



**Universidade Federal da Bahia
Escola Politécnica
Colegiado do Curso de Eng. Elétrica**



Ricardo Augusto de Araújo Machado

Título do Projeto de TCC

Orientador: Prof. Dr. André Pires Nóbrega Tahim

Salvador-Ba – Brasil
2025

Sumário

1	INTRODUÇÃO	3
2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE ESTUDO	5
2.1	Objetivo Geral	7
2.2	Objetivos Específicos	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
4	SOLUÇÃO E AVALIAÇÃO DA PROPOSTA	13
4.1	Solução Proposta	13
4.2	Avaliação da Solução	13
5	RESULTADOS PRELIMINARES	15
6	CRONOGRAMA E RECURSOS	17
6.1	Cronograma	17
6.2	Recursos	17
	REFERÊNCIAS	19

1 Introdução

Atualmente, o setor de transportes corresponde a 30% e 31% da matriz energética dos Estados Unidos e dos países da União Europeia, respectivamente ([U.S. Energy Information Administration, 2024](#)) e ([Eurostat, 2024](#)). Tendo em vista que é necessário reduzir a emissão de gases do efeito estufa significativamente nos próximos anos, a eletrificação do setor automobilístico é uma medida importante para atingir o objetivo supracitado. Ao mesmo tempo, a ausência de uma infraestrutura de carregamento robusta e a falta de autonomia são os maiores gargalos para a adoção em massa de veículos elétricos.

O desenvolvimento de uma infraestrutura de carregamento deve ser planejado para não sobrecarregar a rede elétrica e respeitar tanto a norma da Aneel N° 414/201, que limita o fator de potência para valores a partir de 0,92 quanto as normas relativas à distorção harmônica máxima permitida como, por exemplo, a norma europeia IEC 61000-3-2 e a norma chinesa GB 17625.1-2022 . Dessa forma, um carregador de veículo elétrico obrigatoriamente precisa apresentar um estágio ativo de correção do fator de potência. Ademais, a fim de garantir uma maior autonomia para essa categoria de veículos, é necessário que os carregadores forneçam uma potência suficientemente alta.

Os carregadores de veículos elétricos podem ser *on-board* ou *off-board*. No primeiro caso, o veículo é conectado diretamente à rede elétrica e o circuito de potência interno do automóvel realiza a retificação da tensão de entrada CA para CC. No último caso, as estações de carregamento realizam o processo de retificação e conversão de energia e fornecem para o veículo uma tensão de alimentação CC.

Considerando os desafios existentes para a utilização em massa de veículos elétricos, este trabalho visa projetar e simular um carregador *on-board* trifásico bidirecional completo, incluindo tanto o estágio do PFC quanto o estágio do conversor CC-CC.

2 Definição do Problema de Estudo

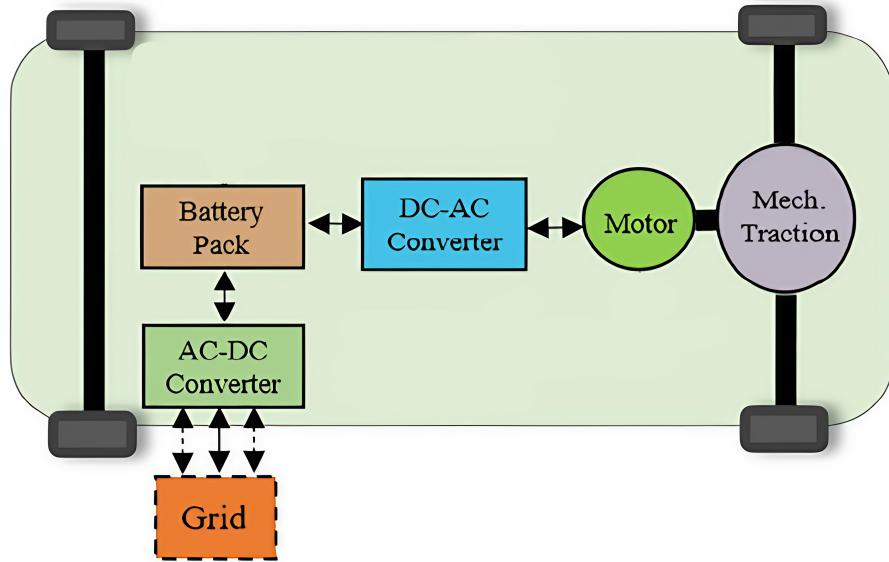
A estrutura básica de um veículo elétrico é exibida na Figura 1. O bloco conversor CA-CC no diagrama representa todo o carregador *onboard* do veículo elétrico, incluindo tanto o retificador PFC quanto o conversor CC-CC isolado. O sistema de carregamento pode ser unidireccional ou bidireccional. No primeiro caso, o sistema apenas converte a energia da rede elétrica para o veículo, enquanto no segundo caso, o veículo pode fornecer energia de volta para a rede elétrica, o que é conhecido como *Vehicle-to-Grid* (V2G). O banco de baterias do veículo é composto por células de lítio e ultracapacitores, que são utilizados para armazenar a energia elétrica fornecida pelo carregador. O inversor é responsável por converter a tensão CC da bateria em uma tensão CA, que aciona o motor do sistema de tração do veículo. Como ilustrado no diagrama, o inversor geralmente é bidireccional, o que permite o uso de frenagem regenerativa.

Os carregadores de veículos elétricos são divididos em carregadores *onboard*(OBC) e *offboard*. Os carregadores *onboard* são instalados dentro do veículo e são projetados para serem leves e compactos, devido a restrições de espaço e peso. A potência de saída desses carregadores está na faixa de 0 a 7 kW para sistemas monofásicos e de 0 a 22 kW para sistemas trifásicos ([YUAN et al., 2021](#)). Já os carregadores *offboard* também são chamados de carregadores nível 3 e já fornecem uma tensão CC direta para o veículo, ignorando o OBC conforme ilustrado na Figura 2. A potência de saída desses carregadores é significativamente maior, variando de 120 kW a 240 kW, segundo ([Texas Instruments, 2020b](#)).

A crescente demanda por veículos elétricos é impulsionada pela necessidade de reduzir emissões de gases do efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis. De acordo com ([ANFAVEA; Boston Consulting Group \(BCG\), 2024](#)), num cenário de transição gradual, é previsto que 65% da frota de veículos no Brasil seja elétrica até 2035. No entanto, a adoção em massa de veículos elétricos enfrenta gargalos significativos, especialmente no que diz respeito à falta de infraestrutura de carregamento e à baixa autonomia dos veículos elétricos ([KARNEDDI; RONANKI; FUENTES, 2021](#)).

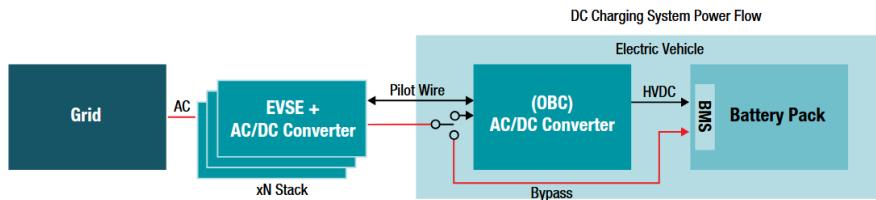
Ademais, os carregadores de veículos elétricos devem ser projetados para não afetar de forma significativa a rede de distribuição elétrica, principalmente em relação ao fator de potência e a distorção harmônica total. Nesse quesito, a normas técnicas IEC 61000-3 e GB/T 14549, vigentes na União Europeia e na China, respectivamente, estabelecem limites de distorção harmônica total e fator de potência para equipamentos conectados à rede elétrica. No Brasil, a seção VIII da resolução 1000/2021 da ANEEL estabelece o fator de potência mínimo de 0,92 para consumidores do grupo A, com cobrança de multa

Figura 1 – Estrutura básica de um veículo elétrico.



Fonte: Adaptado de ([KUMAR; USMAN; RAJPUROHIT, 2021](#)).

Figura 2 – Sistema de carregamento *offboard*. Há uma conexão direta entre o carregador e a bateria do veículo.



Fonte: ([Texas Instruments, 2020b](#)).

para excesso de energia reativa ([ANEEL, 2021](#)).

Considerando os desafios encontrados para a crescente demanda em veículos elétricos, o seguinte trabalho propõe o projeto de um carregador *onboard* que seja adequado à realidade do sistema de distribuição brasileiro. Dessa forma, escolhe-se trabalhar com um sistema de carregamento trifásico que funcione com a rede de distribuição elétrica das grandes capitais brasileiras, caracterizada por uma tensão de fase de $127\text{ V}_{\text{rms}}$ e uma frequência de 60 Hz. O carregador será composto por um retificador PFC trifásico, que garante o fator de potência próximo a unidade, e um conversor CC-CC isolado, que pode ser um *Phase-Shifted Full Bridge*, um *Dual Active Bridge*(DAB) ou um conversor ressonante. No trabalho será realizado a comparação entre o *Phase-Shifted Full Bridge* e o DAB com o objetivo de verificar qual topologia apresenta melhor desempenho.

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é projetar um carregador de veículo elétrico *onboard* trifásico, composto por um retificador PFC e um conversor CC-CC isolado.

2.2 Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica sobre as diferentes topologias utilizadas nos carregadores de veículos elétricos;
- Projeto do circuito retificador PFC trifásico;
- Sintonia do controlador do retificador PFC trifásico;
- Revisão bibliográfica sobre conversores CC-CC isolados;
- Projeto do conversor CC-CC *Phase-Shifted Full Bridge*;
- Projeto do conversor CC-CC *Dual Active Bridge*(DAB);
- Comparação entre o *Phase-Shifted Full Bridge* e o DAB.
- Integração dos estágios do carregador.

3 Revisão Bibliográfica

O artigo de (YUAN et al., 2021) faz uma revisão sistemática sobre carregadores *onboard* bidirecionais e aborda sobre os principais modelos comerciais presentes no mercado. Dentro os sistemas de carregamento trifásico citados há o carregador trifásico da *Current Ways* que oferece uma potência de saída de até 26,4 kW, uma tensão de saída na faixa de 250 V a 425 V e eficiência em torno de 96 %. A estrutura interna do carregador é composta por retificador PFC ativo de ponte completa e um conversor CC-CC isolado DAB. Já o carregador da *EATON* fornece uma potência de saída de até 22 kW com uma tensão de saída na faixa de 225 V a 500 V e eficiência de 95 %. A empresa não detalha sobre a composição interna do carregador.

O texto de (YUAN et al., 2021) também revisa as principais tecnologias que são utilizadas atualmente nos carregadores.

(BAHAROM; HAYROMAN, 2024) comentam sobre futuros avanços tecnológicos no carregamento de veículos elétricos. O texto aborda especificamente sobre os desafios de desenvolver um carregador onboard bidirecional, que incluem a dificuldade de gerenciar o fluxo de potência em ambos os sentidos, a complexidade necessária para o sistema de controle e a integração desses sistemas com a rede elétrica existente. Ademais, o artigo aborda sobre o carregamento indutivo sem fio e justifica a necessidade em pesquisa nessa tecnologia com base na maior segurança e menor necessidade de manutenção obtida. Ao mesmo tempo, os autores reconhecem que a limitação na transferência de potência sem fios e a baixa eficiência inviabilizam esse sistema na prática.

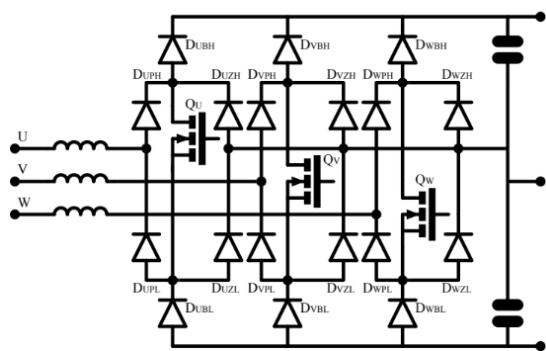
De acordo com (KUMAR; USMAN; RAJPUROHIT, 2021), os conversores CA-CC bidirecionais, que estão presentes em carregadores de carros elétricos, apresentam desafios em relação a sincronização de frequência e fase, controle do fator de potência e qualidade de isolamento.

Os *application notes* (ON Semiconductor, 2014) e (Texas Instruments, 2020a) apresentam uma visão geral sobre o controle do fator de potência ativo com um conversor boost monofásico. Esse conversor pode operar tanto em modo de condução contínua (CCM) quanto em modo de condução crítica (CRM). Em CCM, o conversor é controlado através do controle pelo modo de corrente média. Nesse cenário, a malha de controle externa é lenta e tem o papel de ajustar o valor de tensão de saída enquanto que a malha de controle de corrente(interna) é mais rápida e visa fazer com que a corrente média do indutor siga a forma de onda de uma entrada de referência senoidal que esteja em fase com a tensão da rede. Já a operação em CRM é adequada apenas para uma potência de saída abaixo de 300 W e caracteriza-se pelo controle através de um sinal PWM com frequência de

cheaveamento variável e tempo ON constante.

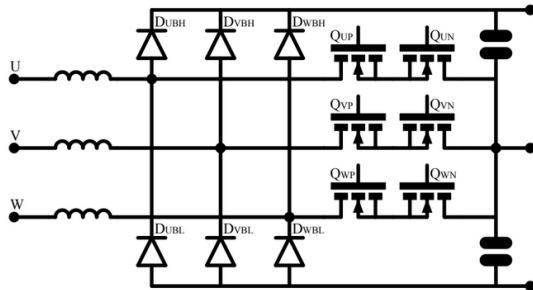
O artigo da ONSEMI ([ON Semiconductor, 2021](#)) aborda as principais topologias de retificadores PFC trifásicos. A primeira topologia citada é o retificador PWM Vienna (Fig. 3), que é caracterizada como uma ponte retificadora trifásica conectada a uma conversor boost por fase. A topologia Vienna tem como principal vantagem o uso de apenas um transistor por fase, o que simplifica significativamente o controle do conversor e o cheaveamento em três níveis, ao mesmo tempo, o alto número de diodos nessa topologia implica em maiores perdas. Já topologia T-NPC (Fig. 4) é derivada da Vienna e consiste basicamente numa ponte de diodos trifásica conectada a seis transistores. A principal vantagem dessa topologia é o menor número de componentes em relação à anterior. Ambas as topologias citadas são unidirecionais. Ademais, a topologia T-NPC pode ser implementada apenas com transistores, o que a torna bidirecional.

Figura 3 – Retificador PFC Vienna.



Fonte: ([ON Semiconductor, 2021](#))

Figura 4 – Retificador T-NPC.

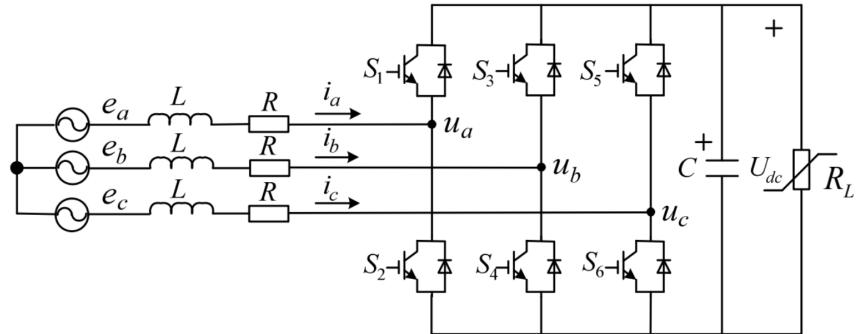


Fonte: ([ON Semiconductor, 2021](#))

A principal topologia de retificador PFC trifásico é o *Six-switch rectifier* vista na Figura 5, que consiste numa ponte trifásica formada por seis transistores de tensão nominal na faixa de 900 V a 1200 V. A principal vantagem dessa topologia é a bidirecionalidade, inclusive porque o inversor trifásico a seis transistores é frequentemente utilizado no acionamento de motores elétricos ([ON Semiconductor, 2021](#)). Ao mesmo tempo, esse retificador apresenta maior interferência eletromagnética que as outras opções citadas e opera com chaveamento em dois níveis.

Em relação ao retificador PFC trifásico, tanto ([SCHÖNBERGER, 2013](#)) quanto ([WANG et al., 2013/03](#)) realizam o controle do conversor CA-CC por meio da transformada de Park. Nessa metodologia, um *Phase Locked Loop* (PLL) captura a referência de fase da tensão de entrada, que em seguida é utilizada na transformação para o sistema de coordenadas dq0. Ademais, duas malhas de controle, uma externa, referente à tensão de saída do retificador e uma interna, que controla as componentes de eixo direto e em quadratura da corrente de entrada. Como o objetivo é controlar o fator de potência, a componente de corrente em quadratura é ajustada para ser nula.

Figura 5 – Retificador trifásico PFC de ponte completa.



Fonte: ([WANG et al., 2013/03](#))

A nota de aula ([LEVRON; BELIKOV, 2021](#)) explica sobre como aplicar a Transformada de Park em um modelo de circuito trifásico modelado em espaços de estados. Já o livro () aborda sobre os quadros de referência $\alpha\beta$ e $dq0$, utilizados na Transformada de Clarke e na Transformada de Park, respectivamente.

O *application note* da ([Infineon Technologies, 2021](#)) aborda sobre as principais topologias de conversores CC-CC isolados utilizados nos carregadores *onboard* de veículos elétricos. O *Phase Shifted Full Bridge* é composto por uma ponte completa ativa, um transformador e uma ponte retificadora e caracteriza-se pela alta eficiência, uso de comutação suave e controle do fluxo de potência pelo ajuste da desfasagem de tensão entre os dois braços da ponte de transistores. O *Dual Active Bridge* substitui os diodos da ponte retificadora por transistores, permitindo a bidirecionalidade. Para garantir maior eficiência, o conversor ressonante LLC é utilizado por conta da capacidade de operar com *Zero Voltage Switching*(ZVS). Ao mesmo tempo, os conversores ressonantes apresentam maior complexidade, pois são controlados com frequência variável ao invés de uma razão cíclica variável.

4 Solução e Avaliação da Proposta

4.1 Solução Proposta

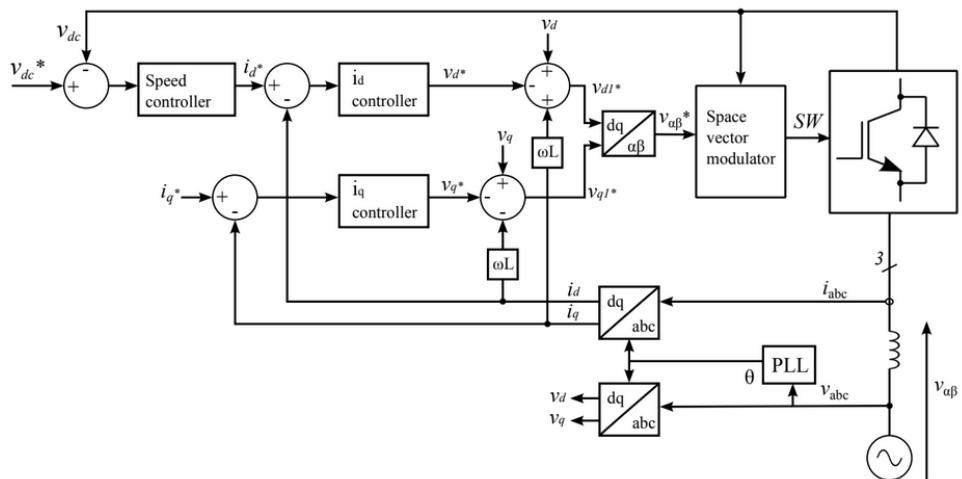
A solução proposta nesse trabalho de conclusão de curso é o projeto de um carregador *onboard* trifásico que seja projetado para operar na rede elétrica presente nas principais cidades brasileiras, com tensão de fase de $127 V_{rms}$. A primeira etapa do trabalho consiste no projeto de um retificador trifásico PFC em ponte completa visto na figura e seu respectivo sistema de controle. A segunda etapa é relativa ao estudo teórico e projeto do conversor *Phase Shifted Full Bridge* e do conversor *Dual Active Bridge*. O objetivo é comparar os dois conversores em termos de desempenho e complexidade de projeto. Ademais, o DAB é também projetado para obter um carregador elétrico bidirecional.

Conforme a Figura 6, o controle do PFC trifásico apresenta uma malha externa de tensão, que compara a tensão de saída do retificador com uma referência de tensão CC. A saída do controlador de tensão é utilizada como referência para a componente de eixo direto da corrente, enquanto que a referência da corrente em quadratura é nula, para garantir o fator de potência unitário.

4.2 Avaliação da Solução

Esta seção deve conter uma explicação de como será feita a avaliação da solução uma vez que ela estiver concluída. O método de avaliação é dependente do projeto e o seu

Figura 6 – Esquema de controle do PFC trifásico.



Fonte: ([SCHÖNBERGER, 2013](#)).

orientador pode guiá-lo para a forma de avaliação mais adequada.

5 Resultados Preliminares

Este capítulo é facultativo! Caso o seu trabalho tenha alcançado algum resultado preliminar, ele deve ser incluído aqui. Deve-se destacar que para qualquer simulação (ou experimento) o aparato utilizado e os procedimentos seguidos para obtenção dos resultados devem ser detalhadamente apresentados. *A descrição da sua simulação (ou experimento) deve conter informações suficientes para que o leitor possa replicá-lo.* Frequentemente figuras bem elaborados conseguem condensar e dar uma ideia esclarecedora de como os resultados foram obtidos, tais como: fotos de bancada, diagrama de blocos, esquemáticos, fluxogramas, etc. É importante para qualquer engenheiro/pesquisador adquirir a habilidade de descrever/ilustrar a essência de como os resultados foram obtidos.

6 Cronograma e Recursos

6.1 Cronograma

Cada etapa do projeto deve produzir algum resultado. Assim, o processo de planejamento deve produzir um cronograma de metas, indicando quando cada objetivo deve ser concluído. Tal cronograma deve conter objetivos mensuráveis, em que cada etapa produz um resultado específico. Por exemplo, se você pretende utilizar três semanas em leitura de obras, o resultado deve ser uma seção de revisão bibliográfica para o seu trabalho de final de graduação e não apenas a leitura das obras. Esta etapa deve conter uma tabela de tarefas a serem realizadas dentro de um período de tempo determinado para alcançar cada objetivo específico.

6.2 Recursos

Apresente uma estimativa do que será necessário para realizar o projeto. Indique os recursos de hardware, software ou orçamento necessário para realizar o projeto. Esta etapa é importante para destacar a viabilidade do projeto. Dessa forma, qualquer ferramenta necessária para execução do projeto e sua disponibilidade deve estar incluída nesta seção.

Tabela 1 – Lista de recursos para o trabalho de conclusão de curso.

Recurso	Categoria
Computador	Recurso Físico
Osciloscópio	Recurso Físico
Fonte CC	Recurso Físico
Carga Eletrônica	Recurso Físico
MATLAB	Software
PSIM	Software

Referências

ANEEL. *Resolução Normativa Nº. 1000, de 7 de dezembro de 2021: Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica.* Brasília, DF, Brasil, 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Citado na página 6.

ANFAVEA; Boston Consulting Group (BCG). *Avançando nos Caminhos da Descarbonização Automotiva no Brasil.* 2024. Relatório/PPT. Slide BCG + ANFAVEA. Disponível em: <<https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2024/09/Anfavea-Avancando-nos-Caminhos-da-Descarbonizacao-2024-Publicacao.pdf>>. Citado na página 5.

BAHAROM, R.; HAYROMAN, M. H. A comprehensive review on advancements in battery charger technologies for electric vehicles. In: *2024 IEEE Industrial Electronics and Applications Conference (IEACon).* [S.l.: s.n.], 2024. p. 190–195. Citado na página 9.

Eurostat. *Final energy consumption in transport - detailed statistics.* 2024. Accessed on May 2, 2025. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_transport_-_detailed_statistics>. Citado na página 3.

Infineon Technologies. *MOSFET CoolMOS™ CFD7A 650V Application Notes.* [S.l.], 2021. Application Note. Disponível em: <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-MOSFET_CoolMOS_CFD7A_650V-ApplicationNotes-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d462712ef9b70171820c6e011ac4>. Citado na página 11.

KARNEDDI, H.; RONANKI, D.; FUENTES, R. L. Technological overview of onboard chargers for electrified automotive transportation. In: *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6. Citado na página 5.

KUMAR, S.; USMAN, A.; RAJPUROHIT, B. S. Battery charging topology, infrastructure, and standards for electric vehicle applications: A comprehensive review. *IET Energy Systems Integration*, v. 3, n. 4, p. 381–396, 2021. Disponível em: <<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/esl2.12038>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 9.

LEVRON, Y.; BELIKOV, J. *Lecture 2: The Direct-Quadrature-Zero (DQ0) Transformation.* 2021. Lecture notes. Accessed: 2025-05-02. Citado na página 11.

ON Semiconductor. *Power Factor Correction (PFC) Handbook.* [S.l.], 2014. Document Number: HBD853/D. Disponível em: <<https://www.onsemi.com/pub/collateral/hbd853-d.pdf>>. Citado na página 9.

ON Semiconductor. *Designing High-Efficiency Power Factor Correction Circuits for Today's Power Supplies.* [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.onsemi.com/site/pdf/H2PToday2102_design_ONSemi.pdf>. Citado na página 10.

SCHÖNBERGER, J. *Space Vector Control of a Three-Phase Rectifier using PLECS*. Zurich, Suíça, 2013. 5 p. Citado 2 vezes nas páginas [10](#) e [13](#).

Texas Instruments. *Power Factor Correction (PFC) Circuit Basics*. [S.l.], 2020. Document Number: ZHCP224. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ml/zhcp224/zhcp224.pdf>>. Citado na página [9](#).

Texas Instruments. *Taking charge of electric vehicles – both in the vehicle and on the grid*. [S.l.], 2020. Discusses onboard chargers, EV BMS integration and charging architectures. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/wp/szzy007a/szzy007a.pdf?ts=1751792934381>>. Citado 2 vezes nas páginas [5](#) e [6](#).

U.S. Energy Information Administration. *Use of Energy for Transportation - Explained*. 2024. Accessed on May 2, 2025. Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/transportation.php>>. Citado na página [3](#).

WANG, W. et al. A novel control strategy for three-phase rectifier. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013)*. Atlantis Press, 2013/03. p. 1793–1796. ISBN 978-90-78677-61-1. ISSN 1951-6851. Disponível em: <<https://doi.org/10.2991/iccsee.2013.449>>. Citado 2 vezes nas páginas [10](#) e [11](#).

YUAN, J. et al. A review of bidirectional on-board chargers for electric vehicles. *IEEE Access*, v. 9, p. 51501–51518, 2021. Citado 2 vezes nas páginas [5](#) e [9](#).