



**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	11
4.1	Solução Proposta	11
4.2	Avaliação da Solução	11
5	RESULTADOS PRELIMINARES	13
6	CRONOGRAMA E RECURSOS	15
6.1	Cronograma	15
6.2	Recursos	15
	REFERÊNCIAS	17

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

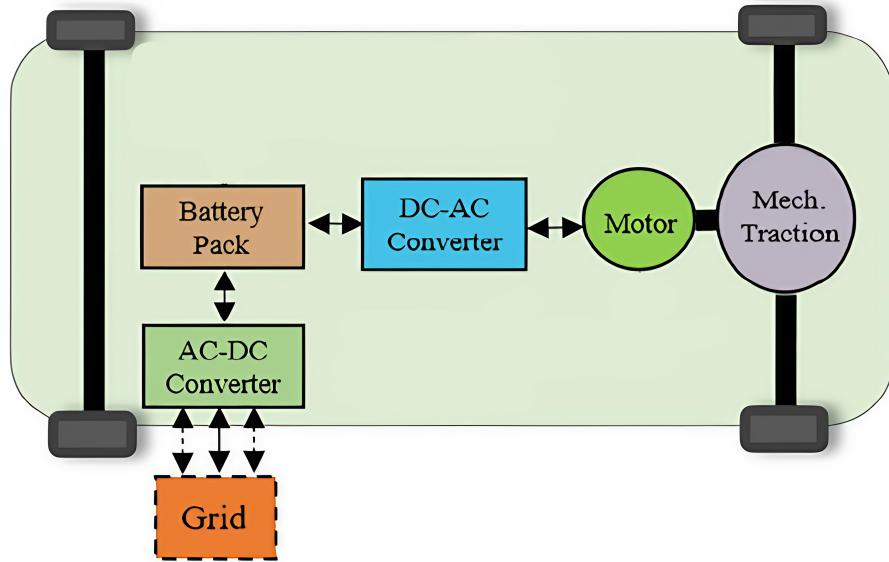
A estrutura básica de um veículo elétrico é exibida na Figura 1. O bloco conversor CA-CC no diagrama representa todo o carregador *onboard* do veículo elétrico, incluindo tanto o retificador PFC quanto o conversor CC-CC isolado. O sistema de carregamento pode ser unidireccional ou bidireccional. No primeiro 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 em [1](#). A potência de saída desses carregadores é significativamente maior, variando de 120 kW a 240 kW, segundo ([Texas Instruments, 2020](#)).

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](#)).

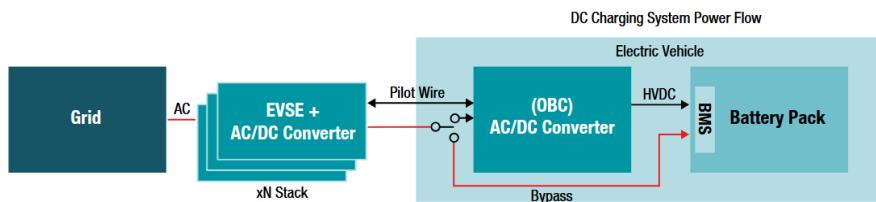
Ademais, os carregadores de veículos elétricos devem ser projetados para não afetar de forma significativa a rede de distribuição elétrica, principalmente em relação ao fator de potência e a distorção harmônica total. Nesse quesito, a normas técnicas IEC 61000-3 e GB/T 14549, vigentes na União Europeia 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 para excesso de energia reativa ([ANEEL, 2021](#)).

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, 2020](#)).

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

- Realizar revisão bibliográfica sobre as diferentes topologias utilizadas no carregamento de carros elétricos;
- Projeto do circuito retificador PFC trifásico;
- Sintonia do controlador do retificador PFC trifásico;
- Projeto do conversor CC-CC *Phase-Shifted Full Bridge*;
- Projeto do conversor CC-CC *Dual Active Bridge*(DAB);
- Comparaçāo entre o *Phase-Shifted Full Bridge* e o DAB.

3 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo reúne-se as fontes de pesquisa que vão fornecer o embasamento teórico para o seu trabalho. É na revisão da literatura onde deve-se apresentar os trabalhos relacionados ao tema ou cuja solução pode ser aplicada ao problema de estudo. A revisão bibliográfica não é um conjunto de trecho de obras, mas uma apresentação pessoal e crítica dos trabalhos anteriormente realizados. Recomenda-se realizar uma revisão bibliográfica com os seguintes passos:

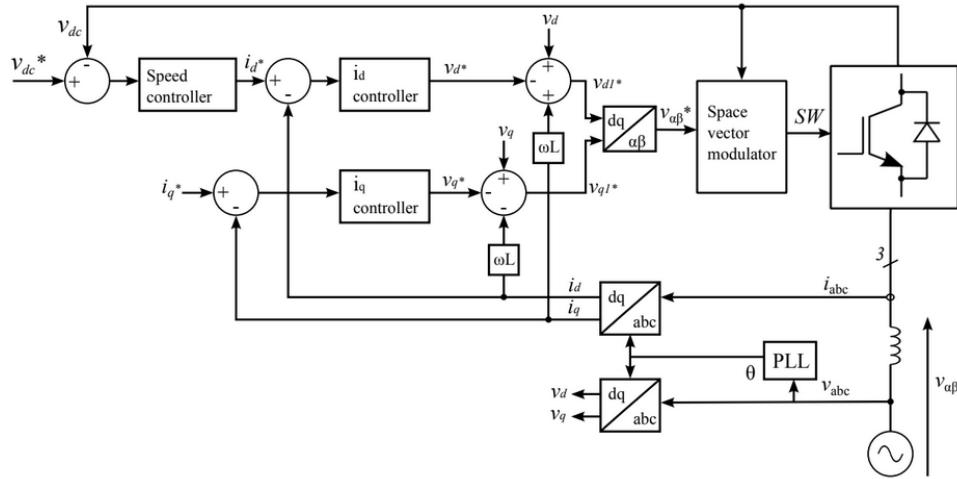
1. Escolha boas referências – Encontre autores e obras especializadas no tema do seu trabalho de TCC.
2. Analise as referências – Verifique se as referências têm relação direta com o recorte do seu problema.
3. Crie um padrão – Esse padrão pode ser cronológico, ou pode ser classificada por tipo de solução. Ex. Um problema de controle pode ser abordado por técnicas de controle lineares e não-lineares. Assim, a sua revisão pode ser dividida por ordem cronológica em que os trabalhos foram apresentados ou classificados por soluções de controle lineares e não-lineares.
4. Faça uma análise crítica das referências – Leia as obras, analise-as e faça anotações. Sintetize o conteúdo de cada obra e reflita sobre cada teoria/solução apresentada de modo a destacar a sua visão crítica. Dessa forma, a sua revisão não será um mero enxerto de passagens da literatura.

De acordo com ([KUMAR; USMAN; RAJPUROHIT, 2021](#)), os conversores CA-CC bidirecionais apresentam desafios em relação a sincronização de frequência e fase, controle do fator de potência e qualidade de isolamento.

Os *application notes* () e () 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 controle é

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

Figura 3 – Esquema de controle do PFC trifásico.



Fonte: ([SCHÖNBERGER, 2013](#)).

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.

Conforme a figura 3, o controle do PFC trifásico

4 Solução e Avaliação da Proposta

4.1 Solução Proposta

Esta seção é destinada a explicação de como você resolverá o problema, ou como você pretende realizar o projeto. Neste estágio é preciso estar claro o que você irá fazer, mas flexível o suficiente para adaptar a solução a adversidades encontradas durante a realização do projeto. A escrita da proposta da solução não o previne do insucesso, mas permite que você identifique diversos problemas com antecedência. Note que a metodologia descrita aqui é dependente do tipo de projeto do seu TCC. Você deve discutir com seu orientador sobre isso.

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 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.

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 5.

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.

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.

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/esi2.12038>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 9.

SCHÖNBERGER, J. *Space Vector Control of a Three-Phase Rectifier using PLECS*. Zurich, Suíça, 2013. 5 p. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

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 na página 9.

YUAN, J. et al. A review of bidirectional on-board chargers for electric vehicles. *IEEE Access*, v. 9, p. 51501–51518, 2021. Citado na página 5.