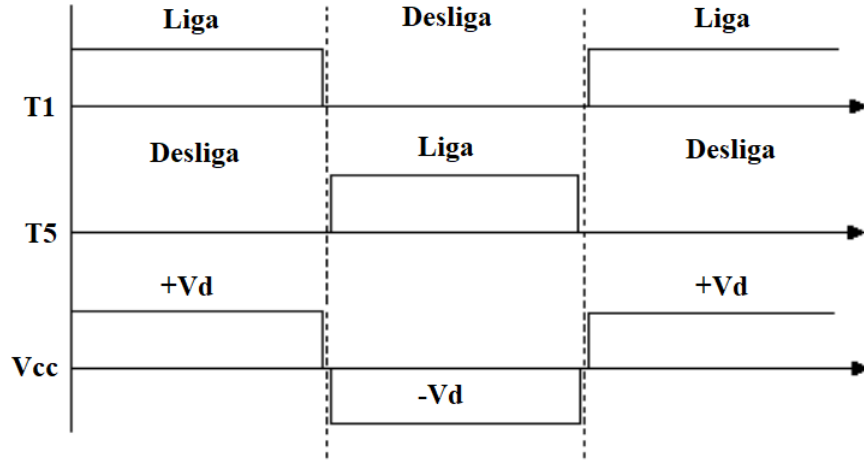
Fonte: Adaptado de [107]

Onde:

- V_d e I_d - Tensão e Corrente do eixo direto;
- V_q e I_q - Tensão e Corrente do eixo de quadratura;
- V_d^* e I_d^* - Tensão e Corrente de referência do eixo direto;
- V_q^* e I_q^* - Tensão e Corrente de referência do eixo de quadratura;
- V_{cc} - Tensão amostrada do ponto de acoplamento com a bateria;
- V_{cc}^* - Tensão de referência de carregamento da bateria;

5.2.2 Controle de harmônicos de baixa frequência

Durante o funcionamento do retificador PWM CA/CC (Fig. 14), as chaves de uma mesma fase, por exemplo T1 e T5, operam de modo complementar, ou seja se T1 está ligada, T5 precisa estar desligada e vice-versa. O acionamento simultâneo de T1 e T5 provoca curto circuito na fonte, portanto não deve ocorrer. Formas de onda típicas para uma fase são mostradas na Figura 40.

Figura 40 – Formas de onda de uma fase do retificador com *dead-time*.

Fonte: Autor

Note-se na Figura 40 um intervalo de tempo em que nem T1 nem T5 conduzem. Este tempo é o *dead-time* (tempo morto) e destina-se justamente a evitar curto-circuito da fonte por condução simultânea das chaves.

Este fenômeno leva ao aparecimento de harmônicas de baixa frequência na corrente CA, não visto na simulação, mas na implementação física do conversor ele está presente e precisa ser compensado.

As harmônicas de baixa frequência também podem aparecer na tensão da rede, na qual geralmente é visto o 5º harmônico. Consequentemente estes harmônicos aparecem na corrente da fonte e também devem ser compensados.

Para filtrar estas componentes harmônicas, foi utilizada a técnica presente em [108, 109] e que basicamente consiste em utilizar controladores Proporcional Ressonante (PR) dentro do sistema de referência $dq\theta$. A função de transferência do controlador PR pode ser vista na Equação 5.1.

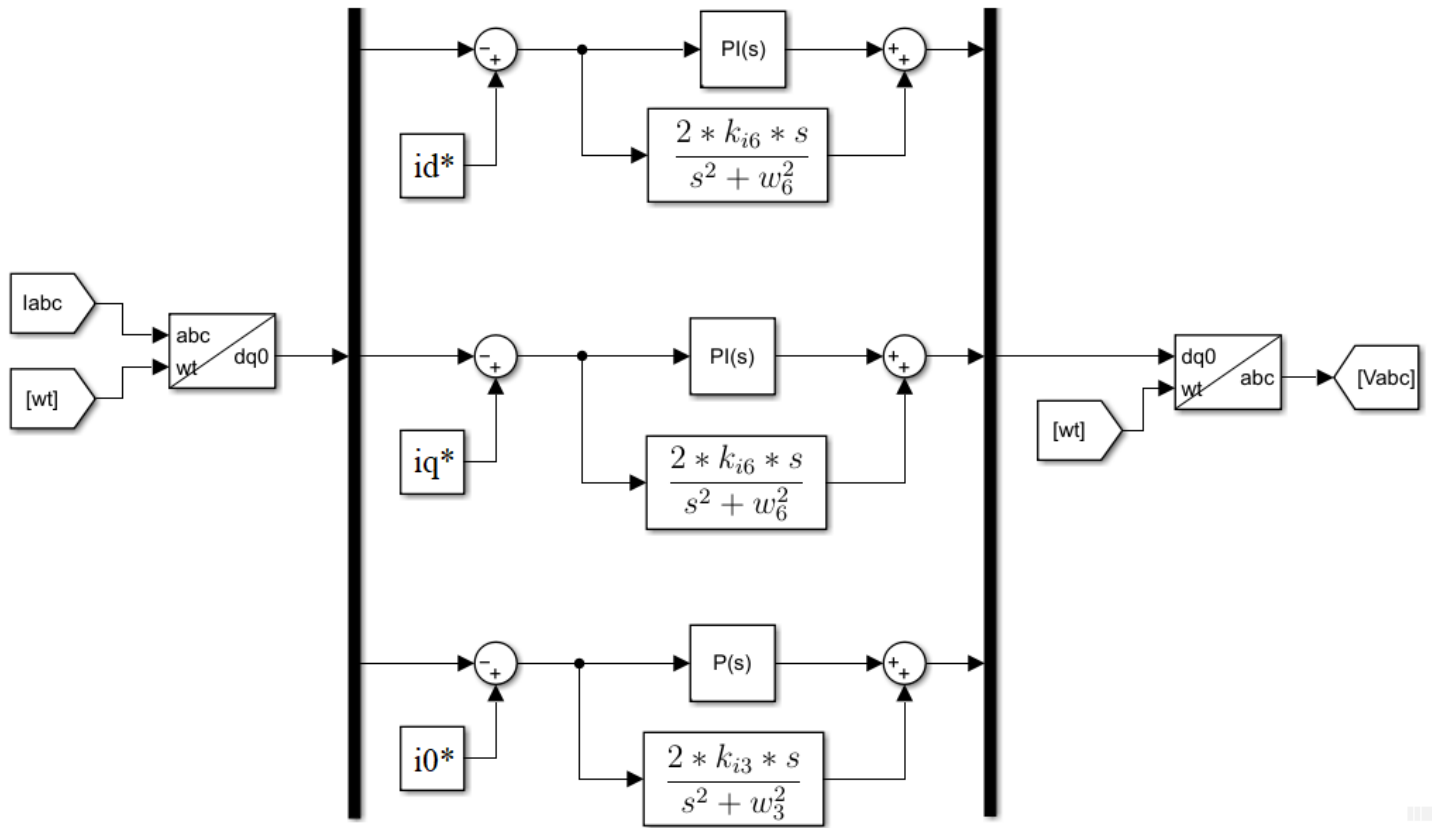
$$PR(s) = K_p + \frac{2 * k_i * s}{s^2 + w_0^2} \quad (5.1)$$

Onde k_p e k_i são os ganhos proporcional e integral e w_0 a frequência do harmônico que se deseja filtrar em rad/s com referência no sistema $dq\theta$, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Ordem dos harmônicos para retificadores trifásicos.

Ordem dos Harmônicos no sistema abc	Sequência	Ordem dos Harmônicos no sistema $dq0$	Alocação do controlador no sistema $dq0$
1	Positiva	0	dq
3	Zero	3	0
5	Negativa	6	dq
7	Positiva	6	dq
9	Zero	9	0
11	Negativa	12	dq
13	Positiva	12	dq
15	Zero	15	0
17	Negativa	18	dq
19	Positiva	18	dq

A Figura 41 exemplifica a compensação dos harmônicos de ordem 3, 5 e 7 do sistema abc , por meio da inserção de controladores PR no sistema $dq0$, com frequência de harmônicos 3 e 6, conforme Tabela 9.

Figura 41 – Filtro de harmônicos no sistema $dq0$.

Fonte: Autor

6 Simulações/Resultados

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos através de simulações e experimentos realizados durante este trabalho.

6.1 Simulações

6.1.1 Conversor CA/CC

Para simulação do retificador PWM de seis pulsos e filtro LCL, foram considerados os dados presentes nas tabelas 10 e 11, respectivamente. O diagrama de blocos da simulação deste estágio se encontra na Figura 42.

Tabela 10 – Parâmetros do Retificador CA.

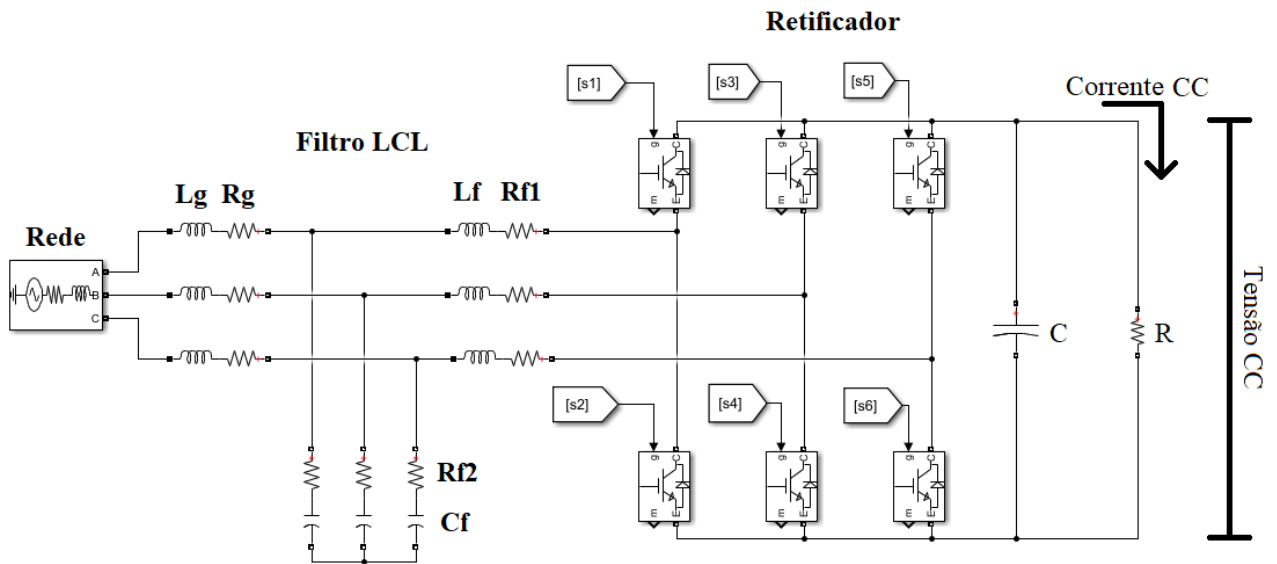
Potência Nominal	50 [kW]
Frequência Nominal	60 [Hz]
Tensão CA Nominal	220 [V - FF]
Tensão CC Nominal	500 [V]
Corrente CC Nominal	100 [A]
Frequência PWM	10 [kHz]
C	10 [mF]
R	5 [Ω]
L_{Rede}	0,500 [nH]
R_{Rede}	0,100 [Ω]

Os componentes do filtro: L_g , L_f , C_f e R_{f2} (resistor de amortecimento - *damping*) foram calculados baseando-se no procedimento visto em [110].

Tabela 11 – Parâmetros do filtro LCL.

L_g	273,356 [μ H]
R_g	1 [$m\Omega$]
L_f	1,815 [mH]
R_{f1}	1 [$m\Omega$]
C_f	16,441 [μ F]
R_{f2}	1,267 [Ω]

Figura 42 – Diagrama de blocos do retificador CA e filtro LCL.



Fonte: Autor

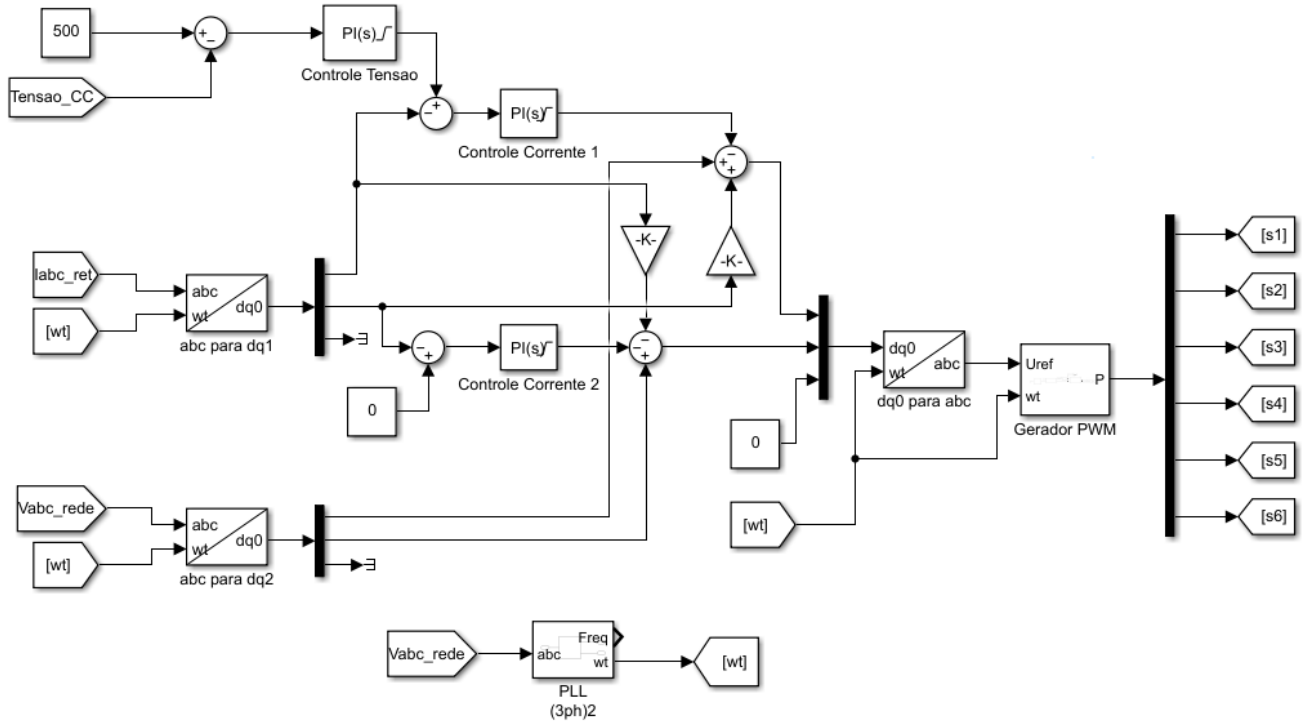
Após realizar a simulação do diagrama de blocos do retificador CA e filtro LCL, foi realizada a implementação do sistema de controle para este retificador. O diagrama é apresentado na Figura 43.

Conforme pode ser observado no diagrama deste controle (Figura 43), o PI de controle de tensão recebe a referência do *link* CC e compara com um valor de referência. A referência de saída deste controle é enviada para o controle de corrente do eixo d, que tem atuação mais rápida.

Caso seja necessário controlar o reativo, deve ser enviada uma referência para o PI de corrente do eixo q. A saída final deste controle é uma referência de tensão para o gerador de pulsos PWM.

O valor dos ganhos referentes aos controladores PI e PR foram obtidos empiricamente, observando-se valores usualmente adotados na literatura. Estes ganhos posteriormente foram testados via simulação e refinados durante a programação do DSP.

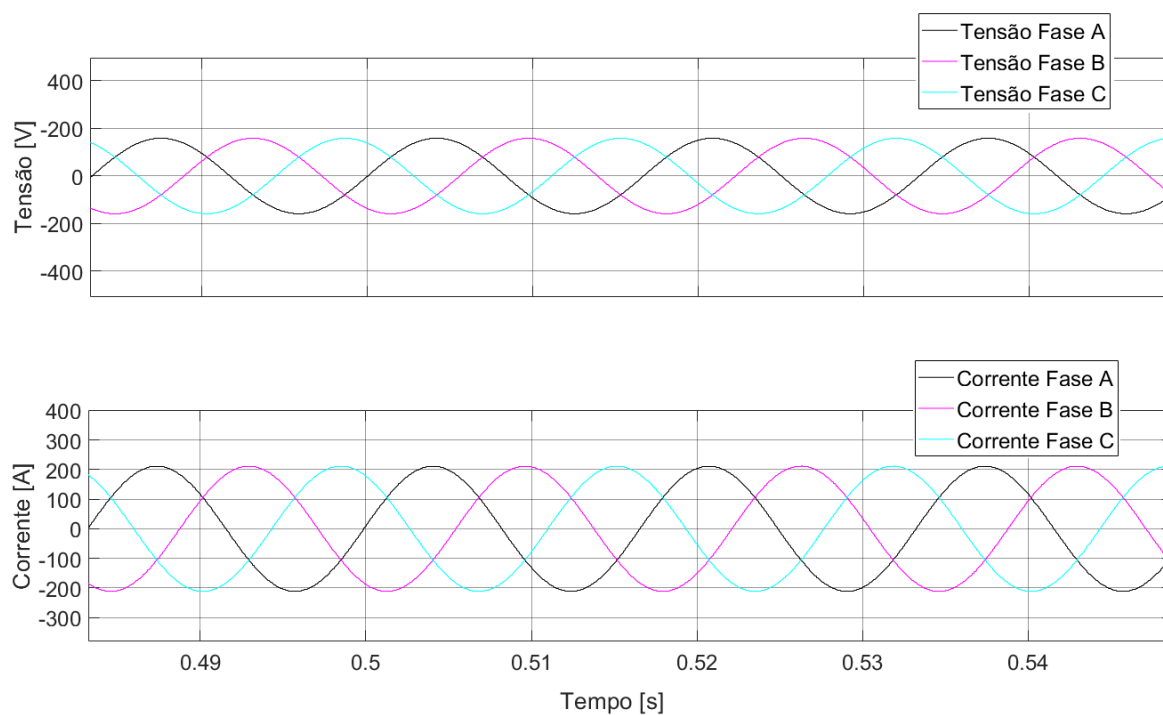
Figura 43 – Diagrama de blocos do controle do retificador CA.



Fonte: Autor

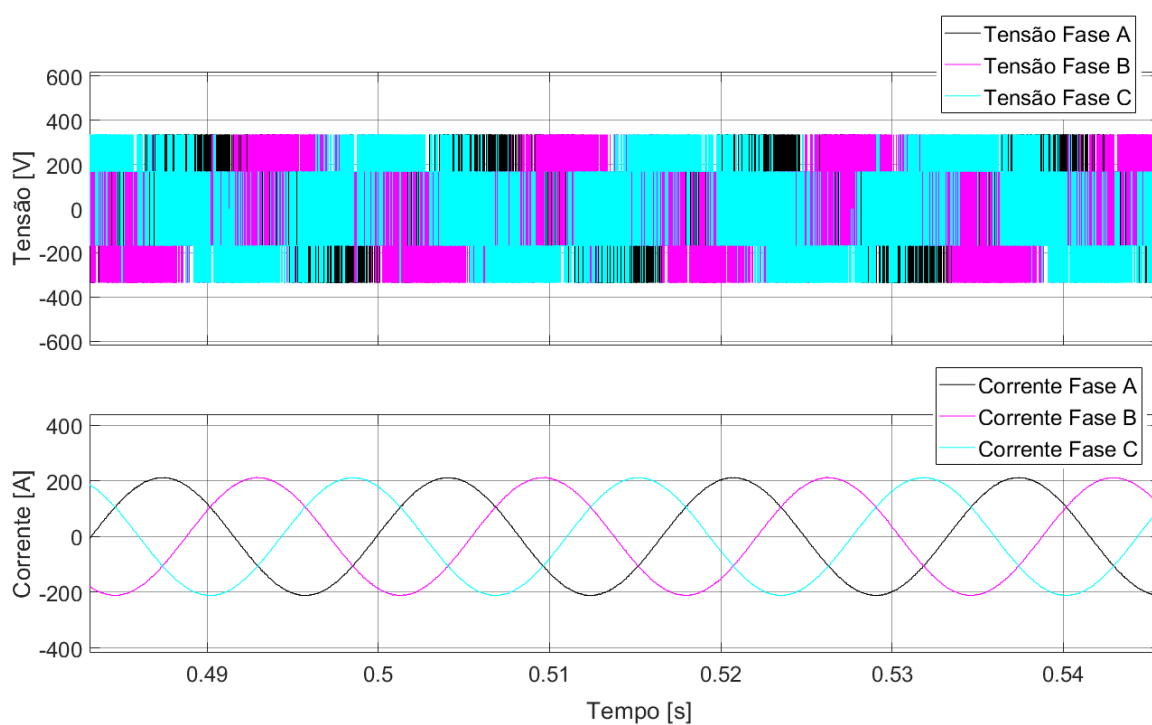
As Figuras (44, 45 e 46) a seguir representam respectivamente a tensão filtrada e corrente da rede, a tensão alternada com harmônicos de alta frequência e corrente e, finalmente, a tensão e corrente CC na saída do retificador ativo. As medidas de tensão CA são fase-terra.

Figura 44 – Formas de onda de tensão e corrente CA entre a rede e o filtro.



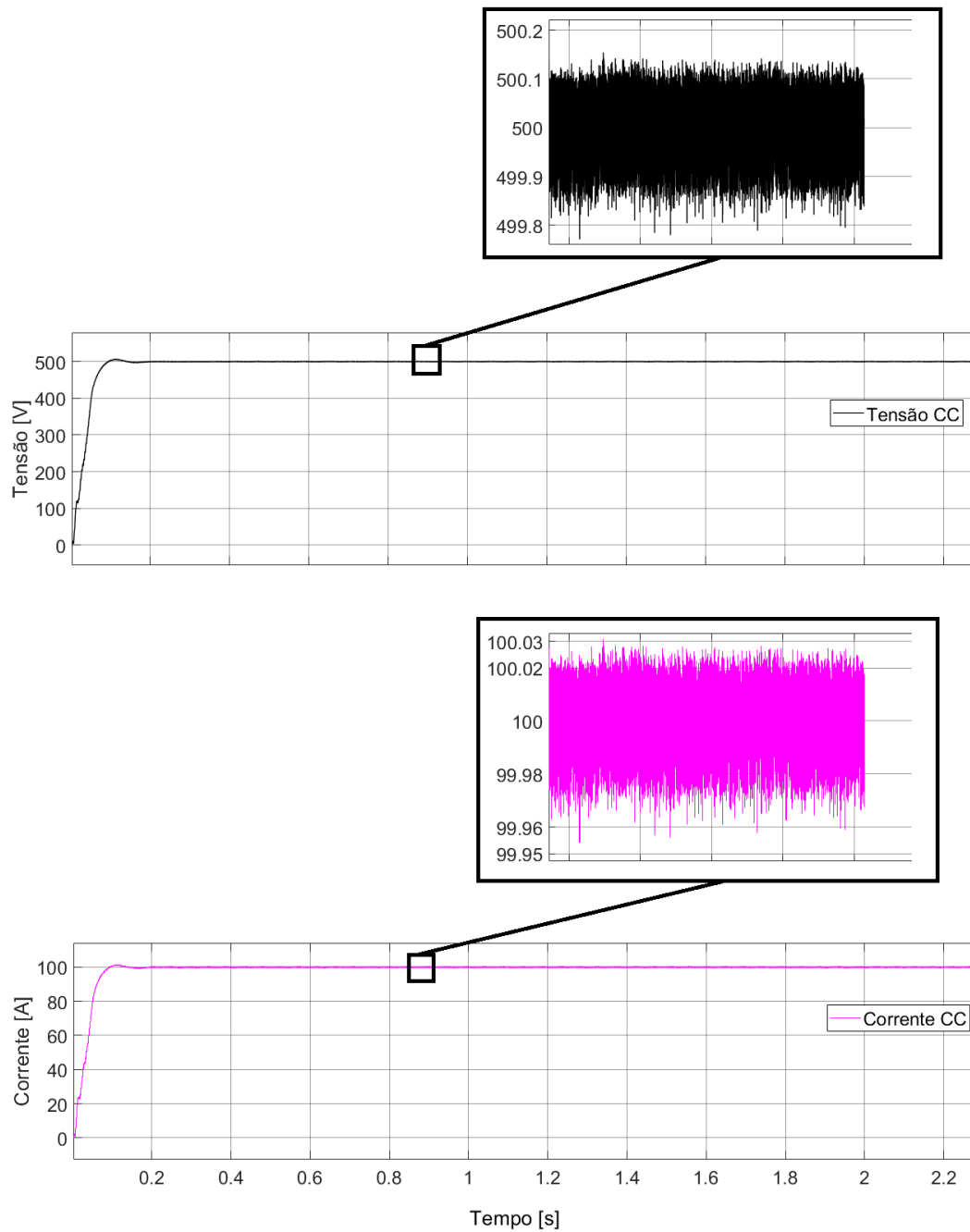
Fonte: Autor

Figura 45 – Formas de onda de tensão e corrente CA entre o filtro e o conversor.



Fonte: Autor

Figura 46 – Formas de onda de tensão e corrente CC.



Fonte: Autor

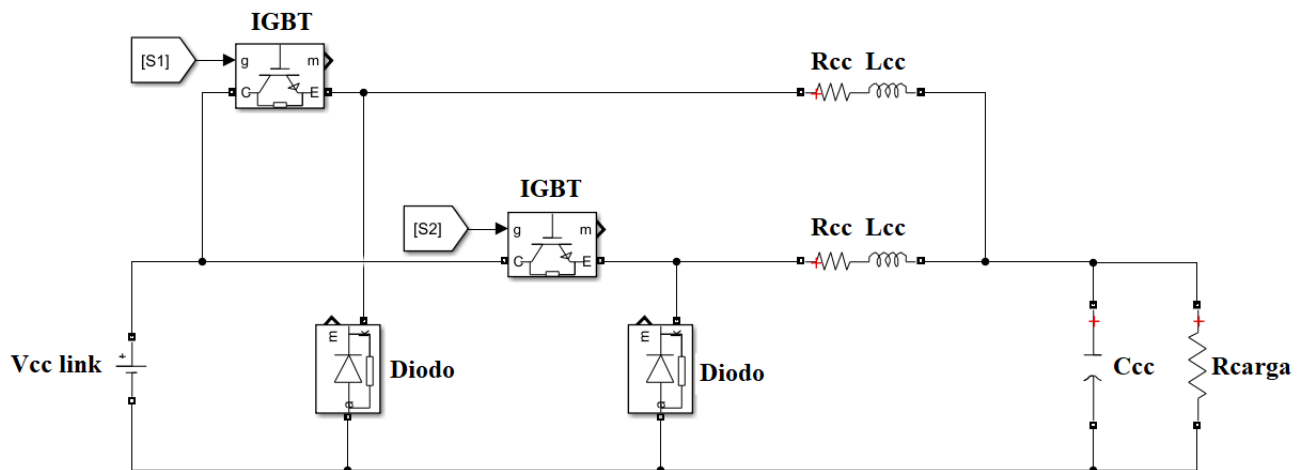
6.1.2 Conversor CC/CC

Para simulação do conversor CC/CC, foram considerados os dados presentes na Tabela 12. Os valores de L_{cc} e C_{cc} foram obtidos baseando-se em [111]. O diagrama de blocos da simulação deste estágio se encontra na Figura 48.

Tabela 12 – Parâmetros do conversor CC/CC.

Potência Nominal	50 [kW]
Corrente Nominal	100 [A]
V_{cc} link	500 [V]
Frequência PWM	10 [kHz]
R_{cc}	100 [m Ω]
L_{cc}	2,500 [mH]
C_{cc}	3,130 [μ F]
R_{carga}	1,800 [Ω]

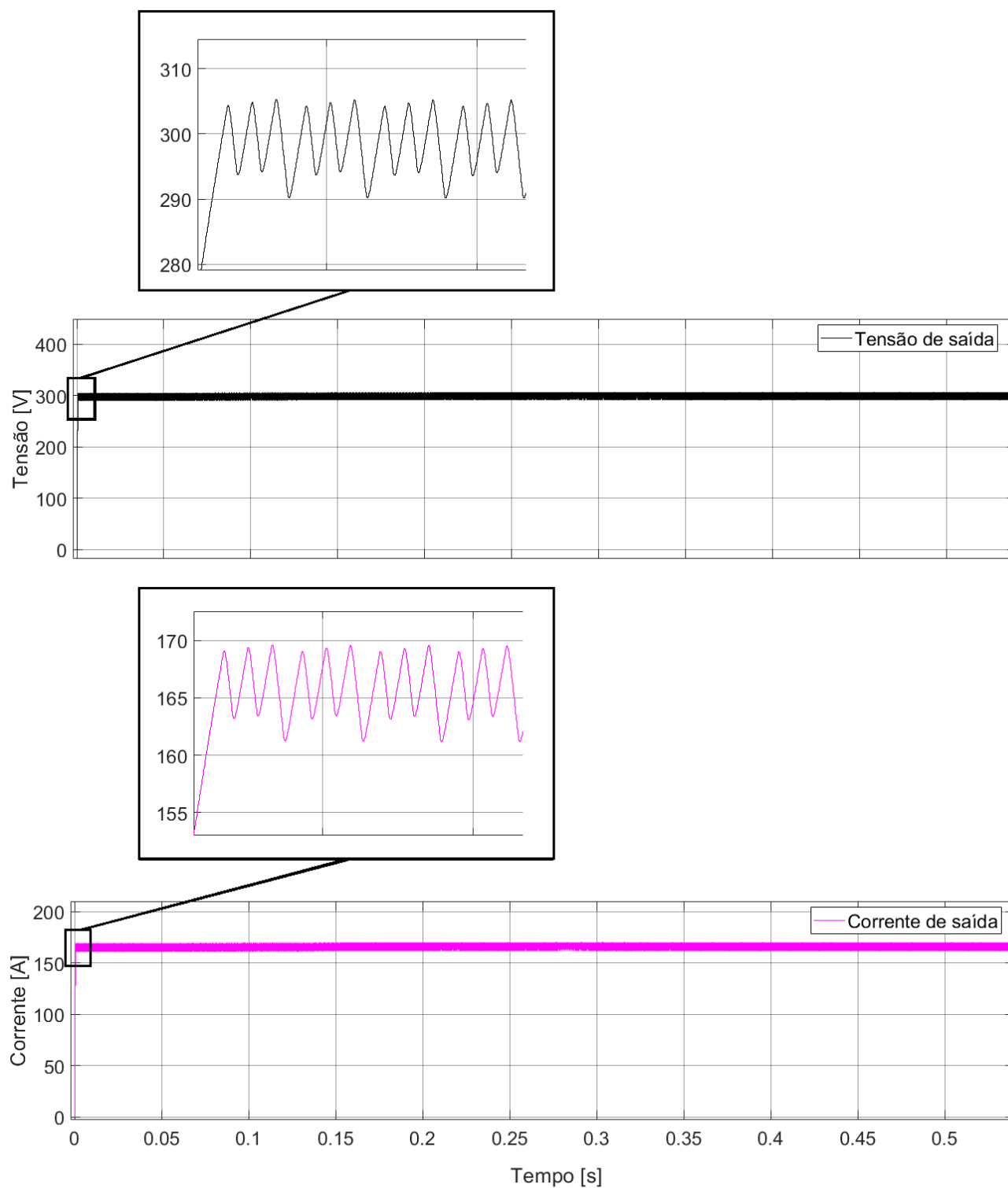
Figura 47 – Diagrama de blocos do conversor CC/CC.



Fonte: Autor

O controle do conversor CC/CC é mais simples se comparado ao conversor CA/CC, pois as variáveis já são contínuas. Desta forma, basta utilizar um controlador PI e fazer a comparação entre o valor amostrado de tensão ou corrente e o valor de referência. A Figura 48 apresenta as formas de onda de tensão e corrente na saída deste conversor.

Figura 48 – Formas de onda de saída de tensão e corrente do conversor CC/CC.



Fonte: Autor

Como visto na Figura 46, o conversor CA/CC possui valores de *ripple* de tensão e corrente bem baixos, o que é bom, pois entrega tensões e correntes com menos ruído na entrada do conversor CC/CC e, consequentemente, menor *ripple* nas formas de onda de

tensão e corrente de saída do conversor CC/CC.

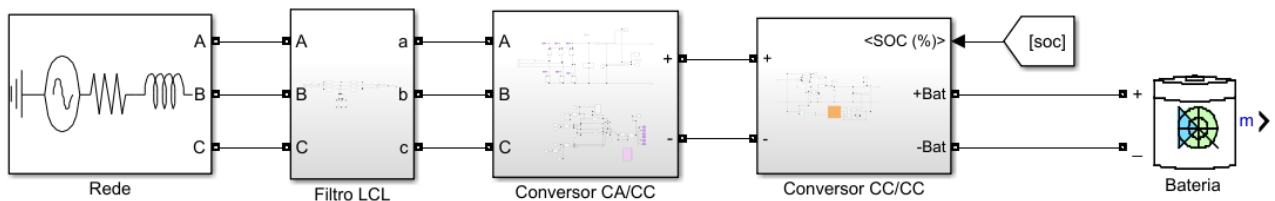
Para o conversor CC/CC, quem determina os valores limites de *ripple* é o tipo de bateria ao qual será feito o carregamento. Conforme visto na Figura 48, o valor de pico a pico de *ripple* para tensão e corrente é respectivamente 15 [V] e 7 [A]. Para baterias de Chumbo-Ácido por exemplo, o valor RMS limite de *ripple* de corrente para maximizar a vida útil da bateria deve ser menor que 0,1 vezes a capacidade de carga (Ah) da bateria [112]. Para uma bateria de 20 [Ah], o valor RMS de *ripple* de corrente é 2 [A] RMS.

6.1.3 Carregador de baterias - estágios CA/CC e CC/CC

Após realizar os testes nos conversores separadamente, os mesmos foram interligados e acoplados à bateria, resultando no sistema que pode ser visto no diagrama apresentado na Figura 49.

Vale destacar que a utilização do estágio CC/CC se deve ao fato de que a menor tensão de saída que pode ser obtida pelo retificador CA/CC é limitada pelo valor de pico da tensão de entrada (220 [V FF]). Assim, o menor valor de tensão de saída do retificador CA/CC seria próximo de 400 [V CC]. O estágio CC/CC permite, então, que baterias com valores nominais de carga menores que 400[V] possam ser carregadas.

Figura 49 – Diagrama de blocos do carregador de baterias.



Fonte: Autor

Como a simulação envolvendo baterias é um processo que demanda muito tempo de simulação e poder computacional, os parâmetros da bateria foram selecionados de maneira que o processo de carga fosse mais facilmente visualizado. Assim, para efeitos de simulação foi considerada uma tensão de carga que seria maior que a tensão nominal de carga e um tempo de resposta da bateria menor do que é visto efetivamente na prática. Os parâmetros da bateria são apresentados na Tabela 13.

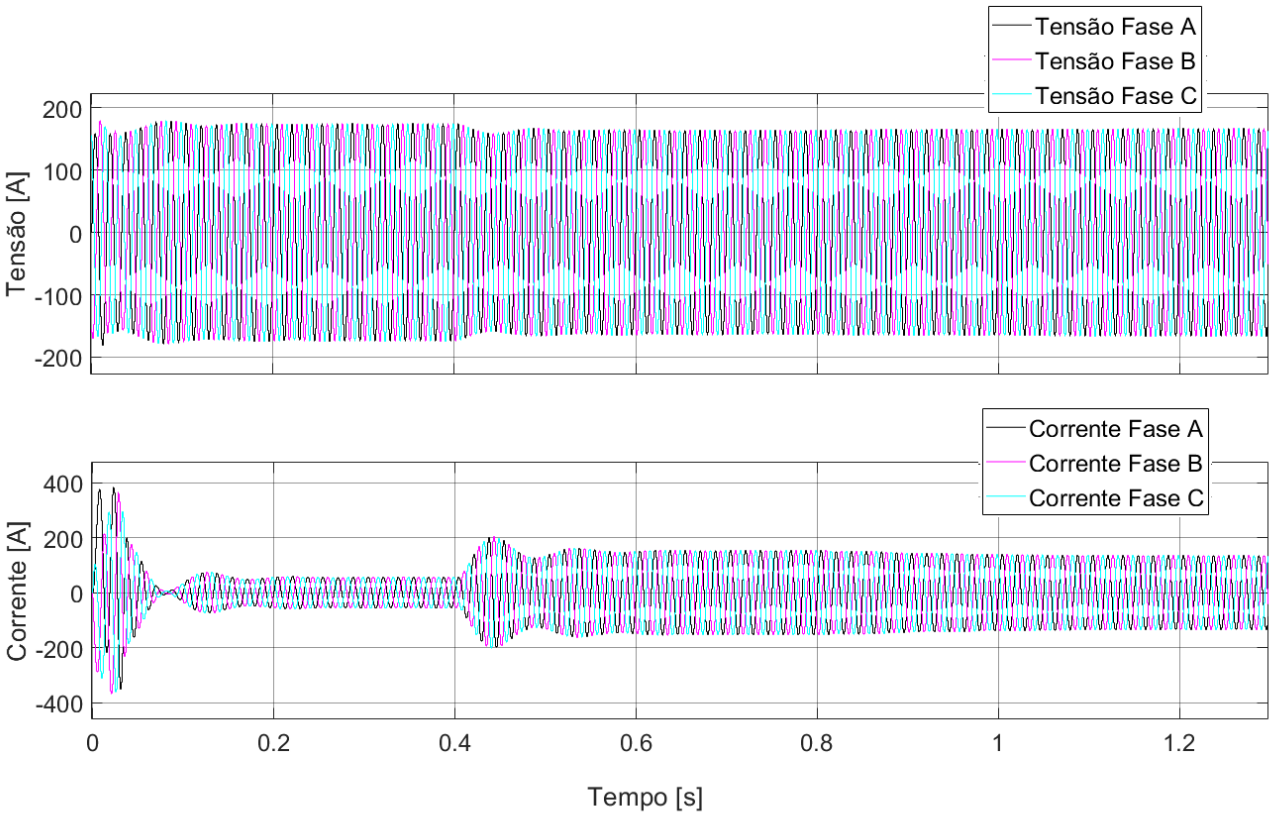
As Figuras a seguir apresentam os resultados do processo de carregamento, sendo que a Figura 50 mostra a tensão e a corrente na rede, a Figura 51 mostra respectivamente a tensão no *link* CC (ponto de acoplamento entre os conversores) e o estado de carga da bateria. Já a Figura 52 mostra a tensão e a corrente na bateria.

Tabela 13 – Parâmetros da bateria.

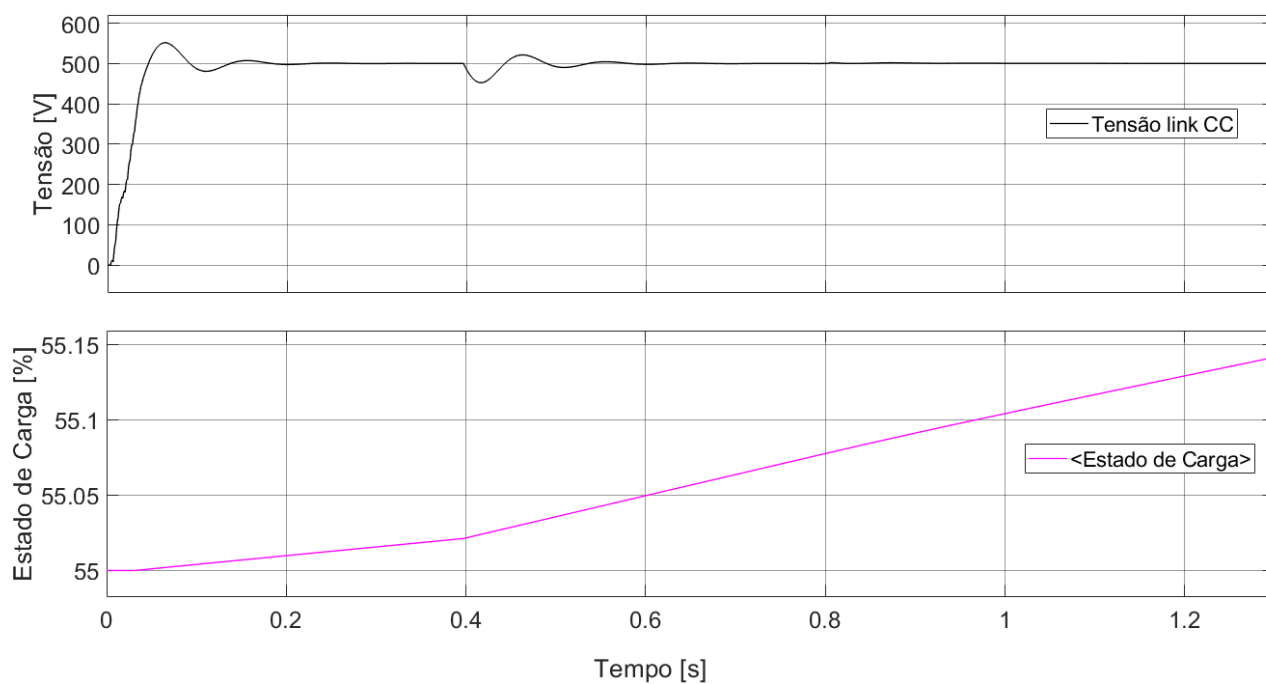
Tensão Nominal	315 [V]
Tensão Carga Completa	368 [V]
Capacidade Nominal	20 [Ah]
Estado de Carga Inicial	55 [%]
Tempo de Resposta da Bateria	1 [s]

O processo de carregamento inicia-se no modo de corrente constante e 40 [A]. Em 0,4 segundos a corrente é elevada para 100 [A]. Já em 0,8 segundos, o carregamento é alterado de corrente contante para tensão constante e mantido em 367 [V].

Figura 50 – Formas de onda da tensão e corrente na rede.

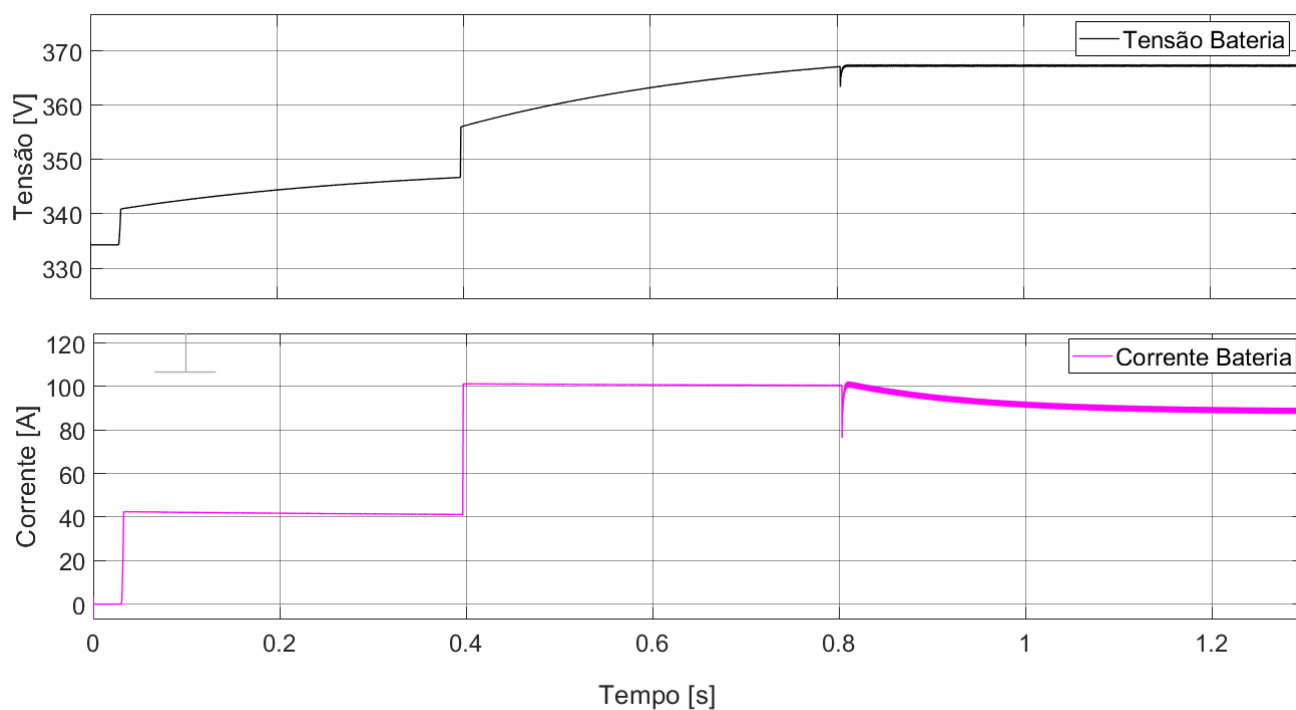


Fonte: Autor

Figura 51 – Formas de onda da tensão no *link* CC e estado de carga da bateria.

Fonte: Autor

Figura 52 – Formas de onda da tensão e corrente na bateria.



Fonte: Autor

Cabe destacar que a variação na corrente de 40 [A] para 100 [A] na Figura 52 é

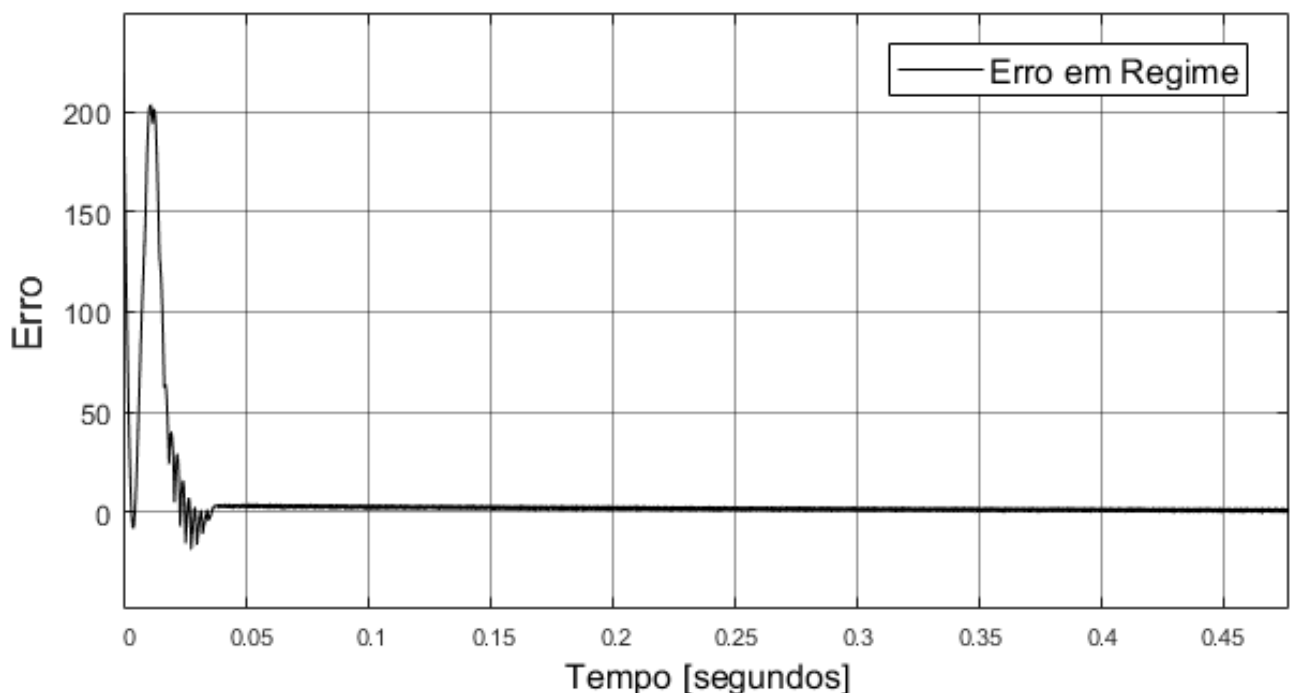
apenas para demonstrar o comportamento do sistema durante a variação da corrente. De modo geral, este valor de corrente é constante, até que ocorra a mudança de referência do controle para o método de tensão constante.

Como resultado deste teste na variação da corrente, pode-se perceber uma boa estabilidade do sistema de controle, o que pode ser observado nas formas de onda de tensão e corrente presentes nas Figuras 50 e 51.

Finalmente, foram avaliados o erro em regime (Figura 53). Para avaliar o erro foi feita a diferença entre o sinal da saída do PI do “Controle Tensão” e a realimentação na entrada do PI “Controle Corrente 1” da Figura 43. Como pode ser observado na Figura 53, o erro tende a zero com o passar do tempo, indicando que a referência de tensão está sendo seguida.

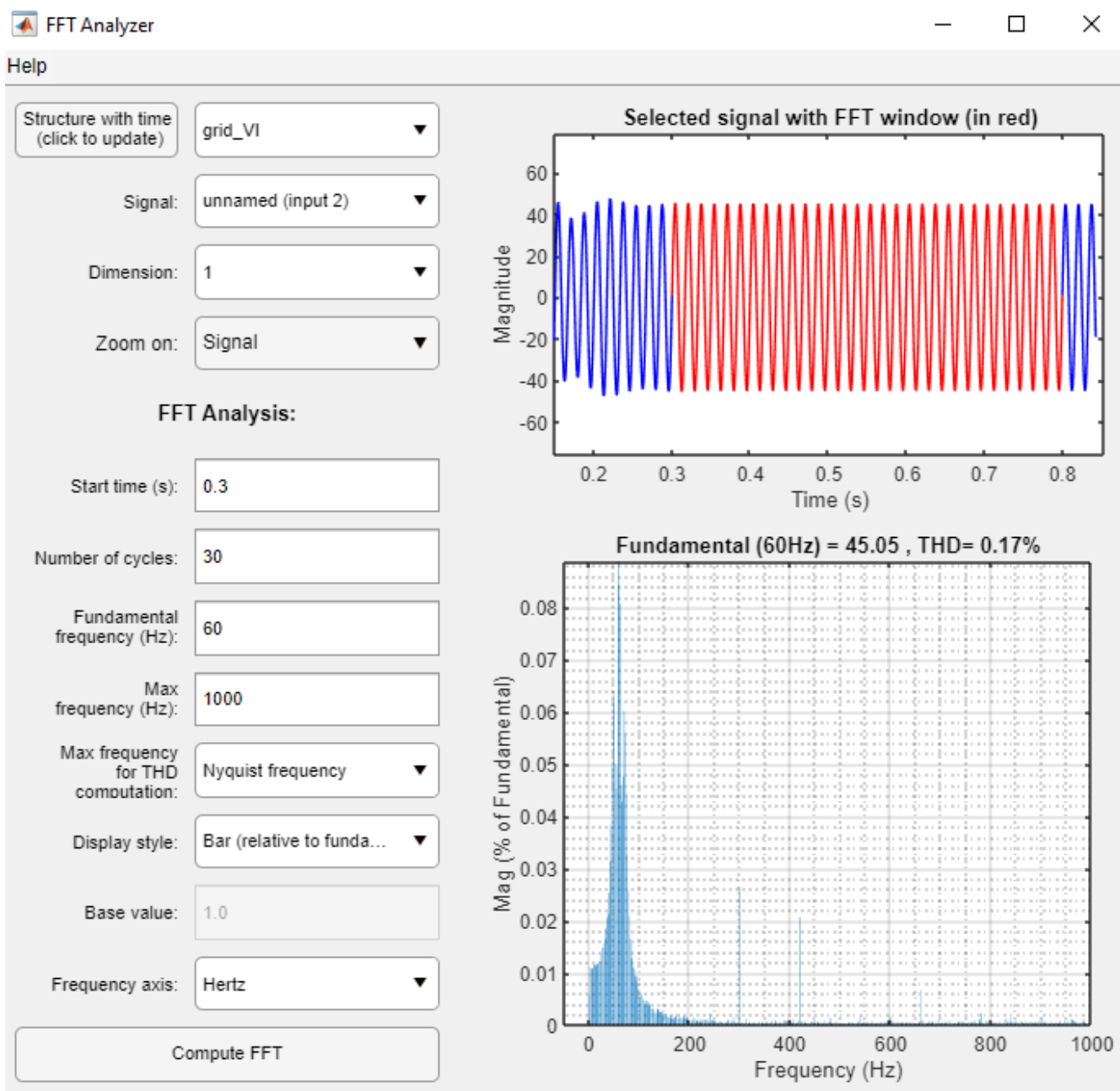
Finalmente, foi avaliada a Distorção Harmônica Total (THD - *Total Harmonic Distortion*) da corrente e da tensão na fonte, conforme Figuras 54 e 55, respectivamente. Pode ser observado que o sistema simulado praticamente não possui distorção harmônica na tensão e a corrente possui distorção harmônica de 0,17 [%].

Figura 53 – Erro em regime.



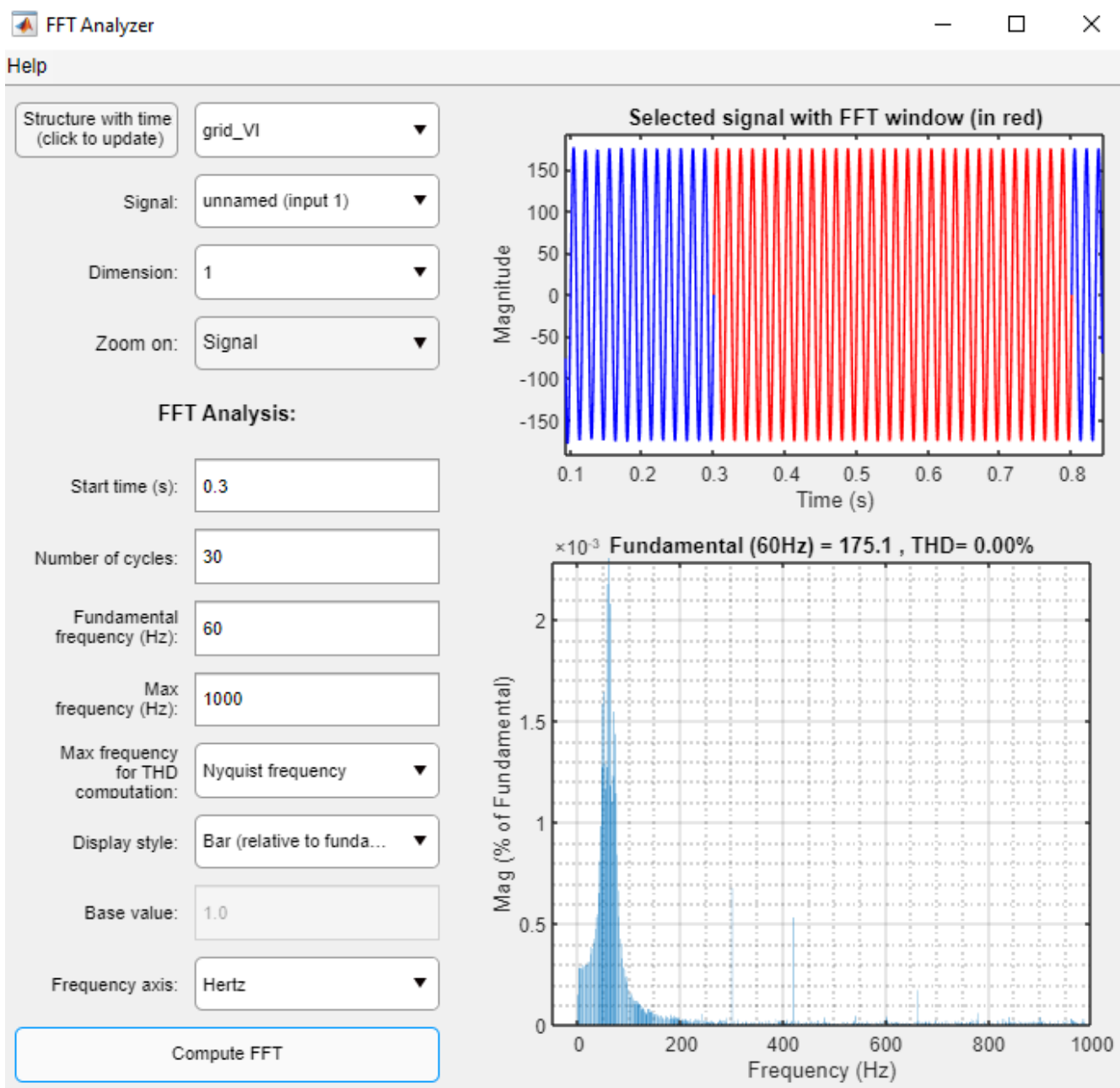
Fonte: Autor

Figura 54 – THD - Corrente.



Fonte: Autor

Figura 55 – THD - Tensão.



Fonte: Autor

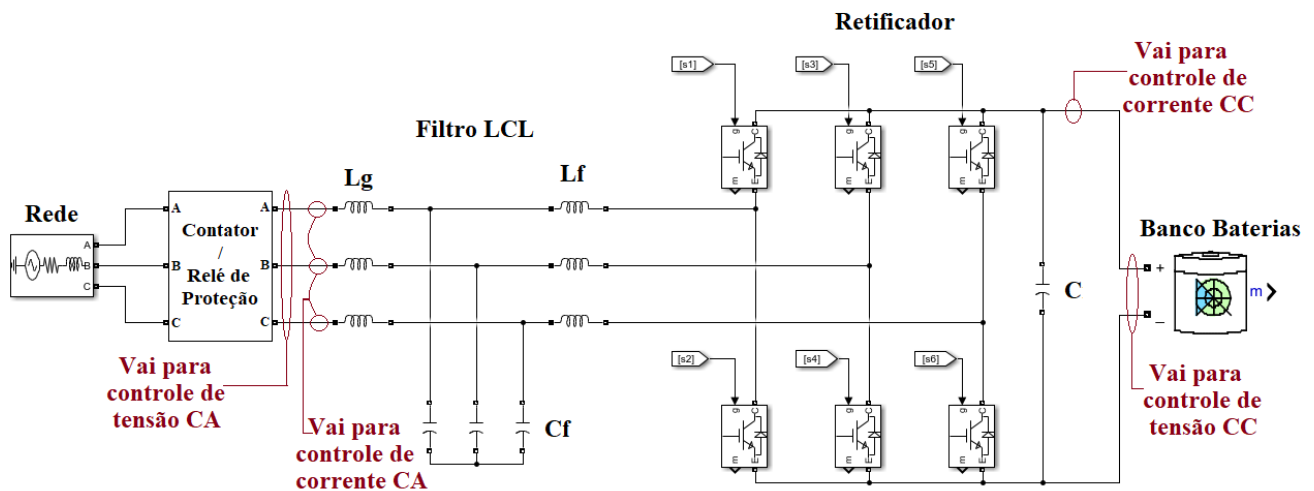
6.2 Resultados Práticos

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio da montagem física do sistema de carregamento de baterias. Por questões de segurança, os testes práticos realizados em laboratório foram feitos em modelo reduzido, com corrente limitada à 15 [A] do lado CC. O diagrama de blocos do sistema montado em laboratório se encontra na Figura 56.

Conforme dito anteriormente, a implementação prática do conversor foi limitada ao lado CA/CC por uma questão de componentes disponíveis para teste. Todavia, vale ressaltar que o estágio CC/CC nesta aplicação é responsável por apenas reduzir a tensão disponível no *link* CC (ponto de acoplamento entre os conversores CA/CC e CC/CC), de modo a permitir o carregamento de baterias com valor nominal de tensão menor que o disponível no *link*.

Portanto, ao abordar apenas o lado CA/CC, dimensionou-se o banco de baterias para ser compatível com a tensão disponível no *link*.

Figura 56 – Diagrama de blocos do sistema real.



Fonte: Autor

6.2.1 Componentes e equipamentos utilizados

Para a construção do carregador de baterias, foram utilizados os seguintes equipamentos principais:

- 1 - DSP TMDSCNCD28379D da *Texas Instruments* - Figura 57;
- 1 - Placa de condicionamento de sinais - Figura 58;

- 1 - Retificador trifásico com IGBTs da *SEMIKRON* - Figura 59;
- 1 - Filtro LCL - Figura 60;
- 36 - Baterias *NEWMAX* - Figura 61;

As tabelas 14, 15, 16, 17 e 18 a seguir apresentam respectivamente os dados de Placa do DSP, da placa de Condicionamento, do Retificador trifásico, Filtro LCL e Baterias NEWMAX, respectivamente. Maiores informações sobre a placa de condicionamento são disponibilizadas na seção de Anexos.

Tabela 14 – Parâmetros do DSP.

Marca	Texas Instrument
Modelo	TMDSCNCD28379D
CPU	2x C28x, 2x CLA
Frequência	200 [MHz]
RAM	204 [kByte]
Memória Flash	1024 [kByte]
Resolução ADC	12/16 [Bits]
Velocidade Processamento	800 [MIPS]
Canais PWM	24 [canais]
Canais ADC	12/24 [canais]

Tabela 15 – Parâmetros da Placa de Condicionamento.

Entrada para DSP	1 - HSEC180
Entradas Tensão CA	6 com condicionamento
Entradas Tensão CC	3 com condicionamento
Entradas Corrente CC e CA	6 para sensor integrado (TMCS1100) ou 6 para sensor Hall externo
Entradas Digitais	12
Saídas Digitais	24
Saídas PWM	12
Saída Comunicação RS232	1
Saída Comunicação CAN	1

A placa de condicionamento recebe os sinais de tensão (3 entradas) e corrente (3 entradas) CA da rede elétrica e os sinais de tensão (1 entrada) e corrente CC (1 entrada) do *link* do banco de baterias. Estes sinais são enviados ao DSP e, após processamento, são enviados ao retificados por meio de saídas PWM (3 saídas). Também são utilizadas saídas digitais para acionar relés de proteção do circuito (4 saídas).

Os relés de proteção são responsáveis por acionar contadores dotados de fusíveis e disjuntores, que estão conectados nas fases ABC de entrada do circuito. Esta proteção atua por exemplo caso o sincronismo do PLL seja perdido, caso tente injetar corrente no link CC e o link esteja aberto, atua caso sejam inseridos ganhos incorretos no retificador, etc.

Tabela 16 – Parâmetros do Retificador CA.

Potência Nominal	6 [kW]
Frequência Nominal	60 [Hz]
Tensão CA Nominal	220 [V - FF]
Tensão CC Nominal	432 [V]
Corrente CC Nominal	15 [A]
Frequência PWM	15 [kHz]
Frequência Interrupção	20 [kHz]
C	4,7 [mF]
Marca IGBT/Driver	SEMIKRON
Modelo IGBT	SKM 75 GB 124D
Modelo Driver	SKH1 22A

Tabela 17 – Parâmetros do filtro LCL.

L_g	792 [μ H]
L_f	1,2 [mH]
C_f	8,2 [μ F]

Tabela 18 – Parâmetros da Bateria.

Marca Baterias	NEWMAX
Modelo Baterias	FNC12700-C
Tensão CC Nominal	12 [V]
Corrente CC Nominal	70 [Ah]
Resistência Interna	6 [mΩ]

Também foi considerado um banco de baterias composto por 36 baterias NEWMAX. Os dados nominais do banco são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros do Banco de Baterias.

Marca Baterias	NEWMAX
Modelo Baterias	FNC12700-C
Quantidade de Baterias	36
Ligação	Série
Tensão CC Nominal	432 [V]
Corrente CC Nominal	70 [Ah]
Tensão CC de Flutuação	486 a 497 [V]
Tensão CC de Referência de Carregamento	473 [V]

As tabelas 20 e 21 apresentam, respectivamente, os parâmetros utilizados no controle de carga e descarga das baterias (conforme Figura 38) e no controle de harmônicos (PR - conforme Figura 41).

Tabela 20 – Parâmetros do controle de carga e descarga das baterias.

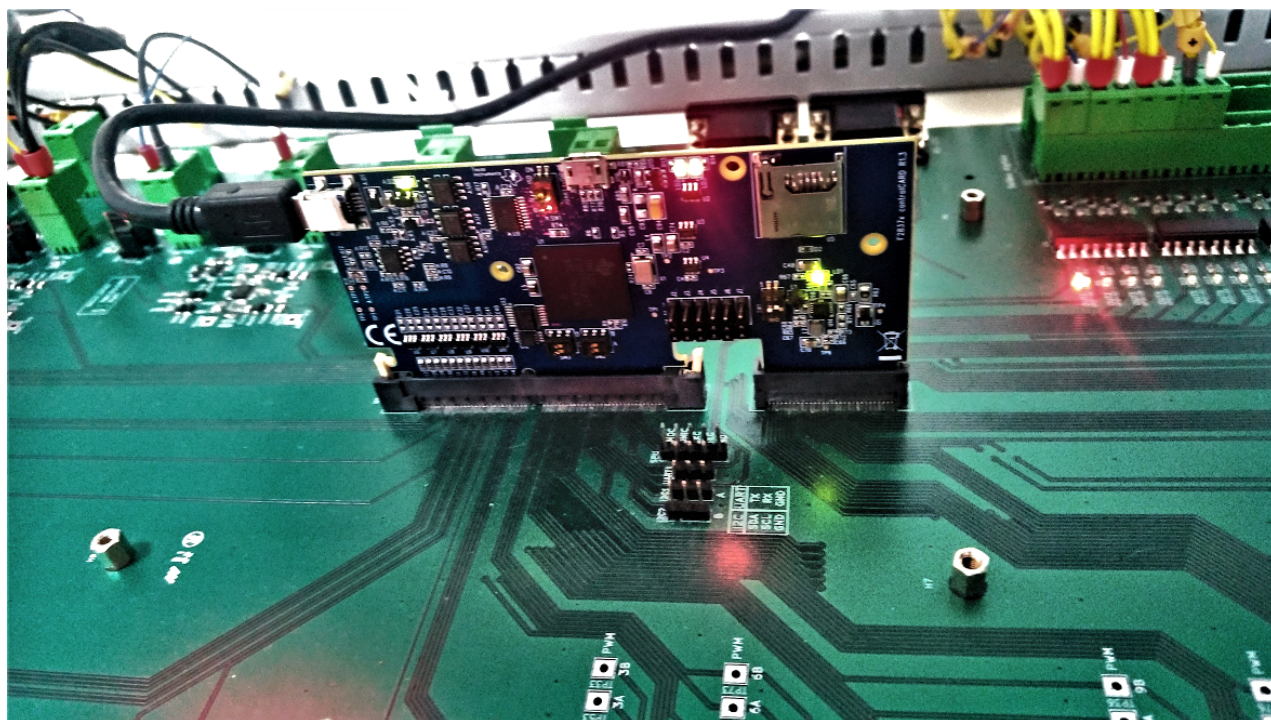
K_{p_d} - Controle PI	12
K_{i_d} - Controle PI	15
K_{p_q} - Controle PI	3
K_{i_q} - Controle PI	10
K_p - Controle Icc	0,5
K_i - Controle Icc	1,5
K_p - Controle Vcc	-0,7
K_i - Controle Vcc	3
ωL	0,75

O parâmetro ωL pode ser calculado desprezando-se o capacitor C_f , resultando em ωL igual a $\omega(L_g + L_f)$, conforme pode ser visto em [113].

Tabela 21 – Parâmetros do controle de harmônicos - PR.

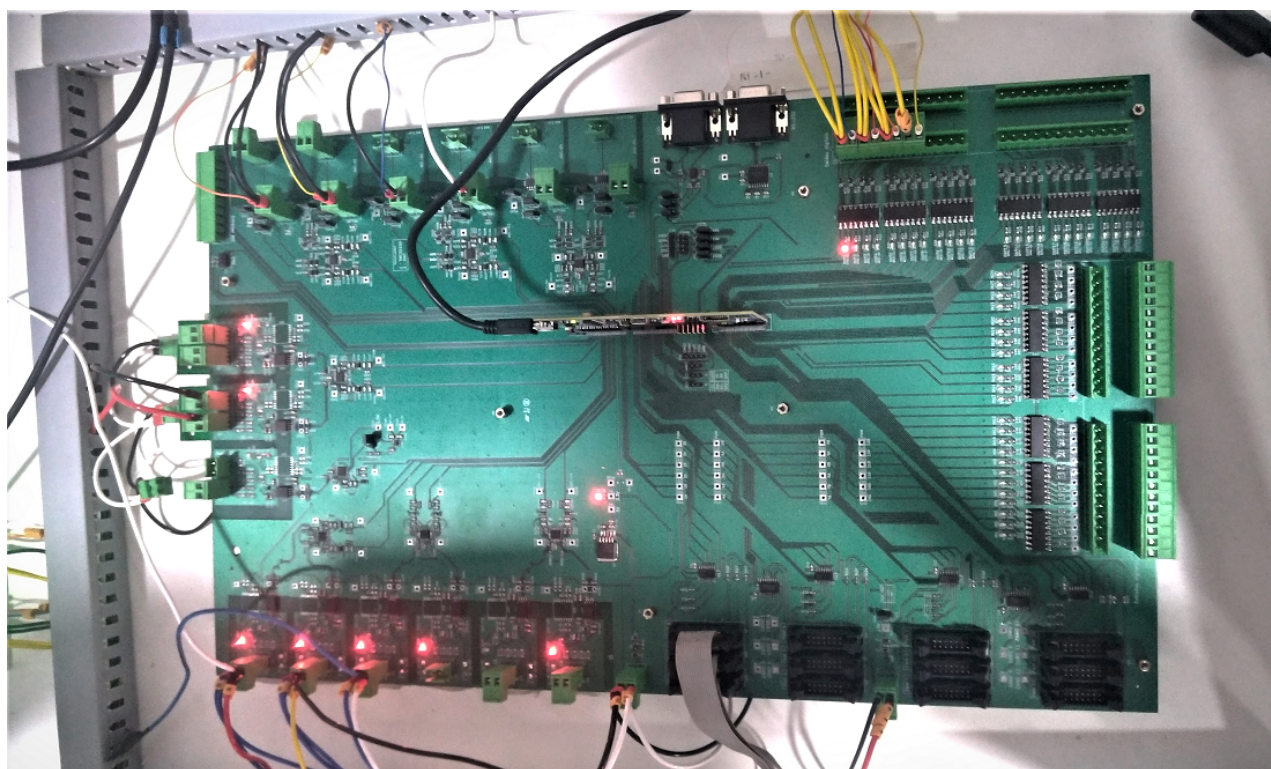
K_{i3}	10000
ω_3	1131 [rad/s]
K_{i6}	2300
ω_6	2262 [rad/s]

Figura 57 – Detalhe do DSP TMDSCNCD28379D na placa de condicionamento.



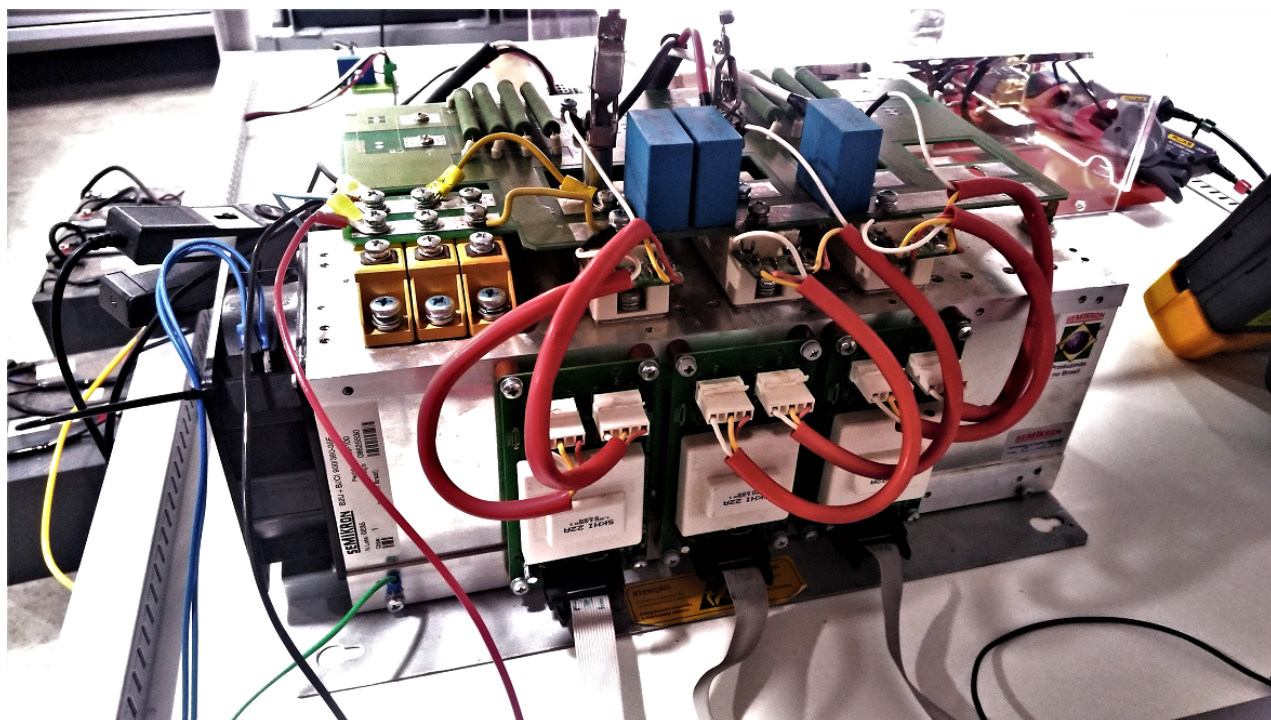
Fonte: Autor

Figura 58 – Placa de condicionamento.



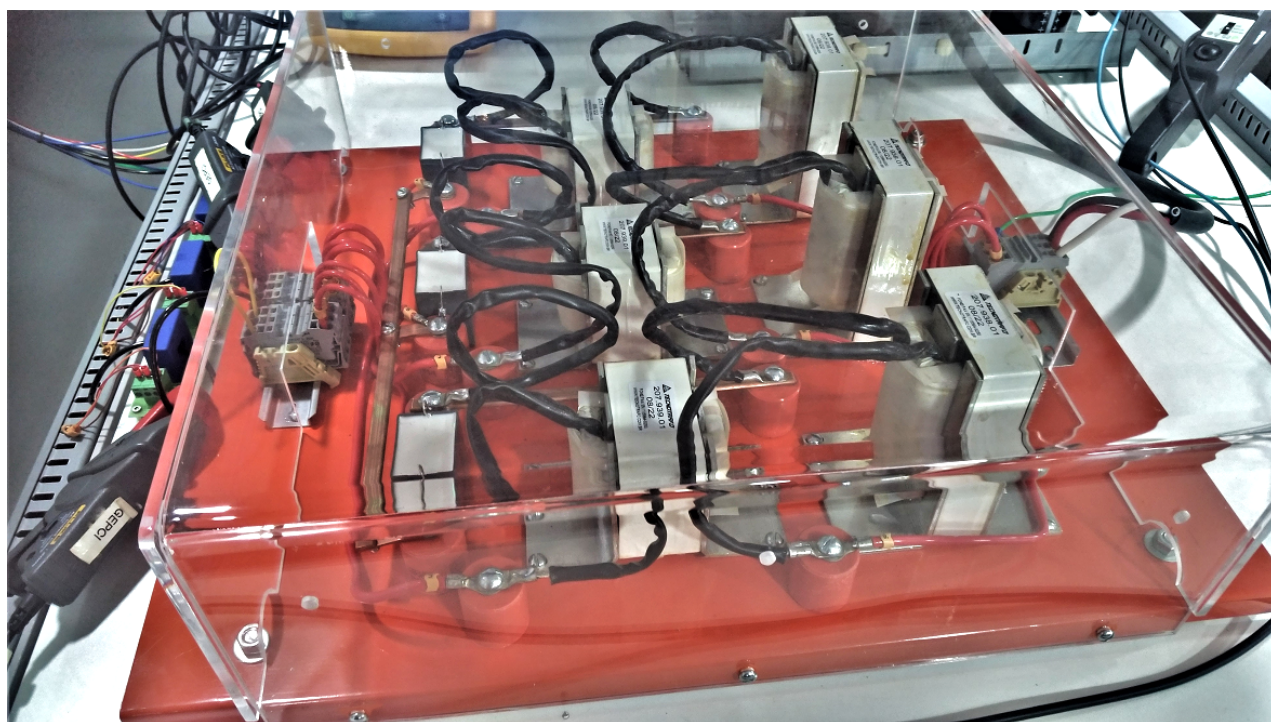
Fonte: Autor

Figura 59 – Retificador trifásico com IGBTs.



Fonte: Autor

Figura 60 – Filtro LCL.



Fonte: Autor

Figura 61 – Banco de baterias.



Fonte: Autor

Foram utilizados, ainda, os seguintes instrumentos de medida:

- 1 - Osciloscópio - *Rohde & Schwarz* RTH1004;
- 1 - Osciloscópio - *Tektronix* TPS - 2024;
- 1 - Analisador de Qualidade de Energia *FLUKE* 435 - Série 2;

6.2.2 Resultados obtidos

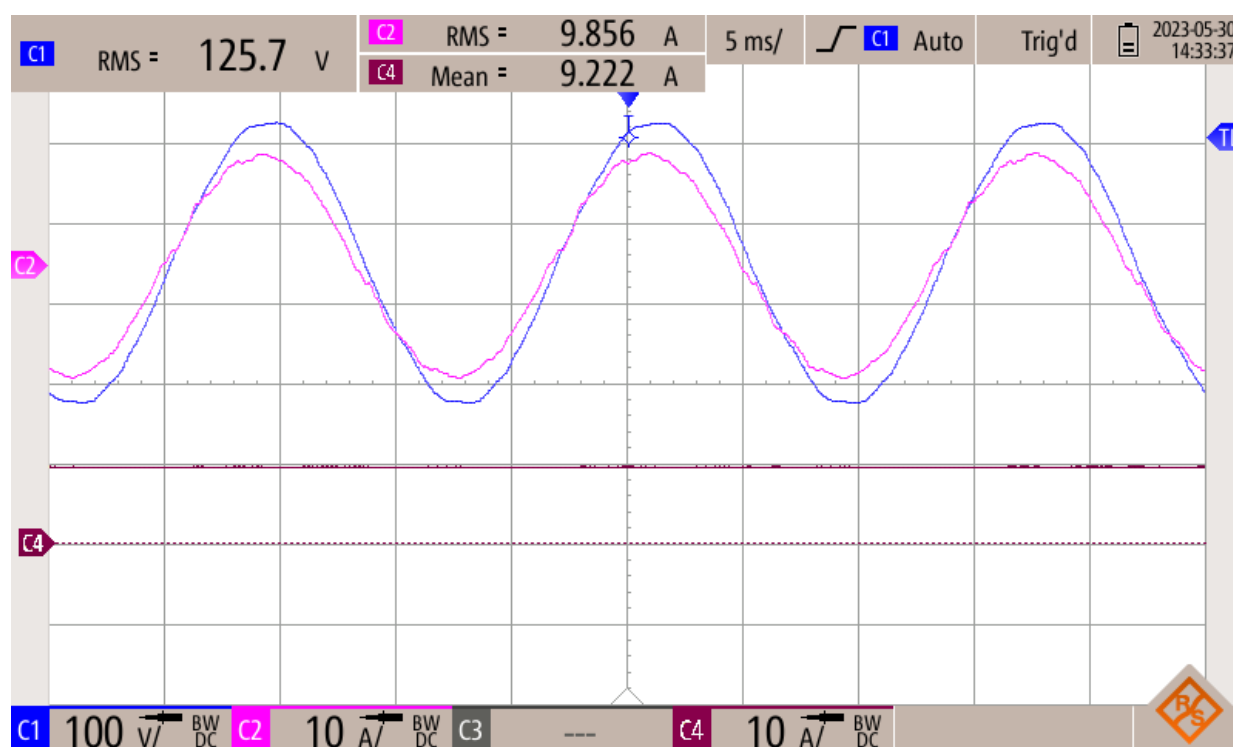
As Figuras 62 e 64 apresentam, respectivamente, as formas de onda de tensão Fase-Neutro (azul) e corrente (rosa) do tipo CA e corrente CC (vinho) para o processo de carga das baterias e para o processo de injeção de corrente das baterias na rede elétrica. Demonstrando assim, a bidirecionalidade do carregador projetado.

Como pode ser notado na Figura 62, existe uma defasagem entre as ondas de tensão e corrente. Esta defasagem está presente devido ao filtro utilizado na placa de condicionamento para converter a forma de onda real da corrente em uma medida de tensão para ser lida pelo DSP. Isto pode ser notado na Figura 63.

Na Figura 62, é possível observar que o valor de corrente CC é mantido pelo controle em aproximadamente 9 [A]. O valor positivo indica que a corrente flui da rede para as baterias. Pequenas variações neste valor são justificadas por precisão dos ganhos ajustados no processo de amostragem dos valores de corrente pelos sensores etc.

Já na Figura 64, o valor de corrente CC é mantido pelo controle em aproximadamente -9 [A]. O valor negativo indica que a corrente flui das baterias para a rede elétrica, o que também pode ser observado pela oposição de fase entre ondas de tensão e corrente CA.

Figura 62 – Formas de onda de tensão e corrente.



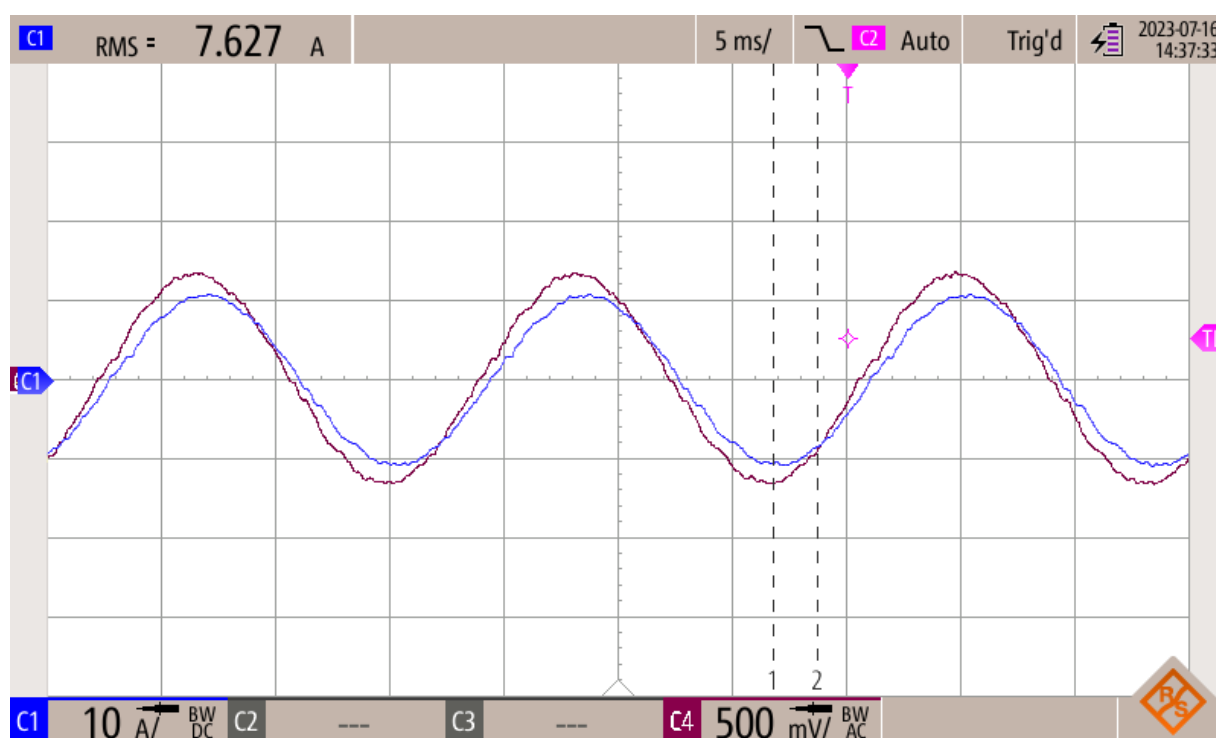
C1 - Tensão CA Fase-Neutro da Rede

C2 - Corrente CA da Rede

C4 - Corrente CC no Banco de Baterias

Fonte: Autor

Figura 63 – Formas de onda real da corrente e tensão após condicionamento.

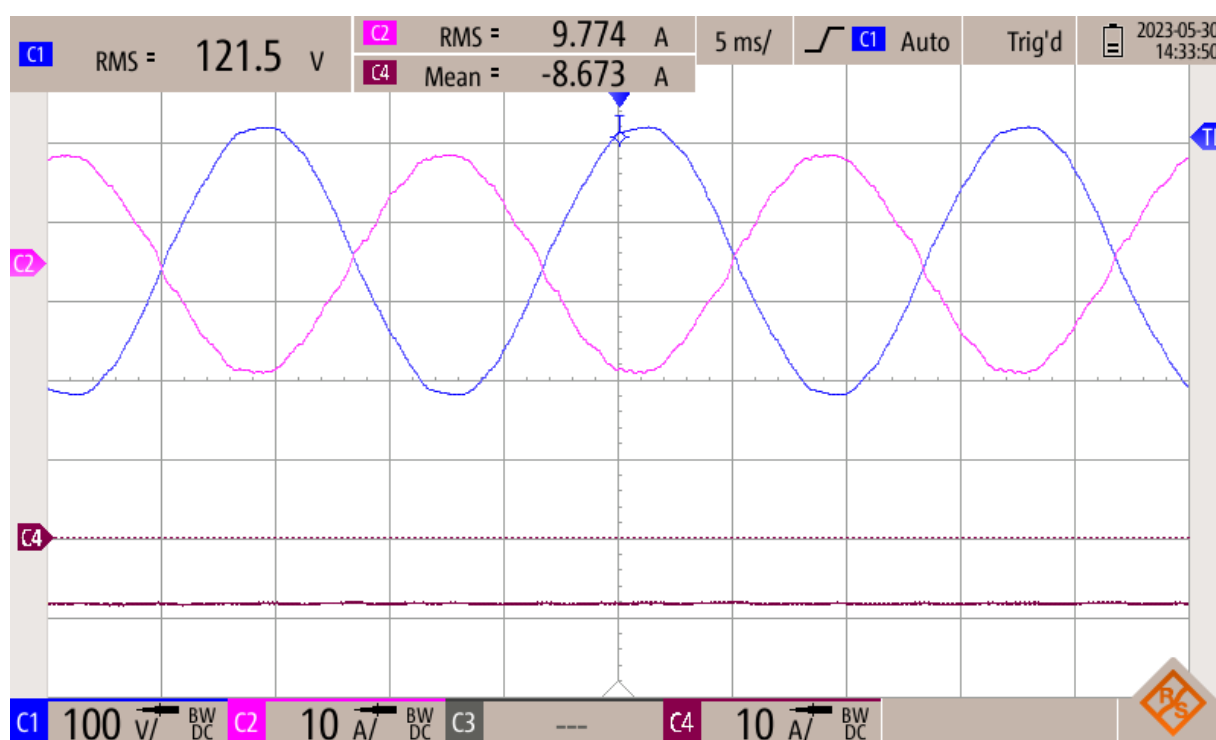


C1 - Corrente da Rede

C4 - Tensão lida pelo DSP

Fonte: Autor

Figura 64 – Formas de onda de tensão e corrente - Descarga.



C1 - Tensão CA Fase-Neutro da Rede

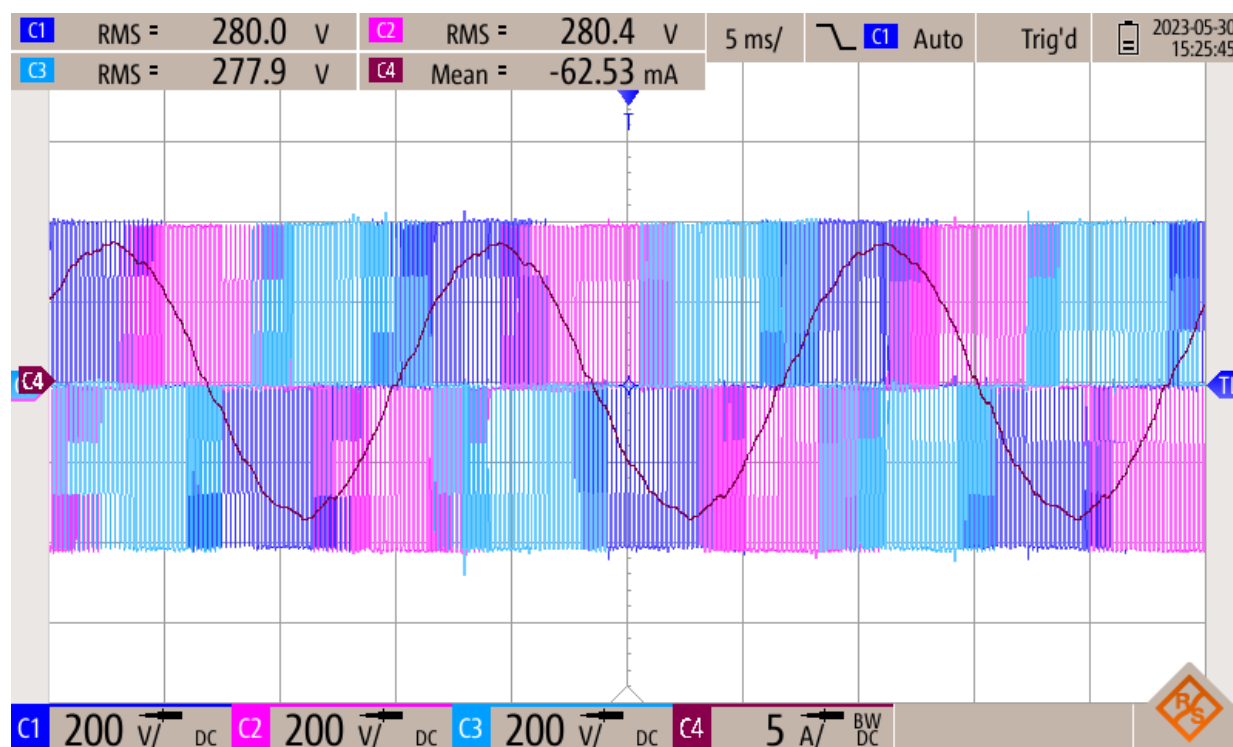
C2 - Corrente CA da Rede

C4 - Corrente CC no Banco de Baterias

Fonte: Autor

A Figura 65, por sua vez, demonstra o funcionamento do filtro, mostrando as formas de onda de tensão trifásicas Fase-Fase (em azul escuro, rosa e azul claro) e a forma de onda de corrente (em vinho), antes do filtro (em Lg na Figura 56).

Figura 65 – Tensões e Corrente CA - Filtro.



C1 - Tensão CA Fase-Fase antes do Filtro

C2 - Tensão CA Fase-Fase antes do Filtro

C3 - Tensão CA Fase-Fase antes do Filtro

C4 - Corrente CA antes do Filtro

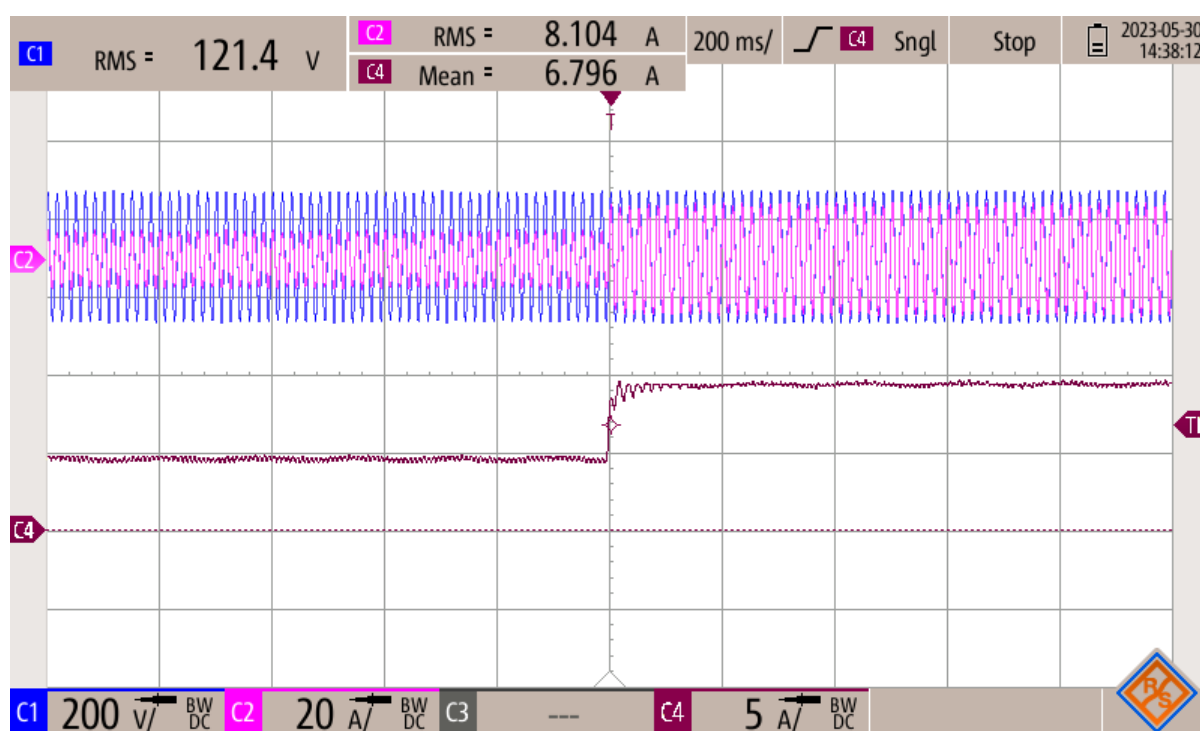
Fonte: Autor

Já as Figuras 66 e 67, mostram, respectivamente, as formas de onda da tensão Fase-Neutro (azul) e corrente (rosa) tipo CA e, também, da corrente CC (vinho) frente a um aumento na magnitude do módulo de corrente que está sendo injetada e drenada da bateria. Demonstrando, assim, a estabilidade do controle do sistema.

Na Figura 66, o controle de corrente é ajustado para uma referência de 5 [A] e, então, elevado para 8 [A].

Já na Figura 67, a referência de controle é ajustada em 5 [A] (carregando as baterias), e, então, é variado para -8 [A], invertendo o fluxo de potência. Assim, a corrente das baterias é injetada na rede elétrica.

Figura 66 – Tensão CA e Correntes CA e CC - Variação positiva controle.



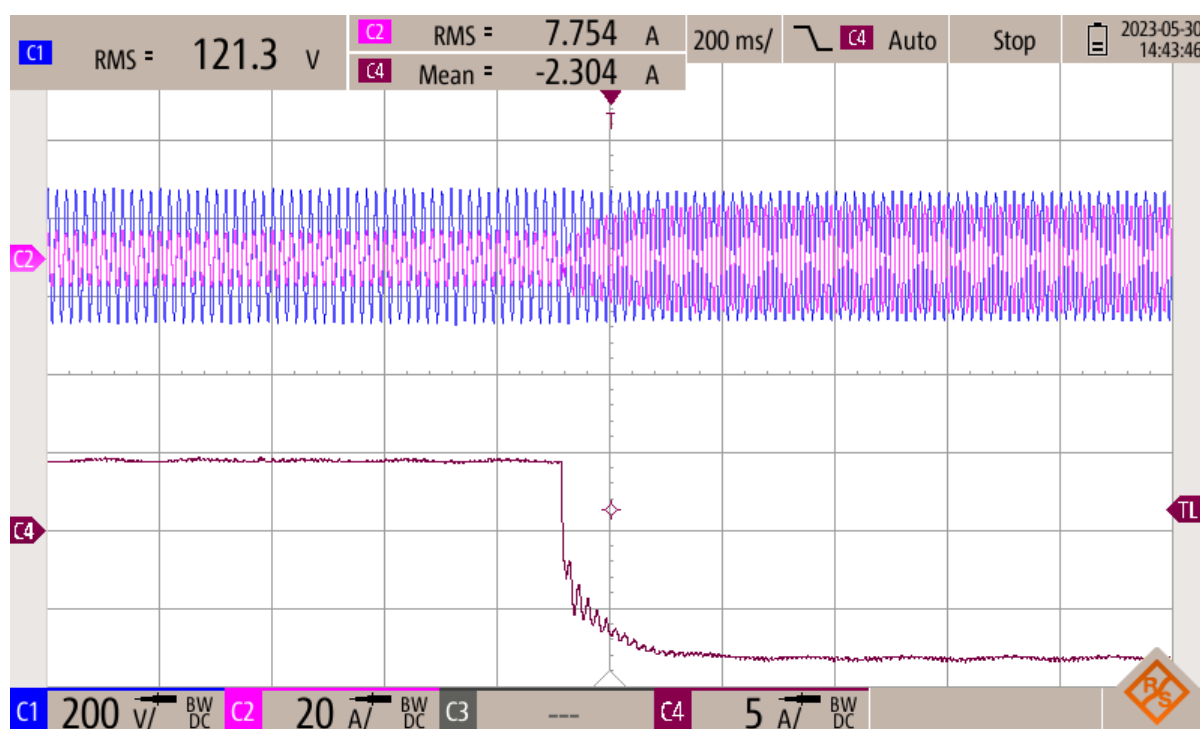
C1 - Tensão CA Fase-Neutro na Rede

C2 - Corrente CA na Rede

C4 - Corrente CC na Bateria

Fonte: Autor

Figura 67 – Tensão CA e Correntes CA e CC - Variação negativa controle.



C1 - Tensão CA Fase-Neutro na Rede

C2 - Corrente CA na Rede

C4 - Corrente CC na Bateria

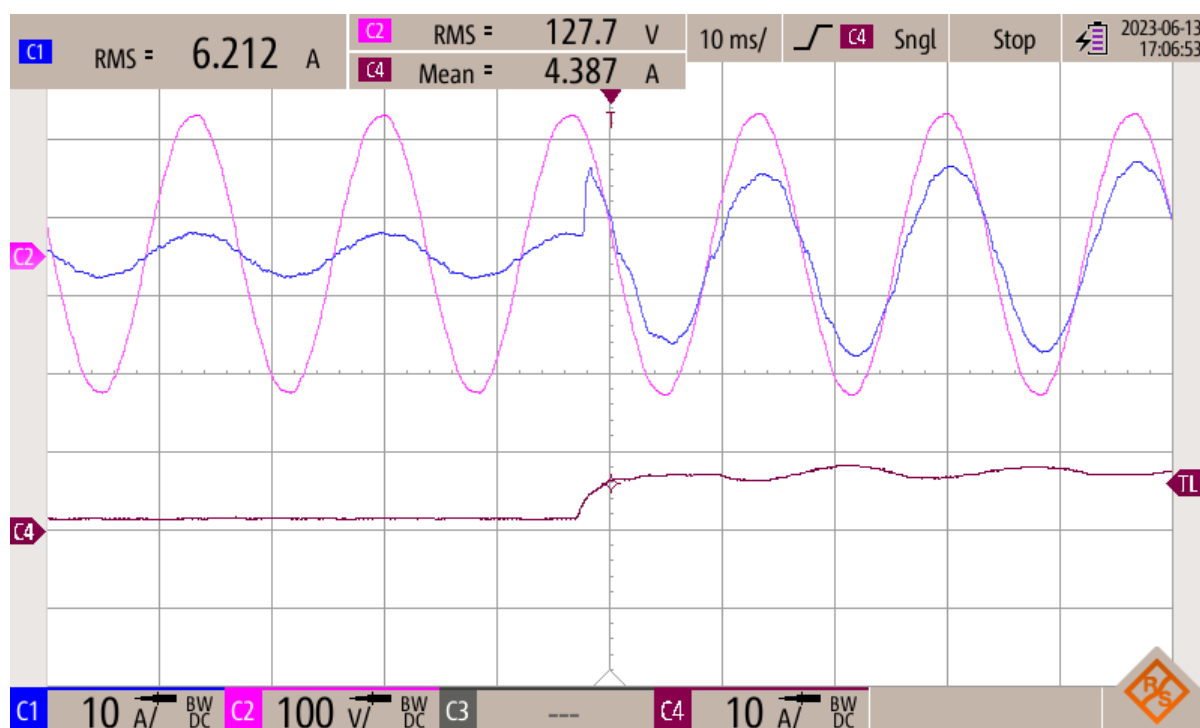
Fonte: Autor

As Figuras 68 e 69 apresentam de forma mais detalhada os transitórios que ocorrem quando da variação na magnitude da corrente CC durante a carga e descarga, respectivamente.

Na Figura 68 houve uma variação na corrente CC de 2 [A] para 9 [A], sendo que a estabilização ocorre em aproximadamente 30 [ms].

Na Figura 69 houve uma variação de 2 [A] para -9 [A] (mudando do estágio de carga para descarga), sendo que a estabilização ocorre em aproximadamente 200 [ms].

Figura 68 – Tensões e Corrente CA - Transitório da variação durante a carga.



C1 - Corrente CA da Rede

C2 - Tensão CA Fase-Neutro da Rede

C4 - Corrente CC no Banco de Baterias

Fonte: Autor

Figura 69 – Tensões e Corrente CA - Variação negativa controle.



C1 - Corrente CA da Rede

C2 - Tensão CA Fase-Neutro da Rede

C4 - Corrente CC no Banco de Baterias

Fonte: Autor

A Figura 70, apresenta as correntes trifásicas medidas no ponto de conexão com a rede elétrica. É possível observar, se comparado com a corrente CA (em rosa) da Figura 62, que apesar de utilizar o controle PR para filtrar as harmônicas de baixa frequência, em alguns momentos o conteúdo harmônico é mais presente.

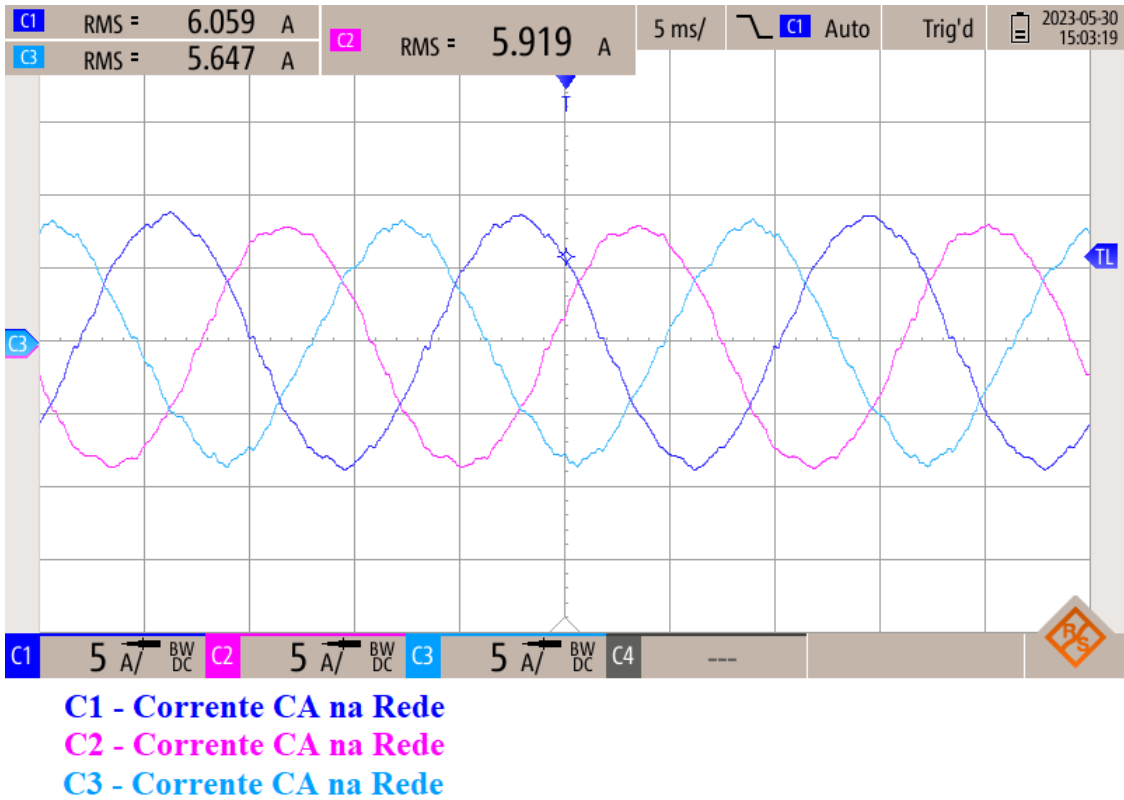
Isto pode ser explicado, por exemplo, por alguma carga harmônica conectada no sistema com sequência de fase oposta à dos fasores originais (de sequência ABC). Deste modo, estas cargas causam distorções na tensão da rede e, como consequência, na corrente.

Uma outra explicação, é que o que se tem na realidade são redes elétricas totalmente desequilibradas (o que pode ser visto nas Figuras 71 e 72, que apresentam o desequilíbrio da rede, medido pelo *FLUKE*, com o conversor desligado e ligado respectivamente. Assim, a compensação é feita por um valor médio (e não um valor específico para cada fase). Para contornar este problema, seria necessário utilizar outras técnicas para compensação dos harmônicos, como exemplo, utilizar o controle PR aplicado independentemente em cada fase do sistema *abc* (o que aumenta a complexidade de implementação do controle).

Todavia, o THD do sistema ainda é, em geral, inferior à 3%, sendo 2,4 a 3,2 para

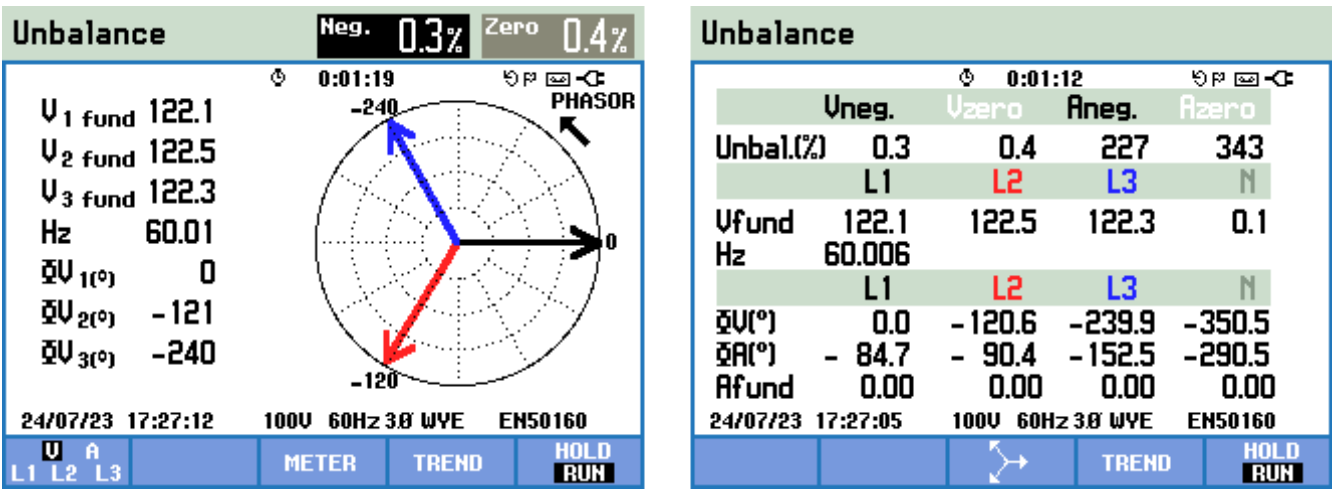
as correntes e 1,4 a 1,9 para as tensões, com a utilização do controle PR. Isto pode ser observado nas Figuras 73 e 74, que respectivamente representam o THD para correntes e tensões durante a carga e, também, nas Figuras 75 e 76, que respectivamente representam o THD para correntes e tensões durante a descarga.

Figura 70 – Correntes CA - Rede.



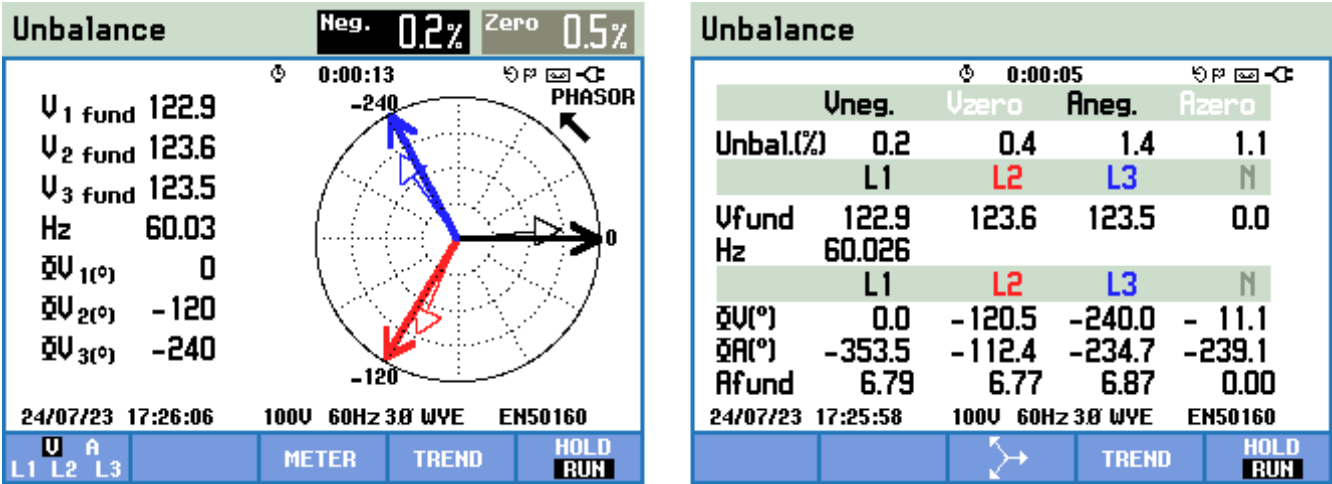
Fonte: Autor

Figura 71 – Desequilíbrio na rede elétrica - Carregador desligado.



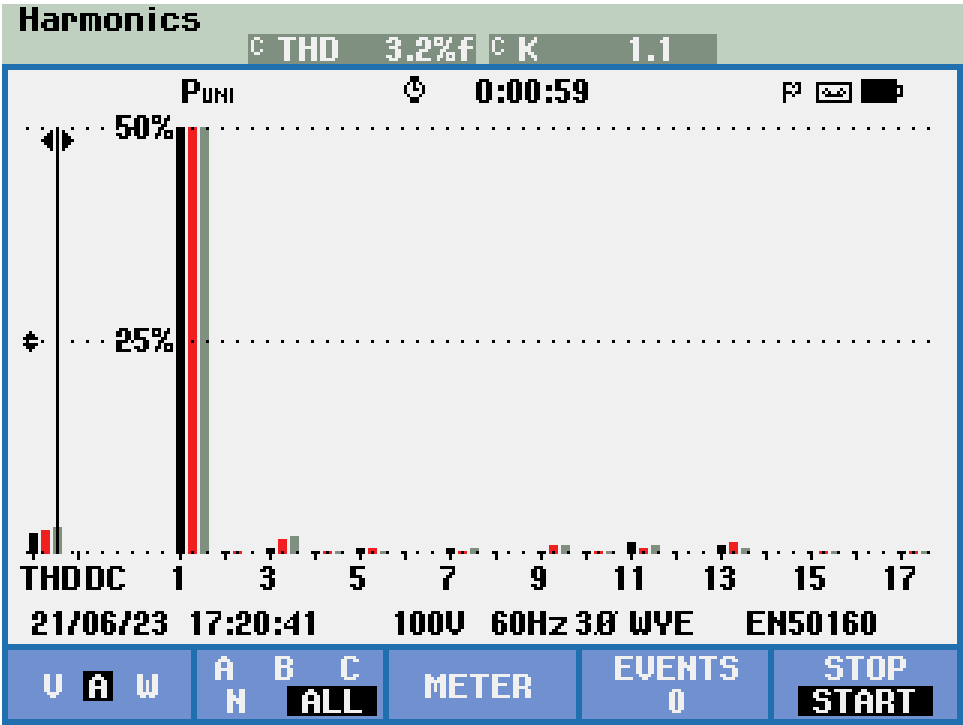
Fonte: Autor

Figura 72 – Desequilíbrio na rede elétrica - Carregador ligado.



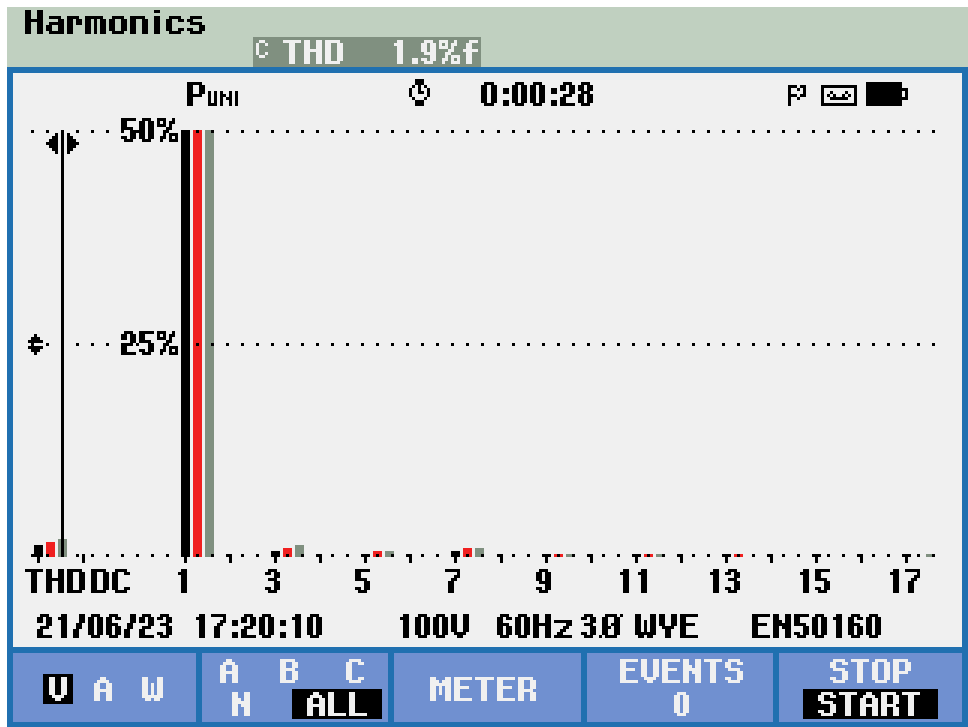
Fonte: Autor

Figura 73 – Distorção harmônica corrente na rede durante carga - Fluke.



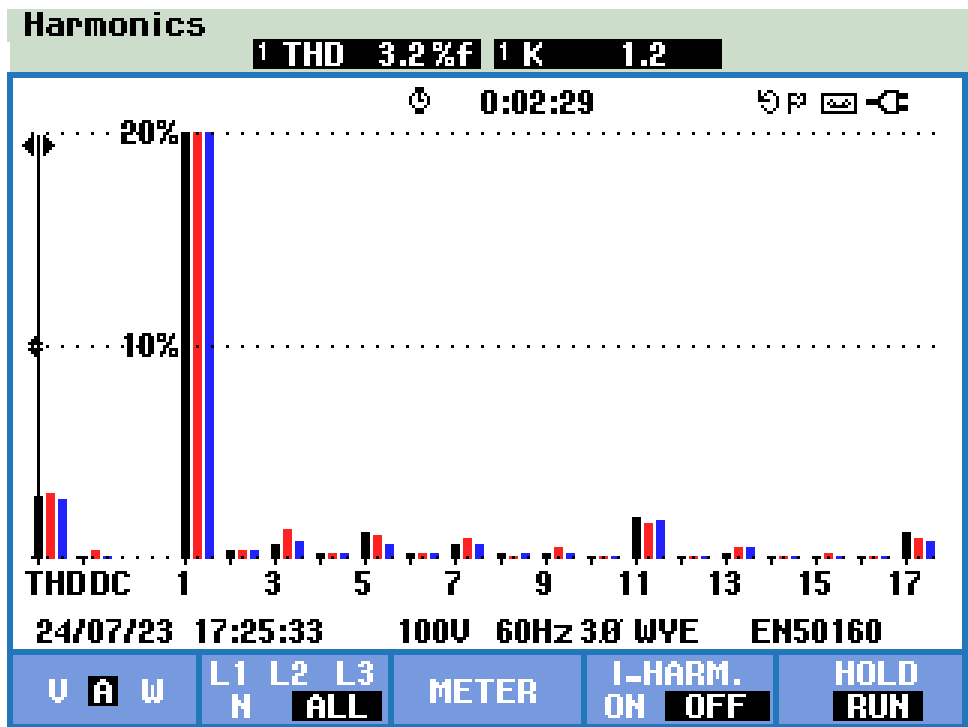
Fonte: Autor

Figura 74 – Distorção harmônica tensão na rede durante carga - Fluke.



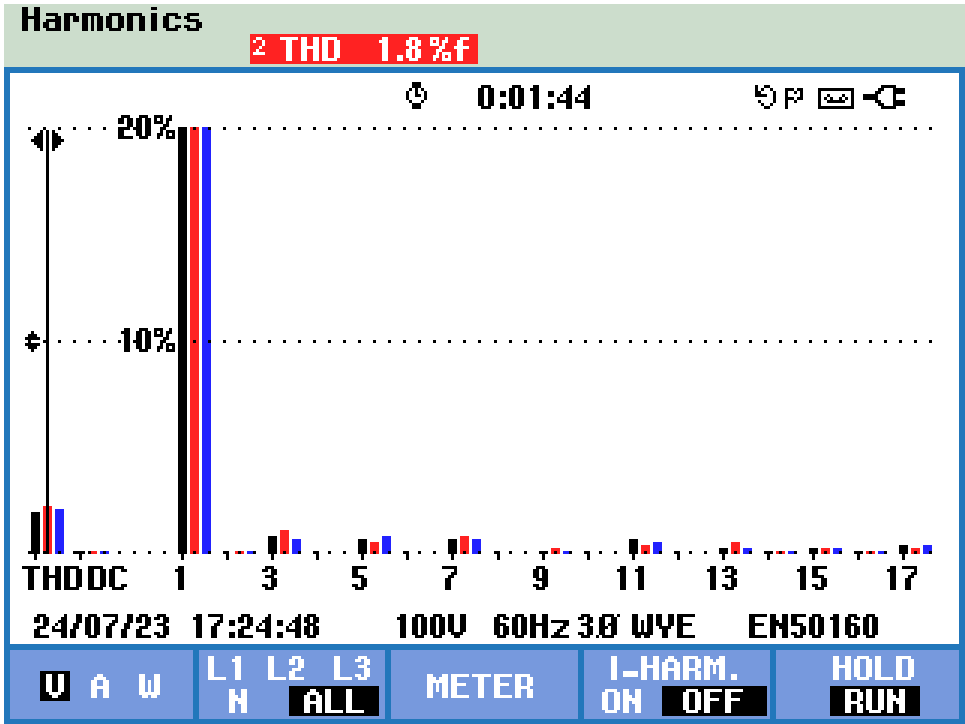
Fonte: Autor

Figura 75 – Distorção harmônica corrente na rede durante descarga - Fluke.



Fonte: Autor

Figura 76 – Distorção harmônica tensão na rede durante descarga - Fluke.

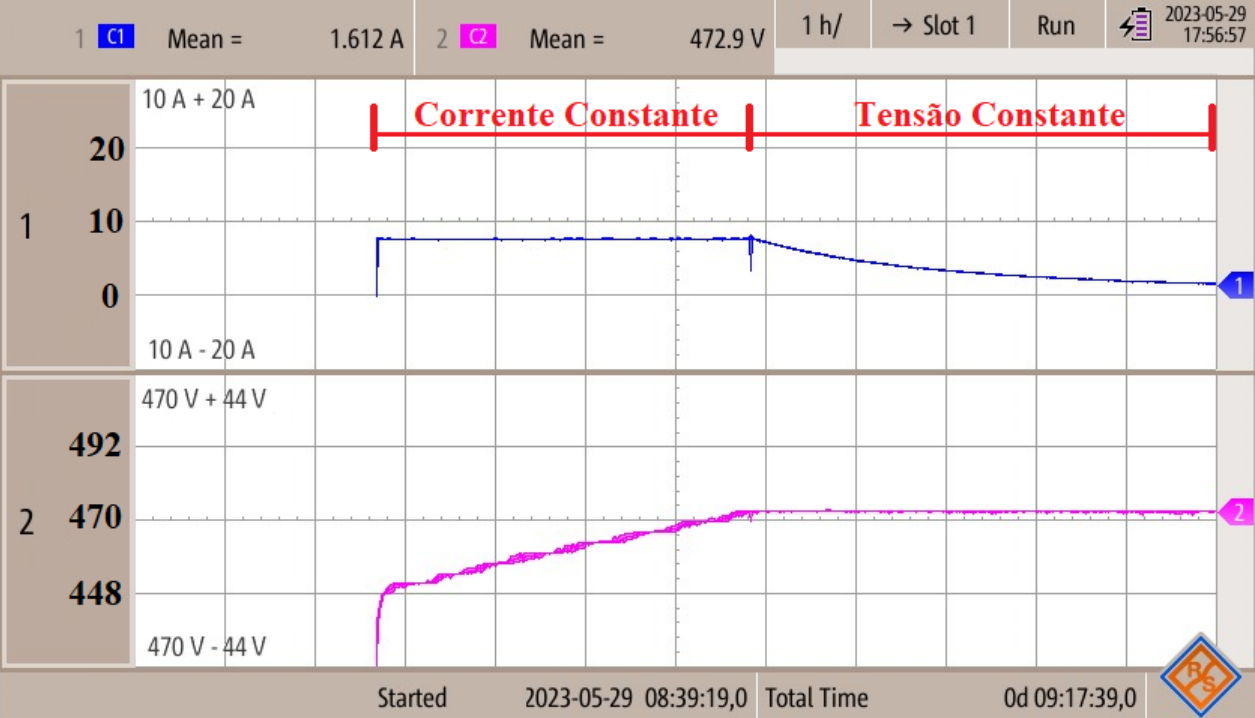


Fonte: Autor

Vale ressaltar que o terceiro harmônico que aparece nas Figuras 73 e 74 é devido ao *dead-time*.

Finalmente, a Figura 77 mostra o processo de carga das baterias e a troca de controle entre o método de corrente constante e tensão constante. É possível observar que inicialmente a corrente CC (em azul) é controlada em um valor fixo de 7 [A] e, após aproximadamente quatro divisões na escala de tempo (o que representa aproximadamente 4 horas do início do teste), o controle muda automaticamente e passa a controlar a tensão CC (em rosa) até o final do processo de carga. A tensão de referência para carregamento foi de 473 [V], conforme Tabela 19.

Figura 77 – Corrente e Tensão CC - Carga da Bateria.



C1 - Corrente CC na Bateria

C2 - Tensão CC na Bateria

Fonte: Autor

7 Conclusões

Este trabalho se propôs a desenvolver e demonstrar os procedimentos utilizados para estudo, análise, concepção, projeto, dimensionamento, controle e simulação de um carregador para recarga rápida de baterias de veículos elétricos. Foi proposto inicialmente a criação de um carregador rápido trifásico bidirecional baseado em IGBTs de 50 [kW] e com dois estágios, sendo o primeiro estágio CA/CC e o segundo um *buck* CC/CC.

No início do trabalho, foi necessário compreender as diversas topologias de conversores CA/CC e CC/CC utilizados no carregamento, também foram estudados os protocolos de comunicação como CAN, LIN e FlexRay, além disso, estudou-se os principais tipos de baterias disponíveis e o seu sistema de gerenciamento (BMS). Por fim, estudou-se o método de carregamento CC-CV, que apesar de sua simplicidade, apresentou um bom desempenho.

O estudo dos veículos elétricos e das baterias se mostrou de grande valor para a definição e compreensão dos níveis de potência utilizados no conversor, bem como para definir as topologias a serem utilizadas. Também foi visto que existem diversos padrões de carregamento e cada país adota o que é mais adequado para sua região. A descrição dos conectores e de seus soquetes é de suma importância para o desenvolvimento de um carregador de veículos elétricos, pois faz-se necessário o conhecimento dos pinos de conexão e comunicação, com a finalidade de projetar, adequadamente, as rotinas de segurança.

De maneira geral, é possível aferir que a pesquisa desenvolvida cumpriu seu objetivo de validar o carregador proposto, ainda que o estágio CC/CC não tenha sido implementado na prática, foi possível, com o auxílio de simulações feitas através do software *Matlab*, validar o funcionamento do conversor nos estágios CA/CC e CC/CC.

O carregador implementado em bancada apresentou êxito na funcionalidade de carga e descarga (bidirecionalidade) do banco de baterias. Um ponto a ser destacado é que a implementação prática do carregador exigiu uma maior atenção com relação aos conteúdos harmônicos presentes nas tensões e correntes, bem como exigiu estudos de técnicas para mitigar estes efeitos.

É importante destacar que apesar de o carregador implementado em bancada não ser do tipo rápido, devido à sua potência nominal, com o algoritmo de controle já desenvolvido, a mudança na potência do conversor para atingir o modo de carregamento rápido se limitaria a ajustes nos ganhos do controle.

Por fim, é importante destacar a grande similaridade existente entre os resultados práticos e os resultados teóricos, o que confere ainda mais segurança quanto a capacidade

do conversor proposto, em alcançar os demais objetivos pretendidos nesta pesquisa, em uma situação futura.

7.1 Trabalhos Futuros

Nesta seção são apresentados os principais trabalhos futuros que se espera produzir à partir desta dissertação, com a finalidade de aumentar a disponibilidade de informações e abrangência das análises. A seguir, lista-se uma série de tópicos que não puderam ser abordados nesta dissertação, porém foram considerados de interesse.

- Fazer a implementação em bancada do conversor CC/CC, de modo à permitir o carregamento de baterias de veículos com valores menores de tensão nominal;
- Também sugere-se implementar algoritmos de comunicação, por exemplo CAN, para fazer a comunicação entre o sistema de carregamento e o sistema do veículo elétrico;
- Seguindo o tópico anterior, sugere-se implementar algoritmos de estimação do estado de carga, estado de saúde e estado de potência da bateria, sendo estes indispensáveis para o sistema de gerenciamento da bateria (BMS);
- Aplicação do conversor proposto, a potência nominal como carregador de bateria, a partir de um conjunto de baterias Ion-Lítio, evidenciando a injeção de corrente nas mesmas;
- Implementar e verificar a influência da utilização de conversores isolados, se comparado ao carregador proposto neste trabalho.
- Avaliar a eficiência do carregador proposto.
- Calcular teoricamente o ganho dos PIs do controle SRF.
- Modificar o filtro do condicionamento, de modo a evitar erro de leitura.

Anexos

ANEXO A – Artigo publicado

SIQUEIRA, M. G. et al., "Mitigação dos Efeitos de Afundamentos de Tensão em Carregadores de Baterias de Veículos Elétricos", XIX Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, XIX ERIAC, Foz do Iguaçu, Brazil, Artigo C6.07_1592, ISBN 978-65-00-63038-1, Mai. 21-25, 2023.

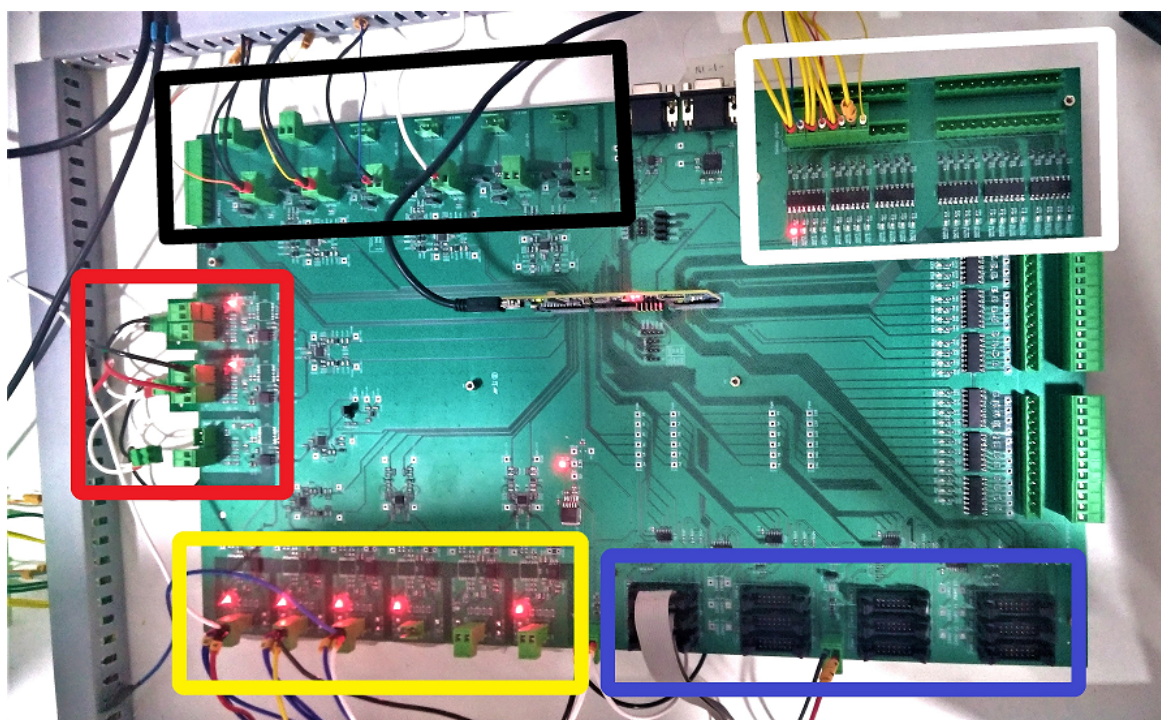
ANEXO B – Placa de condicionamento

O circuito elétrico da placa de condicionamento foi desenvolvido pelo então aluno de doutorado da Universidade Federal de Itajubá, João Gabriel Luppi Foster.

A Figura 78 apresenta detalhes da placa de condicionamento com relação às principais entradas e saídas utilizadas. Sendo:

- Em Vermelho - Medidas de Tensão CC;
- Em Preto - Medidas de Corrente CA e CC;
- Em Branco - Saídas Digitais;
- Em Amarelo - Medidas de Tensão CA;
- Em Azul - Saídas PWM;

Figura 78 – Detalhes da Placa de Condicionamento.



Fonte: Autor

A Tabela 22 apresenta dados técnicos das entradas e saídas presentes na placa de condicionamento.

Tabela 22 – Parâmetros das entradas e saídas da Placa de Condicionamento.

Entradas Tensão CA	até 210 [V pico]
Frequência de Corte Filtro - Entrada Tensão CA	aproximadamente 20 kHz
Entradas Tensão CC	até 810 [V]
Frequência de Corte Filtro - Entrada Tensão CC	aproximadamente 20 kHz
Entradas Corrente CC e CA	até 5 [A rms] para sensor integrado ou até 24 [mA] para sensor Hall externo
Frequência de Corte Filtro - Entrada Corrente CC e CA	aproximadamente 20 kHz
Entradas Digitais	28,5 [V máx] e 27 [mA máx]
Saídas Digitais	45 [V máx] e 500 [mA máx]
Tensão de Saída PWM	5 ou 15 [V] - Utilizado 15 [V]

Referências

- 1 MC BEAN, G. et al. The science of climate change - what do we know? *Transport Reviews*, v. 43, p. 62–87, 2001. [18](#)
- 2 PETIT, J. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the vostok ice core antarctica. *Nature*, v. 399, p. 429, 01 1999. [18](#)
- 3 HOUGHTON, J. et al. Climate change 2001: The scientific basis. *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, v. 881., p. 881, 01 2001. [18](#)
- 4 CHAKRABORTY, A. Advancements in power electronics and drives in interface with growing renewable energy resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 1816–1827, 2011. [18](#)
- 5 DUARTE, R. The role of consumption patterns, demand and technological factors on the recent evolution of co2 emissions in a group of advanced economies. *Ecological Economics*, v. 96, p. 1–13, 2013. [18](#)
- 6 NEJADKOORKI, F. et al. An approach for modeling co2 emissions from road traffic in urban areas. *Science of The Total Environment*, v. 406, p. 269–278, 2008. [18](#)
- 7 DALL-ORSOLETTA, A. et al. Low-carbon technologies and just energy transition: Prospects for electricvehicles. *Energy Conversion and Management: X*, v. 16, 2022. [18](#)
- 8 DENG, R. et al. A survey on electric buses — energy storage, power management, and charging scheduling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 22, n. 1, p. 9–22, 2021. [19](#)
- 9 Stantec Consulting Services Inc. Overview of battery-electric bus technologies and existing conditions review. 2022. [19](#)
- 10 ADDERLY, S. et al. Electric vehicles and natural disaster policy implications. *Energy Policy*, v. 112, p. 437–448, 2017. [19](#)
- 11 VOLVO. Carros elétricos - o futuro da mobilidade. 2021. [19](#)
- 12 VANDRON, A. Respiratory medicine. *The Lancet*, 2017. [19](#)
- 13 IBERDOLA. Iberdrola e porsche se unem para promover a recarga ultrarrápida de veículo elétrico na espanha. 2020. [19](#)
- 14 KLEBNIKOV, S. Tesla is now the world most valuable car manufacturer with 208 billion valuation. 2020. [19](#)
- 15 SHIRIPOUR, S. Evaluation of different types of hybrid electric vehicles and their control strategies. 2017. [21](#)
- 16 BRADLEY, T. H. et al. Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 21, p. 190–203, 2009. [21](#), [22](#)

- 17 LI, C. et al. Reducing mobile air conditioner (mac) power consumption using active cabin-air-recirculation in a plug-in hybrid electric vehicle (phev). *World Electr. Veh. J.*, v. 9, n. 4, p. 51, 2018. [21](#)
- 18 REQUIA, W. J. et al. How clean are electric vehicles? evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health. *Atmospheric Environment*, v. 185, p. 64–77, 2018. [22](#)
- 19 GELBKE, M. et al. 5 - flooded starting-lighting-ignition (sli) and enhanced flooded batteries (efbs): State-of-the-art. *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*, p. 149–184, 2017. [23](#)
- 20 UPS battery center. Deep cycle vs. SLI. 2014. [23](#)
- 21 Engineers Edge. Traction Battery Review. 2021. [23](#)
- 22 AFIF, M. Analisis perbandingan baterai Íon-Ítíio, lithium-polymer, chumbo-Ácido dan nÍquel-metal hydride pada penggunaan mobil listrik. *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 6, p. 95–99, 08 2015. [23](#)
- 23 CHAN, C. An overview of power electronics in electric vehicles. iee transactions on industrial electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 44, n. 1, p. 3–13, 1997. [23](#)
- 24 LARMINIE, J. et al. Electric vehicle technology explained. 2. ed. WILEY, 2012. [24](#), [25](#), [26](#), [27](#), [28](#), [29](#)
- 25 ANDWARI, A. A review of battery electric vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 78, p. 414–430, 2017. [24](#), [28](#)
- 26 LOWE, M. et al. Íon-lítio batteries for electric vehicles: The u.s. value chain. 2010. [24](#), [28](#)
- 27 SCHARFEGGER, M. Elektrodenverarbeitung von lithiierten materialien unter verwendung eines neuartigen binder/lösungsmittel systems. *Dissertação de Mestrado - Universidade de Graz em cooperação com a Cooperação com a Varta Micro Innovation GmbH*, 2010. [25](#)
- 28 AHMAN, M. Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles. *Energy*, v. 26, p. 973–989, 2001. [26](#)
- 29 BURKE, A. et al. Battery electric vehicles: An assessment of technology and factors influencing market readiness. *UC Davis, Institute of Transportation Studies (ITS-Davis)*, 2007. [26](#)
- 30 RUETSCHI, P. Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries. *Journal of Power Sources*, v. 127, p. 33–44, 2004. [27](#)
- 31 LINDEN, D. et al. Handbook of batteries. 3. ed. McGraw Hill, New York, 2002. [27](#), [29](#)
- 32 CROMPTON, T. Battery reference book. 3. ed. Elsevier, 2000. [28](#)
- 33 HANIFAH, R. Electric vehicle battery modelling and performance comparison in relation to range anxiety. *Procedia Computer Science*, v. 76, p. 250–256, 2015. [28](#)

- 34 AL-HAJ HUSSEIN, A. et al. A review of charging algorithms for nickel and lithium battery chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 60, n. 3, p. 830–838, 2011. [30](#)
- 35 SHEN, W. et al. Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview. *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, p. 1567–1572, 2012. [30](#)
- 36 TAR, B. et al. An overview of the fundamentals of battery chargers. *2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, p. 1–4, 2017. [30](#)
- 37 HU, R. Battery management system for electric vehicle applications. *Dissertação de Mestrado - University of Windsor*, 2011. [31](#)
- 38 CASALS, L. C. et al. Communications concerns for reused electric vehicle batteries in smart grids. *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 9, p. 120–125, 2016. [32](#)
- 39 CHITRA, A. *Artificial Intelligent Techniques for Electric and Hybrid Electric Vehicles*. [S.l.]: Weley, 2020. 288 p. [32](#)
- 40 DOUGLAS, J. Battery management for high-power battery stacks. *CAN Newsletter*, p. 34–38, 2010. [32](#)
- 41 SHARMA, R. In-vehicular communication networking protocol. *Indiana University, Purdue University, Indianapolis, IN*, 2015. [32](#), [34](#), [35](#)
- 42 SESHAN, N. Simplify current and voltage monitoring with isolated spi and i2c in your battery management systems (bms). *Texas Instruments*, 2018. [32](#)
- 43 WEY, C. et al. EMI prevention of CAN-bus-based communication in battery management systems. 2013. [32](#)
- 44 ANDRE, J. Modular battery management system interface to integrated vehicle control unit : Creating a bms playground using arduino. 2020. [33](#)
- 45 VOSS, W. *A Comprehensive Guide To Controller Area Network*. [S.l.]: Copperhill Technologies Corporation, 2008. [33](#)
- 46 PAZUL, K. et al. Controller area network (CAN) basics. *Microchip Technology Inc.*, 1999. [33](#)
- 47 ZHANG, H. et al. Common-mode EMI noise modeling and reduction with balance technique for three-level neutral point clamped topology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 64, n. 9, p. 7563–7573, 2017. [33](#), [43](#)
- 48 WANG, L. et al. Coordinated control of a series-parallel hybrid electric bus during EV/HEV mode transition. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, v. 11, p. 198–209, 06 2012. [33](#)
- 49 XIE, C. et al. Optimal power management for fuel cell–battery full hybrid powertrain on a test station. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 53, p. 307–320, 07 2013. [33](#)
- 50 STRIETZEL, M. et al. MCUs simplify HEV and EV motor control designs. *Fujitsu Semiconductor*, 2011. [33](#)

- 51 FORSBERG, A. et al. Comparison of flexray and can-bus for real-time communication. 2009. [34](#)
- 52 BERCKMANS, G. et al. Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. *Energies*, v. 10, 09 2017. [35](#)
- 53 IEC. IEC 61851: Conductive charging systems for ev. 2017. [35](#), [36](#)
- 54 SAE International. Surface vehicle recommended practice j1772,sae electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler. 2010. [35](#), [36](#)
- 55 YILMAZ, M. et al. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 5, p. 2151–2169, 2013. [35](#), [37](#), [43](#)
- 56 GJELAJ, M. Planning strategies for ev fast-charging stations combined with battery storage systems in distribution grids. *Applied Sciences*, v. 12, p. 3214, 2019. [36](#)
- 57 WILLIAMSON, S. Industrial electronics for electric transportation: Current state-of-the-art and future challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, n. 5, p. 3021–3032, 2015. [36](#)
- 58 LUNZ, B. Electric road vehicle battery charging systems and infrastructure. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, p. 445–467, 12 2015. [36](#)
- 59 YALLA, N. Reduced switching state multilevel improved power factor converter for level-3 electric vehicle applications. *IET Power Electronics*, v. 13, p. 693–702, 2020. [37](#)
- 60 BALASUBRAMANIAN, R. et al. Simulation and performance evaluation of shunt hybrid power filter for power quality improvement using pq theory. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 6, p. 2603, 12 2016. [37](#)
- 61 JUSTUS RABI, B. et al. A novel power factor correction rectifier for enhancing power quality. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, v. 6, p. 772–780, 12 2015. [37](#)
- 62 KUSHWAHA, R. et al. Design and development of modified bl lu converter for pq improvement in ev charger. *IEEE Transactions on Industry Applications*, PP, p. 1–1, 04 2020. [37](#)
- 63 SAH, S. et al. Power quality improvement using shunt active filters with multilevel inverter. *International Journal for Research Trends and Innovation*, v. 6, 2021. [37](#)
- 64 KHALIGH, A. et al. Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 61, n. 8, p. 3475–3489, 2012. [37](#)
- 65 NAYAK, S. Electric vehicle charging topologies, control schemes for smart city application. *2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, p. 1–6, 2019. [37](#)
- 66 SANDOVAL, J. et al. A bidirectional series resonant matrix converter topology for electric vehicle dc fast charging. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, v. 2015, p. 3109–3116, 05 2015. [37](#)

- 67 SHARMA, G. et al. Comparison of common dc and ac bus architectures for ev fast charging stations and impact on power quality. *eTransportation*, v. 5, 2020. [37](#)
- 68 SINGH, B. et al. A review of three-phase improved power quality ac-dc converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 51, n. 3, p. 641–660, 2004. [37](#), [43](#)
- 69 THREE-PHASE bidirectional electric vehicle charger for vehicle to grid operation and grid voltage regulation. *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, p. 007–012, 2016. [37](#)
- 70 VERMA, A. et al. Multi-objective reconfigurable three-phase off-board charger for ev. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 55, n. 4, p. 4192–4203, 2019. [37](#)
- 71 ZHANG, Z. et al. A unit power factor dc fast charger for electric vehicle charging station. *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, v. 1, p. 411–415, 2012. [37](#)
- 72 AZEVEDO, C. C. et al. A robust adaptive control strategy of active power filter for power factor correction, harmonic compensation, and balancing of nonlinear loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 27, n. 2, p. 718–730, 2012. [37](#)
- 73 FERNANDEZ, A. et al. A unity power factor correction preregulator with fast dynamic response based on a low-cost microcontroller. *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, p. 186–192, 2007. [37](#)
- 74 MALINOWSKI, M. et al. Review and comparative study of control techniques for three-phase pwm rectifiers. *Mathematics and Computers in Simulation*, v. 63, p. 349–361, 2003. [37](#)
- 75 LIN, B. et al. Bi-directional ac/dc converter based on neutral point clamped. *ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No.01TH8570)*, v. 1, p. 619–624, 2001. [37](#), [38](#), [39](#), [40](#), [41](#), [42](#)
- 76 LI, S. et al. Study and design considerations of threephase bi-directional ac/dc converter. *Journal of Molecular Catalysis A-chemical - J MOL CATAL A-CHEM*, v. 1, p. 619 – 624, 02 2004. [38](#), [41](#)
- 77 CIRRINCIONE, M. et al. Current harmonic compensation by a single-phase shunt active power filter controlled by adaptive neural filtering. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 8, p. 3128–3143, 2009. [40](#)
- 78 SILVESTRE, J. Half-bridge bidirectional dc-dc converter for small electric vehicle. *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, p. 884–888, 2008. [43](#)
- 79 MOLLAHASANOGLU, M. et al. A review of three phase ac-dc power factor correction converters for electric vehicle fast charging. *European Journal of Science and Technology*, 01 2021. [43](#)
- 80 ZELJKOVIC, S. et al. A three phase bidirectional v2g interface converter based on sic jfets. *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, p. 1–10, 2015. [43](#)

- 81 SINGH, S. P. Performance comparison of spwm and svpwm techniques in npc bidirectional converter. 2021. [44](#)
- 82 LAZIM, M. T. *POWER ELECTRONICS AND DRIVES*. 1. ed. [S.l.]: Philadelphia University-Jordan, 2019. [45](#), [46](#)
- 83 LOPA, S. et al. Design and simulation of dc-dc converters. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 3, p. 62–70, 01 2016. [45](#)
- 84 KHANIPAH, N. H. et al. Multi device interleaved dc/dc converter for fuel cell applications. v. 8, p. 41–45, 01 2016. [45](#)
- 85 TAGHVAEE, M. H. et al. A current and future study on non-isolated dc-dc converters for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 17, p. 216–227, 2013. [45](#)
- 86 ALASSI, A. et al. Assessment of isolated and non-isolated dc-dc converters for medium-voltage pv applications. *2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GC-CCE)*, p. 1–6, 2017. [46](#), [47](#)
- 87 PENG, F. Z. et al. A new zvs bidirectional dc-dc converter for fuel cell and battery application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, n. 1, p. 54–65, 2004. [46](#)
- 88 NARDONE, K. et al. Adaptive cell topologies raise the bar for dc-dc converter performance in ev/hev applications. *VICOR WHITE PAPER*, 2010. [46](#)
- 89 TRAN, Y.-K. et al. A multiport medium voltage isolated dc-dc converter. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, p. 6983–6988, 2016. [46](#)
- 90 EHSANI, M. Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 4, p. 719–728, 2007. [46](#)
- 91 THOUNTHONG, P. et al. Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources*, v. 193, p. 376–385, 2009. [46](#), [47](#)
- 92 AZIB, T. et al. An innovative control strategy of a single converter for hybrid fuel cell/supercapacitor power source. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 57, n. 12, p. 4024–4031, 2010. [47](#)
- 93 MAYER, R. et al. Conversor cc-cc multifásico bidirecional em corrente não isolado aplicado a sistemas elétricos de tração de veículos elétricos e híbridos. *BRAZILIAN JOURNAL OF POWER ELECTRONICS*, 2015. [49](#), [50](#)
- 94 PATAHK, A. et al. Review and study of bidirectional of dc-dc converter topologies for electric vehicle application. *International Journal of Science, Engineering and Technology*, 2015. [49](#), [50](#), [51](#), [52](#)
- 95 BRODAY, G. R. Bidirectional dc-dc converters for hybrid energy storage systems in electric vehicle applications. *Disseração de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná*, 2016. [50](#)

- 96 SURYOATMOJO, H. et al. Design of bidirectional dc-dc cuk converter for testing characteristics of chumbo-Ácido battery. 2020. 51
- 97 CHAKRABORTY, S. et al. Dc-dc converter topologies for electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles and fast charging stations: State of the art and future trends. *Energies*, v. 12, n. 8, p. 1569, 2019. 52, 58, 60
- 98 ZHANG, J. Bidirectional dc-dc power converter design optimization, modeling and control. *Tese de Doutorado - Virginia Polytechnic Institute*, 2008. 52
- 99 AL SAKKA, M. et al. Dc/dc converters for electric vehicles. 2011. 52
- 100 LEE, J. et al. Regenerative current control method of bidirectional dc/dc converter for ev/hev application. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, v. 8, p. 97–105, 01 2013. 52, 53
- 101 TURKSOY, O. et al. Overview of battery charger topologies in plug-in electric and hybrid electric vehicles. 2018. 53
- 102 WAN, H. High efficiency dc-dc converter for ev battery charger using hybrid resonant and pwm technique. *Dissertação de Mestrado - Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2012. 53
- 103 ROBERTS, S. *DC/DC BOOK OF KNOWLEDGE: Practical tips for the User*. 2. ed. [S.l.]: RECOM, 2015. 54, 55, 56, 57, 59
- 104 KHAN, A. A. A family of high efficiency bidirectional dc/dc converters using switching cell structure. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, p. 1177–1183, 2016. 54
- 105 BAI, H. et al. Comparison and evaluation of different dc/dc topologies for plug-in hybrid electric vehicle chargers. *International Journal of Power Electronics*, v. 4, p. 119–133, 02 2012. 59
- 106 AL-CHLAIHAWI, S. J. M. Multiport converter in electrical vehicles-a review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 6, p. 378–382, 05 2016. 60, 61
- 107 BLAABJERG, F. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 53, n. 5, p. 1398–1409, 2006. 65, 66
- 108 BOJOI, R. I. et al. Current control strategy for power conditioners using sinusoidal signal integrators in synchronous reference frame. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 20, n. 6, p. 1402–1412, 2005. 67
- 109 ETXEBERRIA-OTADUI, I. et al. A single synchronous frame hybrid (ssfh) multi-frequency controller for power active filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 53, p. 1640–1648, 2006. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:9640277>>. 67
- 110 LISERRE, M. et al. Design and control of an lcl-filter-based three-phase active rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 41, n. 5, p. 1281–1291, 2005. 70

-
- 111 Texas Instruments. Basic calculation of a buck converter's power stage. 2011. [74](#)
- 112 UNIPOWER Série UP: Bateria Chumbo-Ácida Selada Regulada Por Válvula. *Manual Técnico*, 2003. [77](#)
- 113 KANTAR, E. et al. Lcl-filter design for low-voltage high-power grid-tied voltage-source converter considering various damping methods. *American Economic Journal: Applied Economics*, p. 1–8, 2016. [88](#)