

Marcos Willian de Sales Reis

# **Análise comparativa de conversores aplicados ao carregamento dinâmico de veículos elétricos**

Belo Horizonte

2022



Marcos Willian de Sales Reis

## **Análise comparativa de conversores aplicados ao carregamento dinâmico de veículos elétricos**

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista. Área de estudo: Eletrônica de potência, Eletromagnetismo

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Thiago Ribeiro de Oliveira

Belo Horizonte

2022



*Este trabalho dedica-se a toda a população no intuito  
de gerar conhecimento e evolução.*



# Agradecimentos

Os agradecimentos são essencialmente para a minha família e noiva que sustentou financeiramente e estruturalmente a minha caminhada no curso de graduação.

Também agradeço todos os professores que se doaram para gerar conhecimento e desenvolvimento, não só à mim, mas também a todas as gerações de alunos e alunas. Em especial meus agradecimentos ao professor Thiago Ribeiro de Oliveira pela atenção e força na produção do presente trabalho.





*“Aquele que testifica estas coisas diz:  
Certamente cedo venho, Amém.  
Ora vem, senhor Jesus.”  
(Bíblia Sagrada, Apocalipse 22, 20)*



# Resumo

O aumento dos gases poluentes na atmosfera e a preocupação com a crise energética favorece a produção de veículos elétricos (VE). Como consequência, existe a necessidade de implementar a infraestrutura fundamental para os VE. A transferência de energia sem fio (Wireless Power Transfer - WPT) é realizada pela aplicação de campos eletromagnéticos através de uma bobina transmissora. A energia transmitida pela bobina, é captada por uma outra bobina receptora e pode ser usada para trabalho útil. Uma aplicação do WPT é o carregamento dinâmico de veículos elétricos. O carregamento dinâmico consiste em transmitir energia para o carro durante o seu movimento. Essa tecnologia pode aliviar algumas dificuldades dos veículos elétricos como a baixa autonomia, preço alto e tempo de carregamento. Este estudo realiza uma análise comparativa de conversores de potência utilizados na tecnologia de WPT, com ênfase no carregamento dinâmico. Além disso, é realizada uma investigação sobre as características do conversor CA/CC de entrada. O objetivo deste estudo é apontar possíveis topologias mais adequadas para o carregamento dinâmico e as suas características desejáveis. Foi realizada uma revisão de literatura específica sobre conversores utilizados no carregamento dinâmico e, em seguida, uma simulação da topologia preferida alternando o conversor CA/CC de entrada. Os conversores CA/CC simulados foram o SEPIC e o Boost Full-Bridge. Os resultados indicam que a topologia preferida possui dois estágios no primário que são: conversor CA/CC semelhante ao SEPIC seguido de um conversor CC/CA em ponte completa. O circuito de compensação é o LCC no primário e no secundário. E por fim, deve existir um conversor CA/CC no secundário.

**Palavras-chaves:** Conversor. Topologias. Transferência de energia sem fio. Indução. Veículos elétricos. Carregamento dinâmico. Carregadores



# Abstract

The increase in polluting gases in the atmosphere and the concern about an energy crisis promotes the production of electric vehicles (EV). As a consequence, there is a need to implement the fundamental infrastructure for EVs. Wireless power transfer (WPT) is performed by applying electromagnetic fields through a transmitter coil. The energy transferred by the coil is captured by a another receiving coil and can be used for useful work. One application of the WPT is the dynamic charging of electric vehicles. The dynamic charging consists of transmitting energy to the car during its movement. This technology can alleviate some difficulties of electric vehicles such as low autonomy, high price and loading time. This study performs a comparative analysis of power converters utilised on WPT technology, with emphasis in the dynamic charging. In addition, it is an investigation was carried out on the characteristics of the input AC/DC converter. The objective of this study is to point out the most suitable topologies for dynamic loading and their desirable characteristics. A specific literature review on converters applied in the dynamic charging was performed and then was carried out a simulation of the preferred topology switching the input AC/DC converter. The AC/DC converters simulated were the SEPIC and the Boost Full-Bridge. The results indicate that the preferred topology has two stages in the primary which are: AC/DC converter similar to the SEPIC followed by a Full bridge DC/AC converter. The compensation circuit is the LCC in the primary and secondary. And finally, there must be an AC/DC converter on the secondary.

**Key-words:** Converter. Topologies. Wireless power transfer. Induction. Electric vehicles. Dynamic Charging. Chargers.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Curva de carga ativa, com 20% de participação de VE's, início de recarga às 19:00 horas. . . . .	29
Figura 2 – Curva de carga ativa, com 20% de participação de VE's, início de recarga à 01:00 hora. . . . .	30
Figura 3 – Diagrama VEH série. . . . .	31
Figura 4 – Diagrama VEH paralelo. . . . .	32
Figura 5 – Diagrama VEH série-paralelo. . . . .	33
Figura 6 – Esquemático conexão condutiva e indutiva . . . . .	38
Figura 7 – Esquemático de um carregador por condução . . . . .	40
Figura 8 – Conversor dois estágios baseado em boost entrelaçado. . . . .	40
Figura 9 – Conversor CA/CC a partir de uma célula fotovoltaica do Level 1. . . . .	41
Figura 10 – Conversor CA/CC Viena com uso para carregamento Level 3. . . . .	42
Figura 11 – Conversor integrado usando o conversor CC/CC bidirecional. . . . .	42
Figura 12 – Conversor integrado usando o motor como indutor. . . . .	43
Figura 13 – Circuito auxiliar para soft-switching em um conversor de ponte completa. . . . .	43
Figura 14 – Topologias de conversores utilizados em carregadores de VE. . . . .	44
Figura 15 – Diagrama de blocos de um sistema de carregamento sem fio. . . . .	46
Figura 16 – Estrutura de um PAD circular. . . . .	49
Figura 17 – Estrutura de um sistema In-Wheel. . . . .	53
Figura 18 – Circuito base utilizado na simulação. . . . .	56
Figura 19 – Circuito SEPIC utilizado na simulação. . . . .	59
Figura 20 – Circuito do conversor CA/CC Full-bridge baseado no Boost utilizado na simulação. . . . .	61
Figura 21 – Conversor matricial derivado da topologia Boost proposto no estudo Samanta e Rathore (2017). . . . .	64
Figura 22 – Comportamento da saída do sistema para os dois conversores e 100% de carga. . . . .	68
Figura 23 – Comportamento na bobina do secundário do sistema para os dois conversores e 100% de carga. . . . .	69
Figura 24 – Comportamento na bobina do primário do sistema para os dois conversores e 100% de carga. . . . .	70
Figura 25 – Comportamento na entrada do inversor do sistema para os dois conversores e 100% de carga. . . . .	71
Figura 26 – Comportamento da saída do sistema para os dois conversores e 20% de carga. . . . .	72

Figura 27 – Comportamento na bobina do secundário do sistema para os dois conversores e 20% de carga. . . . .	73
Figura 28 – Comportamento na bobina do primário do sistema para os dois conversores e 20% de carga. . . . .	74
Figura 29 – Comportamento na entrada do inversor do sistema para os dois conversores e 20% de carga. . . . .	75
Figura 30 – Tensão e corrente da rede considerando os dois conversores e 100% de carga. . . . .	76
Figura 31 – Análise em frequência da corrente de entrada considerando os dois conversores e 100% de carga. . . . .	76
Figura 32 – Tensão e corrente da rede considerando os dois conversores e 20% de carga. . . . .	77
Figura 33 – Análise em frequência da corrente de entrada considerando os dois conversores e 20% de carga. . . . .	77
Figura 34 – Topologia do conversor aplicado ao DWPT mais adequado. . . . .	77



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Padrões SAE e IEC para níveis de potência de carregadores. . . . .	39
Tabela 2 – Modelos de VEB e VEHP com a potência dos seus carregadores . . . . .	45
Tabela 3 – Geometrias de bobinas polarizadas e não polarizadas. . . . .	48
Tabela 4 – Topologias de compensação e suas qualidades . . . . .	50
Tabela 5 – Comparação das topologias analisadas . . . . .	66
Tabela 6 – Eficiência por estágio . . . . .	72
Tabela 7 – Fator de potência e distorção harmônica total (THD) para cada con- versor . . . . .	75



# Lista de abreviaturas e siglas

ABRADEE	Associação Brasileira das Distribuidoras de Energia Elétrica.
CCM	Modo de condução contínuo.
COP	Conferência Geral das Partes.
DCM	Modo de condução descontínuo.
DWPT	Carregamento sem fio dinâmico.
EMI	Interferência eletromagnética.
FP	Fator de potência.
IEC	International Electromechanical Commission.
KAIST	Korea Advanced Institute of Science and Technology.
MCI	Motor a combustão interna.
ME	Motor elétrico.
PFC	Power Factor Correction (Correção do fator de potência).
SAE	Society for Automobile Engineers.
THD	Distorção Harmônica Total.
V2G	Vehicle-to-grid.
VCI	Veículo a combustão interna.
VEB	Veículos puramente elétrico.
VEH	Veículo elétrico híbrido.
VEHP	Veículo elétrico híbrido <i>plug-in</i> .
ZCS	Zero current switching.
ZVS	Zero voltage switching.



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativas</b>	<b>23</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>24</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>24</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO AOS VEÍCULOS ELÉTRICOS</b>	<b>27</b>
<b>2.1</b>	<b>A evolução dos carros elétricos</b>	<b>27</b>
<b>2.2</b>	<b>Desafios energéticos gerados pelo aumento dos veículos elétricos</b>	<b>28</b>
<b>2.3</b>	<b>Veículos elétrico</b>	<b>30</b>
2.3.1	Veículos Elétricos Híbridos	31
2.3.1.1	Configuração série	31
2.3.1.2	Configuração paralela	32
2.3.1.3	Configuração série-paralelo	32
2.3.2	Grau de hibridização	33
2.3.2.1	Veículo elétrico híbrido <i>plug-in</i>	33
2.3.3	Veículos puramente elétricos	34
2.3.4	Componentes importantes	34
<b>2.4</b>	<b>Conclusões do capítulo</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Carregadores de veículos elétricos</b>	<b>37</b>
3.1.1	Carregadores por condução	39
3.1.2	Carregadores wireless	44
3.1.2.1	Métodos WPT	46
3.1.2.2	Topologias dos transmissores	47
3.1.2.3	Redes de compensação	47
3.1.2.4	Carregamento estático	49
3.1.2.5	Carregamento dinâmico	51
3.1.2.6	Padronização	52
3.1.2.7	Trabalhos futuros	52
<b>3.2</b>	<b>Conclusões do capítulo</b>	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Pesquisa bibliográfica</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulação - Definição dos conversores de entrada</b>	<b>55</b>

4.2.0.1	Circuito base . . . . .	56
4.2.1	Conversor CA/CC SEPIC . . . . .	57
4.2.2	Conversor CA/CC Full-Bridge derivado do Boost . . . . .	59
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>Análise das informações geradas pela pesquisa bibliográfica . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise do conversor de entrada - Simulação . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>5.3</b>	<b>Conclusões do capítulo . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>6.1</b>	<b>Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>81</b>

# 1 Introdução

O aumento da quantidade de gases do efeito estufa na atmosfera e o início do fim dos combustíveis fósseis tem preocupado as nações. Para tentar contornar esses problemas, várias nações têm se unido a fim de buscar soluções para diversificar a matriz energética e impor restrições e metas quanto à poluição. Um dos setores que é uma boa escolha para aplicar essas medidas é o setor de transporte, mais especificamente por meio dos veículos elétricos.

Existem três fatores que impulsionam os investimentos em veículos elétricos (CASTRO; FERREIRA, 2010). O primeiro é a superação tecnológica representado principalmente pela inovação da bateria. A tecnologia Lítio-ion, muito usada para dispositivos eletrônicos como celulares, começou a ser usada para veículos elétricos fornecendo uma autonomia bem maior que as usadas inicialmente, que eram de chumbo ácido. Além disso a tecnologia atual dos semicondutores produzem chaves de alta potência e boa velocidade o que permite um controle muito mais eficaz do uso da energia das baterias.

A segunda é a segurança energética. A crise de petróleo de 1973 fez com que o preço dos combustíveis fósseis subisse bastante, gerando grandes gastos para aquelas economias que dependiam do combustível fóssil, tanto para geração de energia quanto para o consumo em veículos. Assim diversificar a produção e o uso de energia é uma estratégia dos governos. Por exemplo, o Brasil tem diversificado os tipos de combustíveis disponíveis para a população através do etanol e do biodiesel, assim diversificando a energia gasta para a locomoção.

O terceiro é a questão ambiental. Em 2004 o setor de transporte era responsável por 23% das emissões de gases do efeito estufa e se continuar nessa projeção, a temperatura média global poderá subir em 6°C colocando em risco a saúde do planeta (CASTRO; FERREIRA, 2010; BERNSTEIN et al., 2008).

Por estes motivos os governos do mundo todo têm incentivado o mercado de veículos elétricos. Por exemplo, os Estados Unidos fornece um subsídio de até US\$ 7.500,00 para a compra de VE's, no Reino Unido o incentivo é de 25% do valor do automóvel. Também, em algumas províncias do Canadá é fornecido um desconto de US\$ 2.000,00 na venda de veículos elétricos. Ainda, existe iniciativas mundiais como o EV30@30 (IEA, 2021).

Com esses incentivos, o número de vendas mundial de VE's cresceu cerca de 41% em 2020. Esse crescimento foi maior que o crescimento de qualquer outro tipo de veículo na mesma data, chegando a marca de 10 milhões de VE's comprados. Isso representa 1% da frota mundial. Para a década de 2020 é esperado um grande crescimento no mercado

de veículos elétricos de modo que, em 2030 as vendas de VE representará 12% do total de vendas em transporte e os veículos elétricos serão 7% da frota mundial (IEA, 2021). Esses números incluem veículos elétricos puros e híbridos.

O Brasil também se comprometeu com as metas assinadas na Conferência Geral das Partes. Um estudo mostra que os veículos são responsáveis por 34% das partículas de poluição emitidas no Brasil (LUNA et al., 2019). Nesse sentido, para reduzir a emissão de gases poluentes, o governo tem investido no setor automotivo abordando duas estratégias. A primeira é o uso do biocombustível (etanol e biodiesel). O biocombustível é considerado uma energia limpa devido à possibilidade de compensar a emissão de gases poluentes através do replantio de, por exemplo, cana-de-açúcar. Um estudo mostra que, comparado com o uso de veículos elétricos, os ganhos ambientais e financeiros do uso de biocombustíveis é maior (NETO; PIMENTEL; SANTOS, 2021). Contudo, não é levado em conta os gases gerados pela produção do combustível e também que os veículos a combustão são bem menos eficientes que os VE's. Além disso, a poluição do ar será concentrada nas cidades, trazendo prejuízos à saúde. A segunda abordagem é ampliar o uso de veículos elétricos e como no Brasil a matriz de produção de energia é praticamente limpa (MAGALHÃES et al., 2009), essa abordagem é interessante. Por isso foram implementados alguns incentivos para aumentar a quantidade de VE's aqui no Brasil.

Embora os impostos ainda sejam altos no setor automotivo, em sete estados do Brasil o IPVA de veículos elétricos está reduzido e em outros estados o imposto de importação é bem menor para VE's do que para veículos à combustão interna, variando entre 0 e 7% (ZANETI, 2018). Em São Paulo, os veículos elétricos passam a não fazer parte do rodízio municipal. Além disso, planeja-se criar uma área livre de circulação de carros com combustão interna. O projeto Noronha Carbono Zero (CEBDS, 2019) lançado em 2013, começou a ser implantado em 2019 e regulamenta a entrada, permanência e saída de veículos elétricos no arquipélago de Fernando de Noronha. A segunda etapa é a proibição de veículos a combustão na ilha.

Outras iniciativas também foram implementadas. A ABVE <sup>1</sup> foi criada em 2006 com o objetivo de promover o uso de veículos elétricos através de uma rede de benefícios (ZANETI, 2018). Em 2008, iniciou-se o programa de P&D ANEEL, Projetos em Mobilidade Elétrica, que tinha como integrantes concessionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica. Durante 2008 à 2016, dezesseis projetos foram iniciados e desenvolvidos através do P&D ANEEL (MALDONADO, 2019). Já o Projeto Emotive planeja a constituição de um laboratório real de mobilidade elétrica na região metropolitana de Campinas (SA, 2018). O projeto também realizou estudos sobre a implantação de VE no Brasil, além de instalar diversos eletropostos e fomentar o uso de veículos elétricos. Além disso, o projeto PROMOB-E favoreceu a troca de experiências com o governo

---

<sup>1</sup> Associação Brasileira de Veículos Elétricos



alemão, por meio de oficinas e visitas técnicas, para ajudar na definição e solução do problema de eletromobilidade no Brasil (ZANETI, 2018).

Esses incentivos já estão dando resultados. O crescimento de veículos elétricos no Brasil entre os anos de 2018 e 2019 foi de 299% e foi o maior crescimento entre as outras categorias (Gasolina, Flex e Diesel) (NETO; PIMENTEL; SANTOS, 2021). Em 2020 os veículos elétricos representavam 0,11% da frota brasileira (ANFAVEA, 2021). Ademais estima-se que em 2030 os carros elétricos poderão representar 5% da frota brasileira (BCG, 2019), incluindo veículos elétricos puros e híbridos.

Portanto é importante o estudo e o desenvolvimento da infraestrutura necessária para os VE's no Brasil.

Assim, no presente trabalho serão abordadas as tecnologias de conversores de potência usados nos sistemas de carregamento de veículos. Mais precisamente serão estudadas as topologias de conversores usados no carregamento sem fio durante o movimento do veículo. Essa tecnologia é chamada de carregamento sem fio dinâmico (DWPT).

## 1.1 Justificativas

Embora o incentivo para o crescimento de carros elétricos seja vigoroso, ainda existem algumas barreiras para que eles sejam difundidos largamente. O primeiro obstáculo, e o mais urgente, é o preço do veículo (LUNA et al., 2019). Cerca de 50% do preço do veículo é devido à bateria. O segundo se refere a infraestrutura de carregamento. Existe um fenômeno que impede os motoristas de adquirir carros elétricos chamado de *Range Anxiety* (ZANETI, 2018). Ele consiste no medo dos motoristas de VE's de não possuírem bateria suficiente para chegar ao destino. Também o tempo de recarga em carregadores acessíveis ainda é considerado grande, e o investimento para fast-charging é alto (BOTSFORD; SZCZEPANEK, 2009).

Uma alternativa que potencialmente ameniza esses problemas é o carregamento dinâmico. Por a bateria estar em carga durante a sua operação o seu tamanho pode ser diminuído em cerca de 20% (PANCHAL; STEGEN; LU, 2018). A *Range Anxiety* também é atenuada, pois durante o trânsito a bateria estaria sendo carregada. Estudos ainda indicam que o uso do carregamento dinâmico reduz drasticamente a necessidade do carregador fast-charging (AHMAD; ALAM; CHABAAN, 2017).

Ainda que alguns desafios precisem ser superados para o carregamento dinâmico, como o grande gap e problemas de alinhamento, essa tecnologia tem se mostrado promissora. Portanto se faz necessário o estudo dos seus componentes, como os conversores de potência.

## 1.2 Objetivos

Estudar e classificar as topologias de conversores mais utilizadas no carregamento dinâmico, levantando suas características para que uma comparação seja feita. Aqui as características são baseadas na complexidade de produção do conversor, no custo e também as características que são mais vantajosas para o carregamento dinâmico.

Portanto, através da análise de estudos já concluídos, identificar a topologia do conversor mais adequado para o carregamento dinâmico e as características desejáveis desse sistema.

Por fim, através da simulação, analisar o funcionamento do conversor do primeiro estágio e o resto do sistema com o intuito de identificar qual topologia é mais adequada para o carregamento dinâmico, considerando uma potência de trabalho de 10kW.

## 1.3 Metodologia

O trabalho será feito em duas etapas. Primeiramente uma pesquisa bibliográfica será realizada para levantar as topologias que são mais usadas atualmente, classificando-as através de parâmetros como custo e complexidade de produção. Além disso, a classificação levará em conta as características que são mais vantajosas para o carregamento dinâmico.

Em seguida uma simulação será feita com a topologia mais adequada, alternando o conversor CA/CC do primeiro estágio. Os conversores do primeiro estágio avaliados foram o SEPIC e o Full-Bridge derivado da topologia boost.

## 1.4 Estrutura do trabalho

O [Capítulo 1](#) deste trabalho apresenta uma breve introdução sobre o aumento do uso de veículos elétricos e as projeções futuras, no Brasil e no mundo.

O [Capítulo 2](#) contém uma breve apresentação do veículo elétrico, introduzindo conceitos, história e princípios de funcionamento dos sistemas dos veículos elétricos.

Já no [Capítulo 3](#) é realizada uma revisão de literatura dos carregadores de veículos elétricos. É apresentado os tipos, algumas vantagens e desvantagens, bem como termos técnicos.

No [Capítulo 4](#) é apresentada a metodologia a ser seguida. Para o circuito da simulação, é apresentado o processo de cálculo dos componentes.

O [Capítulo 5](#) apresenta os resultados obtidos com a revisão de literatura e com a simulação. A análise dos resultados e a síntese final é apresentada.

O último capítulo, [Capítulo 6](#), são expostas as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.



## 2 Introdução aos veículos elétricos

Este capítulo aborda o surgimento dos veículos elétricos. Em seguida é realizada uma investigação do impacto dos veículos elétricos na rede elétrica. Por fim, uma breve revisão dos sistemas e tipos dos veículos elétricos é realizada.

### 2.1 A evolução dos carros elétricos

Os veículos elétricos (VE) surgiram antes dos veículos a combustão interna (VCI) e sua evolução está atrelada com o desenvolvimento das baterias (HØYER, 2008). Em 1800 o conceito de se armazenar energia em substâncias químicas surge com Alessandro Volta. Em 1821 Michel Faraday demonstra o princípio dos motores elétricos aplicando o conceito de pilha desenvolvido por Volta. Porém, em 1859, com a invenção da bateria recarregável por Gaston Planté é que os primeiros modelos práticos de VE surgem. A partir disso as evoluções dos veículos elétricos aumentaram o ritmo. As décadas de 1880 à 1900 foram conhecidas como o início da *Era de ouro* para os carros elétricos, no qual houve mais desenvolvimento e vendas do qual qualquer outra época (HØYER, 2008). Os veículos elétricos chegaram a representar 53% da frota de veículos dos Estados Unidos em 1903 (COWAN; HULTÉN, 1996).

A *Era de ouro* teve seu fim no começo da década de 1920 (HØYER, 2008) que foi quando a primeira guerra mundial se iniciou. Os requisitos exigidos para os veículos usados na guerra eram: ter uma boa autonomia e recarga rápida. Requisitos no qual os VE's não atendiam. Isso impulsionou o desenvolvimento dos veículos a combustão interna e favoreceu o aumento de VCI's no mercado. Em 1935 os VE's desapareceram do mercado (ZANETI, 2018).

Contudo, a crise do petróleo no início da década de 1970 afetou a segurança energética dos países, fazendo com que fosse necessário diversificar a matriz energética. Além disso, a preocupação com o meio ambiente aumentou bastante por volta de década de 1980. Em 1997, ocorreu a Conferência Geral das Partes (COP) no qual muitos países se comprometeram com o protocolo de Kyoto que previa metas e prazos para a redução de gases do efeito estufa. Essas metas foram reforçadas em 2015, na COP-21<sup>1</sup> quando se definiu o Acordo de Paris que previa que em 2030 a emissão de gases deverá ser 43% menor do que as emissão registrada em 2005. Esses fatores fizeram com que os veículos elétricos voltassem a ser desenvolvidos e vendidos tendo uma boa projeção para o futuro.

---

<sup>1</sup> 21<sup>a</sup> Conferência Geral das Partes

## 2.2 Desafios energéticos gerados pelo aumento dos veículos elétricos

A inserção dos VE's no sistema elétrico de potência certamente causará alguma influência, pois os carregadores dos VE's possuem potência em torno de 6KW, que é um valor considerável semelhante a potência do chuveiro elétrico. Contudo alguns estudos indicam que essa influência não causará grandes impactos negativos.

Um dos estudos (ARIOLI et al., 2016) identificou e categorizou os impactos técnicos que os VE's podem causar na rede elétrica. Para isso, foi usado um software de cálculo de fluxo de cargas em sistemas de distribuição chamado (Open DSS). Para modelar a carga representada por um veículo elétrico, o estudo realizou um experimento com veículos reais, constatando que o fator de potência é igual à 1 e a potência consumida pelo VE não se altera durante o carregamento. Assim a carga foi modelada como potência constante. A rede elétrica estudada foi obtida analisando-se padrões de redes recorrentes no Brasil. Os experimentos realizados em regime permanente consideraram três níveis de carga: leve (madrugada), normal, e pico (entre 17 e 20 horas). Os parâmetros estudados foram:

- Perfil de tensão
- Perfil de desequilíbrio de tensão entre fases
- Sobrecarga dos sistemas
- Perdas elétricas
- Distorção harmônica

Com os resultados, o estudo mostrou que a recarga do VE piora em diferentes níveis todos os aspectos técnicos analisados, sendo que o mais restritivo é o perfil de tensão. Para o período de pico, é observado que a tensão nos barramentos cai bastante e é influenciada pela distância do transformador. Porém essa piora não é tão agravante. Fora do horário de pico não foi observado uma sobrecarga sobre os sistemas. Além disso, não é observado grandes efeitos para distorção harmônica devido ao carregador possuir filtros EMI<sup>2</sup>. Portanto, o estudo indica que a maior preocupação deve ser a queda de tensão no horário de pico. Não foi realizada uma análise para níveis de penetração de veículos elétricos.

Outro estudo (LIMA, 2012), analisa a penetração de veículos elétricos no dia a dia de um bairro residencial do sul do Brasil. Os níveis de penetração analisados são de 10, 20, 30 e 50%, sendo metade veículos elétricos híbridos *plug-in* (PHEV) e metade

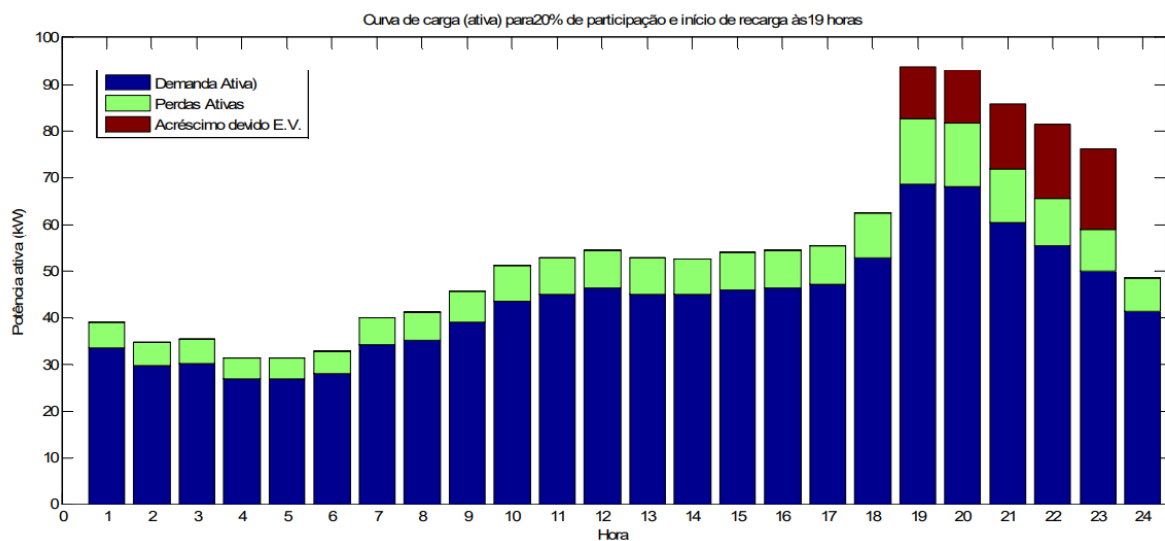
---

<sup>2</sup> Interferência eletromagnética.

veículos elétricos puro (PEV). Os parâmetros dos veículos elétricos foram retirados de carros comerciais. Para o PEV foi considerado o Nissan Leaf e para PHEV o Chevy VOLT. O estudo realizou o experimento considerando os aspectos técnicos mais afetados pela introdução de VE na rede elétrica que são: o perfil de tensão e a sobrecarga do sistema. Para os cálculos de tensão e potência nas barras, foi utilizada a técnica de varredura juntamente com o método estatístico de Monte Carlo.

O estudo mostrou que o impacto na tensão para a penetração de 10% de veículos elétricos é bem pequeno, possuindo maior influência nas barras de tensão distantes dos transformadores. Essa influência é agravada no horário de pico (19 horas). Para níveis de penetração maior, o impacto começa a ser restritivo. Além disso, para a recarga de VE's no horário de pico, a carga do sistema ultrapassa os limites permitidos como mostra a [Figura 1](#). Porém, para a recarga fora do horário de pico, é visto que a carga acrescida dos veículos elétricos (em vermelho) ainda é menor que o esperado para o horário de pico [Figura 2](#).

Figura 1 – Curva de carga ativa, com 20% de participação de VE's, início de recarga às 19:00 horas.

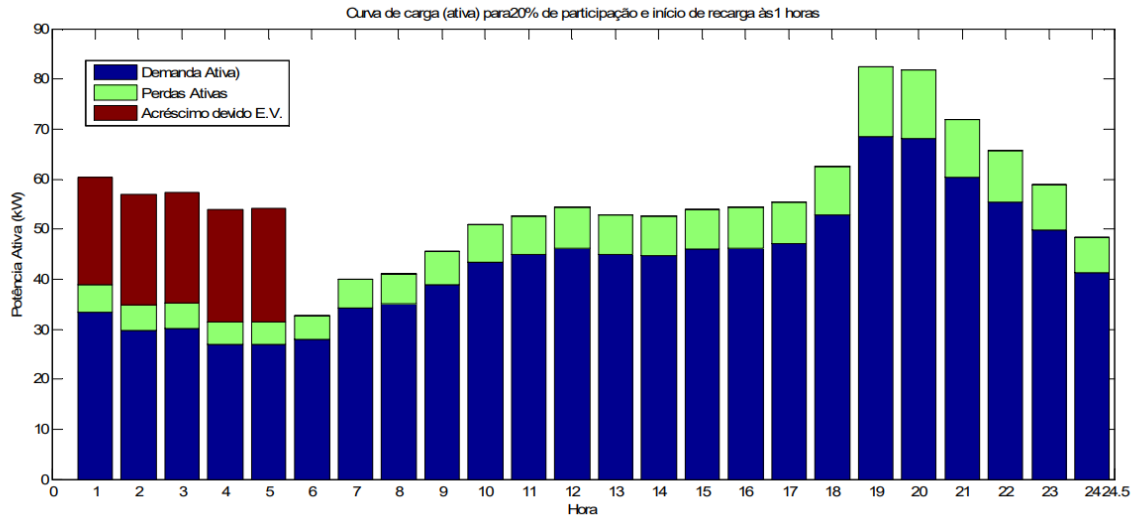


Fonte: Lima (2012, p. 71)

Além disso, o estudo apresentado em [Fernandez et al. \(2010\)](#) e também uma pesquisa desenvolvida pela Associação Brasileira das Distribuidoras de Energia Elétrica (ABRADEE) ([ARIOLI et al., 2016](#)), indicam que a recarga fora do horário de pico não causará necessidade de grandes mudanças na rede elétrica, sobretudo para os níveis de penetração de veículos elétricos estimado no país.

Deste modo, algumas estratégias podem ser adotadas para evitar a recarga em

Figura 2 – Curva de carga ativa, com 20% de participação de VE's, início de recarga à 01:00 hora.



Fonte: Lima (2012, p. 22)

momentos críticos da rede. A primeira é por meio de incentivos fiscais através de tarifas mais caras para o horário de pico. A segunda é usando o conceito de *vehicle-to-grid* (V2G) unida à *Smart Grids*. Embora essa abordagem necessite de mais investimentos, ela pode trazer benefícios como: regulação de demanda, armazenamento de energia excedente vinda de fontes renováveis, além da redução de harmônicos (DAS et al., 2020). Nesse esquema, a bateria do carro se comportaria como um micro gerador, no momento de demanda máxima da energia. O início da recarga do veículo também poderia ser coordenada para o melhor horário (HABIB; KAMRAN; RASHID, 2015).

Portanto, para a previsão de penetração de veículos elétricos não será necessário grandes mudanças na rede de distribuição brasileira no primeiro momento. Porém a recarga dos veículos precisará ser coordenadas para que não aconteça durante os intervalos de pico.

## 2.3 Veículos elétrico

Veículos elétricos são todos os veículos no qual a propulsão é realizada totalmente ou parcialmente por um motor elétrico. Os primeiros indícios do processo moderno de eletrificação veicular foi a utilização da técnica de *start-stop* em veículos a combustão interna (VCI). Esta técnica consiste em desligar a propulsão para economizar combustível (EMADI, 2011). Para isso, os motores elétricos, anteriormente utilizados como geradores em VCI, necessitaram ser substituídos por motores mais potentes. Logo em seguida esse



motores cresceram ainda mais e passaram a ser usados na propulsão dos VE's.

Os veículos elétricos podem ser divididos em dois grupos: híbridos e puramente elétricos.

### 2.3.1 Veículos Elétricos Híbridos

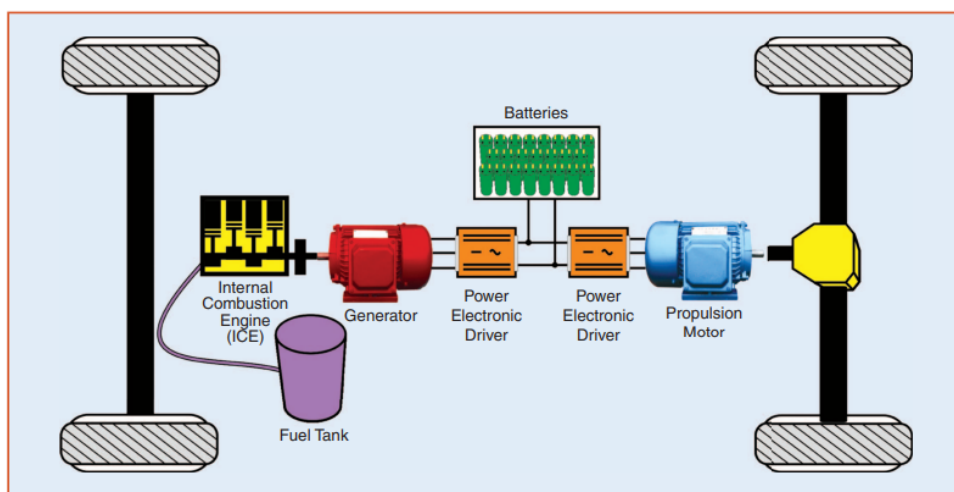
Os veículos elétricos híbridos (VEH) utilizam além do motor elétrico (ME), um motor a combustão interna (MCI). O motor elétrico será usado para a propulsão parcial ou total do veículo e usa um banco de baterias como fonte de energia. Por sua vez o motor a combustão, que geralmente utiliza um combustível fóssil, irá funcionar como um gerador e fornecerá energia para a recarga da bateria. Porém dependendo da configuração, o MCI poderá ser usado também para a propulsão.

#### 2.3.1.1 Configuração série

Na configuração série do VEH, o motor a combustão interna é utilizado apenas como gerador de energia elétrica para carregar a bateria. Por sua vez, o ME será usado diretamente na propulsão do veículo. Durante a frenagem, o ME se torna também um gerador usando a energia cinética do veículo para carregar a bateria.

O MCI pode ser otimizado para o ponto de maior eficiência devido ao fato de ele operar com uma carga quase constante. O VEH série é mais popular em veículos grandes (EMADI, 2011). Um esquemático dessa configuração pode ser visto na [Figura 3](#).

Figura 3 – Diagrama VEH série.



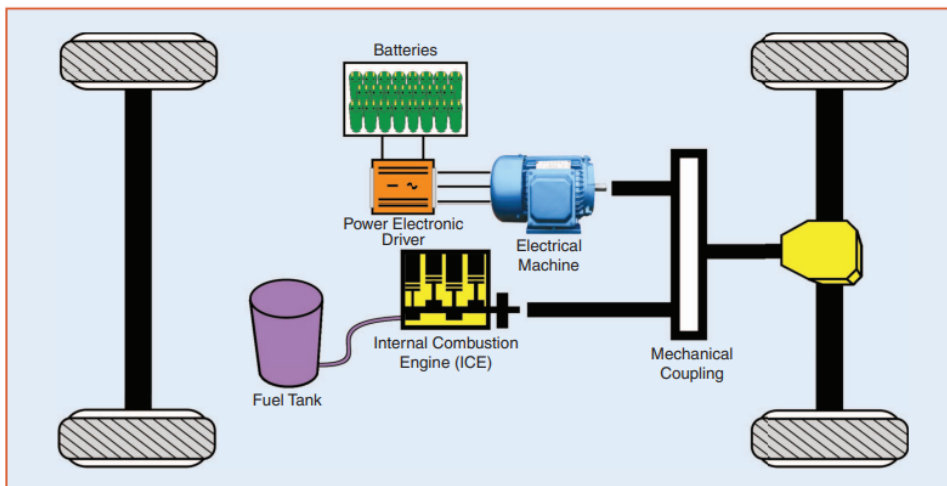
Fonte: Emadi (2011, p. 6)

### 2.3.1.2 Configuração paralela

Em um VEH paralelo, tanto o motor elétrico quanto o motor a combustão interna são usados na propulsão do veículo. O ME é usado geralmente em condições de baixa velocidade (EMADI, 2011). Quando surge a necessidade, o MCI é acionado para que o uso da energia elétrica e química seja otimizada (ARIOLI et al., 2016). A bateria do motor elétrico será carregada durante as frenagens e usando o gerador. Quando opera como gerador, o MCI não traciona o veículo.

O VEH paralelo, embora seja mais complicado que a configuração série, é mais eficiente em estradas (ARIOLI et al., 2016). O diagrama da configuração paralela pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama VEH paralelo.



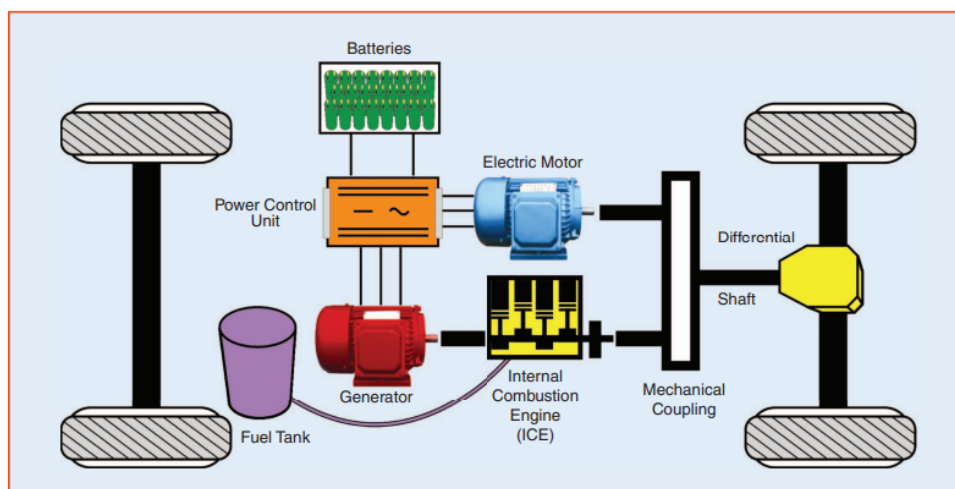
Fonte: Emadi (2011, p. 6)

### 2.3.1.3 Configuração série-paralelo

Mesmo sendo a mais complicada, a configuração série-paralela é a mais comum entre os veículos comerciais, pois ela permite estratégias de controle mais eficientes, buscando o ponto ótimo do sistema (ARIOLI et al., 2016). Nessa configuração, o motor elétrico e o motor a combustão são usados juntos na propulsão do carro, como na configuração paralela. Contudo, o MCI pode ser usado para recarregar a bateria do veículo ao mesmo tempo que o traciona.

O diagrama dessa configuração pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama VEH série-paralelo.



Fonte: Emadi (2011, p. 7)

### 2.3.2 Grau de hibridização

O grau de hibridização é definido pelo pico da potência elétrica em relação ao pico da potência mecânica (EMADI, 2011). Desse modo, quanto menos dependente do MCI, mais hibridizado o veículo é.

Portanto, a seguinte classificação pode ser feita. Veículos micro híbridos possuem o grau de hibridização entre 5% e 10%. Já nos híbridos médios o grau é de 10% à 25% (EMADI, 2011). Altos graus de hibridização estão geralmente relacionados com veículos elétricos híbridos *plug-in*.

#### 2.3.2.1 Veículo elétrico híbrido *plug-in*

O veículo elétrico híbrido *plug-in* (VEHP), além de usar o MCI para o carregamento da bateria, usa uma fonte de energia elétrica externa para recarregar o veículo.

O VEHP possui geralmente uma bateria maior que a convencional, embora seja cerca de 70% menor que um VE puro. Por isso, ele pode andar em modo totalmente elétrico (MCI desligado) por muito mais tempo. Dependendo da rota do motorista, o MCI pode deixar de ser necessário. O VEHP aumenta a diversidade de combustível que o veículo poderá consumir, como por exemplo, a gasolina e o álcool além da energia elétrica fornecida pela rede.(EMADI, 2011).

### 2.3.3 Veículos puramente elétricos

Os veículos puramente elétrico (VEB) não possuem nenhum motor a combustão. Sua potência é fornecida apenas pelo conjunto: bateria-motor elétrico. Assim a recarga da bateria é feita pela rede elétrica (assim como no VEHP) e também nos momentos de frenagem.

O VEB é mais simples que o veículo a combustão interna (VCI). Ele não necessita de transmissão, sistema de exaustão, entre outros sistemas. Devido à isso eles necessitam muito menos manutenção que os VCI durante a sua utilização (ARIOLI et al., 2016). Além dessa vantagem, os VEB's possuem muitas outras: não emitem poluentes, são silenciosos (reduzindo a poluição sonora), conseguem entregar torque constante devido as características do ME, e ainda, fornece maior segurança energética devido a energia elétrica possuir diversas fontes, sendo várias delas renováveis.

Porém, para que os veículos tenham uma autonomia comparável com os VCI, a bateria do VEB deve ser grande, o que encarece essa tecnologia. A bateria do VE pode custar até metade do seu valor (LUNA et al., 2019).

### 2.3.4 Componentes importantes

A bateria é construída através de dois compostos químicos, anodo e catodo. Através de reações de oxidação, esses compostos geram uma corrente elétrica que realiza trabalho. As baterias recarregáveis, que são usadas em VE, são consideradas baterias secundárias (BOCCHI; FERRACIN; BIAGGIO, 2000).

O primeiro tipo de bateria utilizado em veículos foi a de chumbo-ácido, composta por chumbo e ácido sulfúrico (ARIOLI et al., 2016). Porém, essa bateria foi utilizada apenas na partida do veículo à combustão interna, pois a sua densidade de energia era insuficiente para a aplicação em VE. A bateria de níquel-metal-hidreto (NiMH) foi utilizada inicialmente em veículos híbridos (ARIOLI et al., 2016).

Com o desenvolvimento da bateria de Lítio-íon, devido ao crescimento da demanda em *smartphones*, a bateria de NiMH começou a ser substituída nos veículos elétricos. Embora a bateria de Lítio-íon seja mais cara e precise de um controle mais inteligente, ela possui uma densidade de energia muito maior, permitindo maior autonomia do VE. Por fim, o preço das baterias tem caído por causa do aumento na demanda gerada pela crescente quantidade de veículos elétricos (CASTRO; FERREIRA, 2010).

O motor elétrico também é outro componente principal. Porém, diferente da bateria, pela atual maturidade tecnológica do ME esse componente não é um problema. O ME permite um rendimento próximo de 90%, que é muito maior que o MCI (cerca de 32% (KARAMUK, 2011)). Além disso ele fornece um torque constante independente da rotação. Três tipos de motores são usados comercialmente em veículos elétricos: Motor

Síncrono de Imã Permanente, Motor Síncrono com Rotor Bobinado (ambos motores CC) e o Motor de indução (é um motor CA trifásico) ([ARIOLI et al., 2016](#)).

## 2.4 Conclusões do capítulo

Esse capítulo mostrou que embora os veículos elétricos tenham surgido primeiro, os veículos a combustão é que foram os mais usados até os dias de hoje. Porém, fatores como a crise do petróleo e a poluição ambiental são grandes impulsionadores dos veículos elétricos. Além disso, foi verificado que os VE's não causaram grande impacto na rede elétrica se o carregamento for coordenado. Por fim, os VE podem ser divididos em veículos elétricos puros e híbridos, possuindo configurações totalmente diferentes.



## 3 Revisão de literatura

Esse capítulo apresenta uma revisão de literatura sobre as características dos carregadores de veículos elétricos como nível de potência, diagrama elétrico e componentes importantes. Também são apresentados dois tipos de carregadores: a condução e sem fio.

### 3.1 Carregadores de veículos elétricos

Além do motor elétrico e da bateria, o carregador da bateria é um componente importante na infraestrutura dos veículos elétricos. Portanto, devido as altas expectativas de crescimento no número de veículos elétricos no Brasil e no mundo, o estudo e desenvolvimento da tecnologia de carregadores é importante.

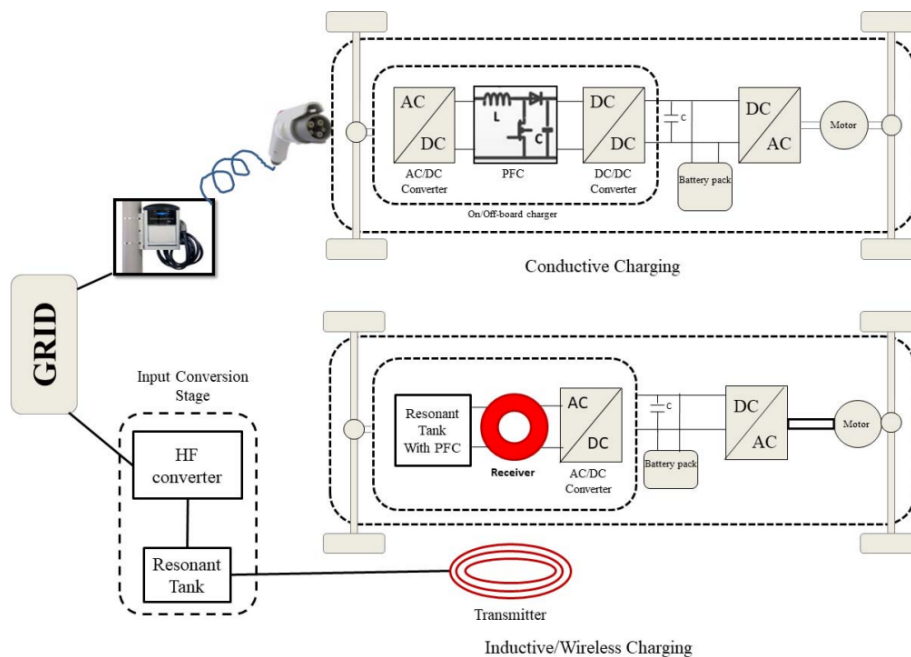
Atualmente, os carregadores são compostos de conversores de potência chaveados. A função do carregador é adequar a energia elétrica fornecida pela rede em uma saída de tensão contínua (CC) com níveis de tensão e corrente previamente estabelecidos. A tensão da rede pode ser alternada (CA) ou contínua. Além disso o carregador deve minimizar os efeitos negativos gerados pelo chaveamento, como harmônicos na corrente (Distorção Harmônica Total - THD) e o fator de potência.

Dois tipos de transferência de energia são propostos: condutivo e indutivo (wireless). No carregamento condutivo a transferência de energia é realizada através de contatos metálicos. Já no carregamento wireless, a transferência de energia é realizada pelo ar através da indução ou de capacitores de acoplamento (PANCHAL; STEGEN; LU, 2018). Um esquemático comparativo dos dois métodos de carregamento pode ser visto na Figura 6.

Existem diferentes tipos de métodos de carregamento. Os mais comuns são (TRIVEDI et al., 2018):

- **Tensão constante:** A tensão na bateria é mantida constante. A corrente drenada é alta para baixa carga da bateria e baixa quando carga completa. É tipicamente usada em carregadores mais simples.
- **Corrente constante:** A corrente é mantida constante e a tensão sobe até a carga completa.
- **Carga pulsante:** A corrente é pulsante e a intensidade da carga pode ser controlada por modulação de largura de pulso (PWM). Os períodos sem corrente permitem às reações químicas se estabilizarem, preservando a bateria.

Figura 6 – Esquemático conexão condutiva e indutiva



Fonte: Ahmad, Alam e Chabaan (2017, p. 43)

Os carregadores podem ser categorizados de acordo com o nível de potência. Existem instituições de padronização, como a Society for Automobile Engineers (SAE), que categorizam como Level 1 carregadores de baixa potência, Level 2 carregadores de média potência e Level 3 ou carregamento rápido (Fast-charging) carregadores de alta potência, conforme mostra a Tabela 1. O Level 1 e 2 podem operar com tensões monofásicas e bifásicas, porém o Level 3 precisa de uma rede trifásica por causa do alto nível de potência (YILMAZ; KREIN, 2012). Embora o carregador Fast-charging carregue o veículo muito mais rápido, a sua implementação é mais cara pois ele usa mais componentes, além de ser necessário uma infraestrutura elétrica maior. Além disso, o Level 3 causa um impacto maior na rede de eletricidade devido à alta potência. Ademais, a maior parte do carregamento será em casa, onde não se tem uma infraestrutura que dê suporte ao Level 3. Por isso o carregamento do Level 1 e 2 serão os mais usados (BOTSFORD; SZCZEPANEK, 2009).

Além disso eles podem ser classificados como on-board e off-board. No caso do on-board, todo o conversor fica dentro do veículo. Mas devido às limitações de custo, espaço e peso a potência fica limitada até o Level 2 (YILMAZ; KREIN, 2012). O VE fica diretamente conectado em um ponto de energia. Um exemplo de conversor on-board pode ser visto em Kim et al. (2010). Já o conversor off-board fica externo ao veículo e o VE se conecta ao carregador por um ponto de tensão CC. Deve existir uma comunicação



entre o VE e o carregador para regular níveis de potência.

Tabela 1 – Padrões SAE e IEC para níveis de potência de carregadores.

Charging Power Levels	Location for charger	Expected power level
AC and DC Charging based on SAE STANDARDS		
Basic: Level 1 Charging • Vac = 230 (EU) • Vac = 120 (US)	Single Phase • On-board	• $P = 1.4$ kW with (12 A) • $P = 1.9$ kW with (20 A)
Main: Level 2 Charging • Vac = 400 (EU) • Vac = 240 (US)	Single Phase/Three Phase • On-board	▶ $P = 4$ kW with (17 A) ▶ $P = 8$ kW with (32 A) ▶ $P = 19.2$ kW with (80 A)
Fast: Level 3 Charging • Vac = 208–600	Three Phase • Located Off-Board	• $P = 50$ kW • $P = 100$ kW
Level 1: DC Charging • Vdc = 200–450	• Located Off-Board	• $P = 40$ kW with (80 A)
Level 2: DC Charging • Vdc = 200–450	• Located Off-Board	• $P = 90$ kW with (200 A)
Level 3: DC Charging • Vdc = 200–600	• Located Off-Board	• $P = 240$ kW with (400 A)
AC and DC Charging based on IEC STANDARDS		
AC Power Level 1	Single Phase • On-board	• $P = 4$ –7.5 kW with (16 A)
AC Power Level 2	Single Phase/Three Phase • On-board	• $P = 8$ –15 kW with (32 A)
AC Power Level 3	Three Phase • On-board	• $P = 60$ –120 kW with (250 A)
DC Rapid Charging	• Off-Board	• $P = 1000$ –2000 kW with (400A)
CHAdMo Charging Standard		
DC Rapid Charging	• Off-Board	• 62.5 kW with (125 A)

Fonte: [Habib et al. \(2020, p. 912\)](#)

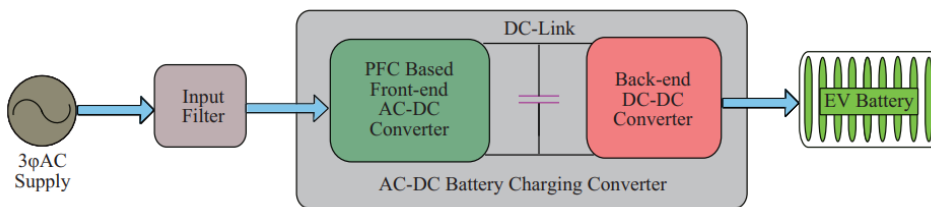
Ainda existem topologias unidirecionais e bidirecionais. Em conversores unidirecionais, o fluxo de potência é sempre da rede para a bateria. O controle desse tipo de topologia é bem simples e muitos conversores unidirecionais usam ponte de diodos como retificador na entrada ([YILMAZ; KREIN, 2012](#)). Já a topologia bidirecional proporciona o fluxo de potência tanto da rede elétrica para a bateria quanto da bateria para a rede. Essa tecnologia é chamada de *Vehicle-to-grid* (V2G). Nela a bateria do veículo é usada como fonte de armazenamento de energia nos momentos em que a rede elétrica não está sobrecarregada, ou que há energia sobressalente oriunda de fontes renováveis, como solar e eólica. Porém, nos momentos de pico de consumo, a energia armazenada nas baterias é injetada na rede. Essa tecnologia traz diversos benefícios para a rede elétrica e precisa de conversores bidirecionais e de smart-grids.

### 3.1.1 Carregadores por condução

Os carregadores por condução utilizam um contato elétrico entre o veículo e a rede elétrica. São geralmente compostos de um filtro de entrada, seguido de um conversor CA/CC (front-end) e um conversor CC/CC (back-end) como mostrado na [Figura 7](#). O

filtro de entrada serve para remover ruídos EMI e diminuir o THD. O filtro de entrada pode também fazer a função de correção do fator de potência (PFC). O conversor front-end CA/CC tem a função retificadora, converte a tensão alternada de linha para uma tensão CC. Geralmente, a função de PFC é realizada pelo conversor de entrada. O conversor CC/CC adéqua a tensão e corrente para o carregamento correto da bateria. Além disso, geralmente um transformador de alta frequência é utilizado nesse estágio para fornecer isolamento galvânico. Entre o estágio de front-end e o back-end geralmente deve existir um elemento armazenador de energia para eliminar ripple de tensão e corrente. O mesmo é necessário na saída do carregador.

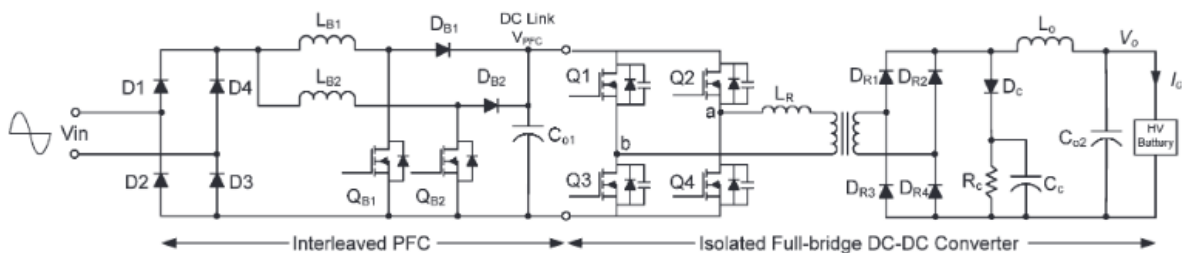
Figura 7 – Esquemático de um carregador por condução



Fonte: [Habib et al. \(2020, p. 914\)](#)

Um conversor com dois estágios, baseado em dois boost entrelaçado seguido de um conversor CC/CC de onda completa isolado é apresentado na [Figura 8](#).

Figura 8 – Conversor dois estágios baseado em boost entrelaçado.



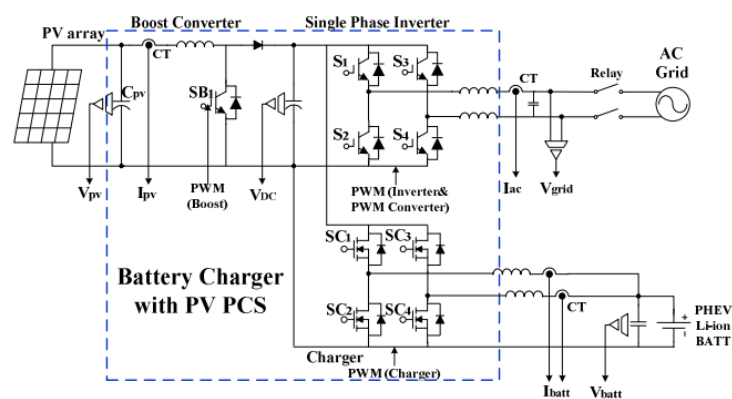
Fonte: [Gautam et al. \(2012, p. 914\)](#)

Os conversores de front-end e back-end podem ser transformados em apenas um estágio, eliminando o elemento armazenador entre eles. Essa configuração economiza espaço e custo visto, que o elemento armazenador (geralmente capacitor) são grandes e caros ([HUYNH et al., 2020](#)). Porém a lógica de controle fica mais difícil por causa de ter que manter a tensão e frequência da saída e ainda regular o fator de potência da entrada.

Outra característica dos conversores a condução é que eles podem ser unidirecionais ou bidirecionais. Os conversores unidirecionais são mais comuns, pois possuem um projeto mais fácil e por isso mais barato (YILMAZ; KREIN, 2012). Já os conversores bidirecionais precisam de um controle mais sofisticado para que a potência possa ser entregue tanto da bateria para a rede quanto da rede para a bateria. Em Fahem, Chariag e Sbita (2017) é feita uma visão geral sobre diversos conversores on-board bidirecionais.

Devido o contato elétrico não possuir muitas perdas é possível trabalhar nos três níveis de potência. Para o carregador do nível de potência do Level 1 são usados predominantemente conversores monofásicos e a tensão de entrada é alternada (YILMAZ; KREIN, 2012). Um exemplo de um conversor do Level 1 é visto em Choe et al. (2010) e está exposto na Figura 9. Os conversores do Level 2 podem ser usados tanto no carregamento em casa, pois não exige grande infraestrutura, quanto em vias públicas. Ademais são usados tanto conversores monofásicos quanto bifásicos (220V). Já para o carregamento em Level 3 é necessário o uso de tensões trifásicas devido aos requerimentos de potência. Além disso, por limitações de custo e tamanho os conversores de carregadores Level 3 são geralmente off-board. Embora o custo de instalação seja alto, o tempo de carga de um Level 3 é de cerca de 30 minutos. Um conversor CA/CC usado para o Level 3 chamado Viena pode ser visto na Figura 10. Esse conversor possui poucas chaves ativas, o que diminui o custo do projeto, além de não necessitar de conexão com o neutro (KHALIGH; DUSMEZ, 2012). Em Trivedi et al. (2018) é realizada uma revisão de diversas topologias aplicáveis ao Fast-charging.

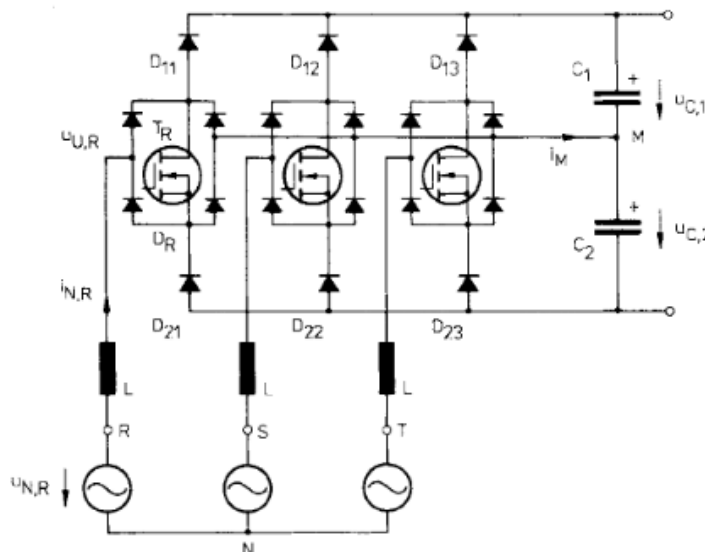
Figura 9 – Conversor CA/CC a partir de uma célula fotovoltaica do Level 1.



Fonte: Choe et al. (2010)

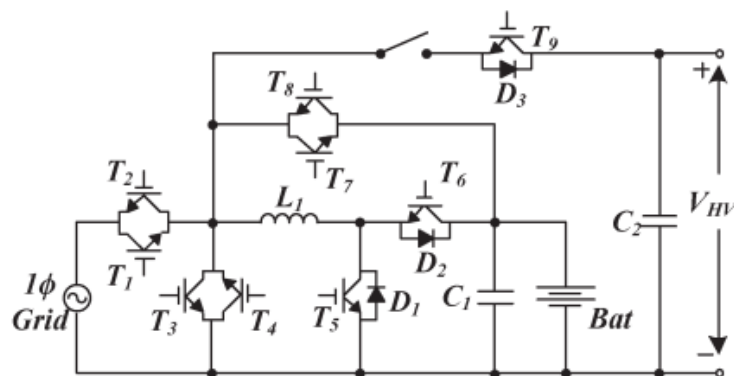
É possível integrar o carregador com os conversores internos do veículo. Uma das formas é usar o conversor CC/CC utilizado para regular a tensão da bateria no interior do veículo, como visto na Figura 11. Esse conversor realiza a propulsão do veículo usando as chaves T6-T3-D3. Para a frenagem regenerativa é usada T9-D2-T6. No carregamento

Figura 10 – Conversor CA/CC Viena com uso para carregamento Level 3.



Fonte: Kolar e Zach (1997, p. 458)

Figura 11 – Conversor integrado usando o conversor CC/CC bidirecional.



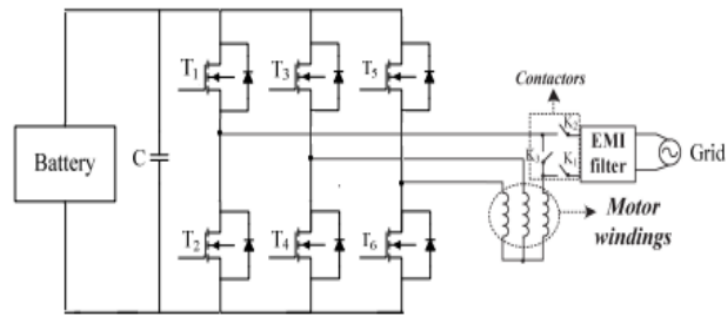
Fonte: Khaligh e Dusmez (2012)

usa-se as chaves T1-T5-T4-D6 e T2-D1-T7. E por fim, ainda é possível injetar potência na rede com as chaves T8-T5-T1 e T2-D5-T3-T6. Outra topologia de conversor integrado é visto na [Figura 12](#). Nela, o indutor formado pelas bobinas do motor é usado juntamente com o inversor PWM trifásico para produzir um carregador de alta potência e alto FP<sup>1</sup>. Durante a carga, os contadores K1 e K2 são fechados e K3 aberto, na condução é o inverso.

As topologias de conversores integrados economizam espaço, peso e custo por reu-

<sup>1</sup> Fator de potência

Figura 12 – Conversor integrado usando o motor como indutor.



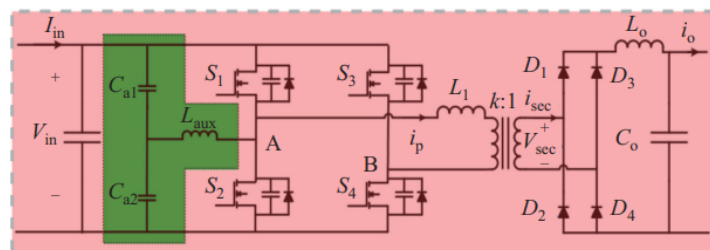
Fonte: Fahem, Chariag e Sbita (2017)

utilizar estruturas usadas na propulsão do veículo. Além disso, como os sistemas internos são designados para altas potência, torna-se possível carregadores fast-charging ou Level 3 on-board.

Também, o uso de técnicas de *soft-switching*, como *zero voltage switching* (ZVS) e *zero current switching* (ZCS) são desejáveis nos carregadores de VE. Essas técnicas diminuem o estresse físico das chaves permitindo operações em altas frequências e potências. Esse benefício pode ser conseguido através de esquemas de controle ou através de circuitos auxiliares (HABIB et al., 2020), como mostrado na Figura 13. O circuito auxiliar em verde na Figura 13 adiciona ao conversor CC/CC a técnica de soft-switching para uma determinada faixa de valores de carga.

Muitas topologias de back-end e front-end são combinadas na literatura para formar carregadores de diversas qualidades. A Figura 14 mostra as principais topologias utilizadas.

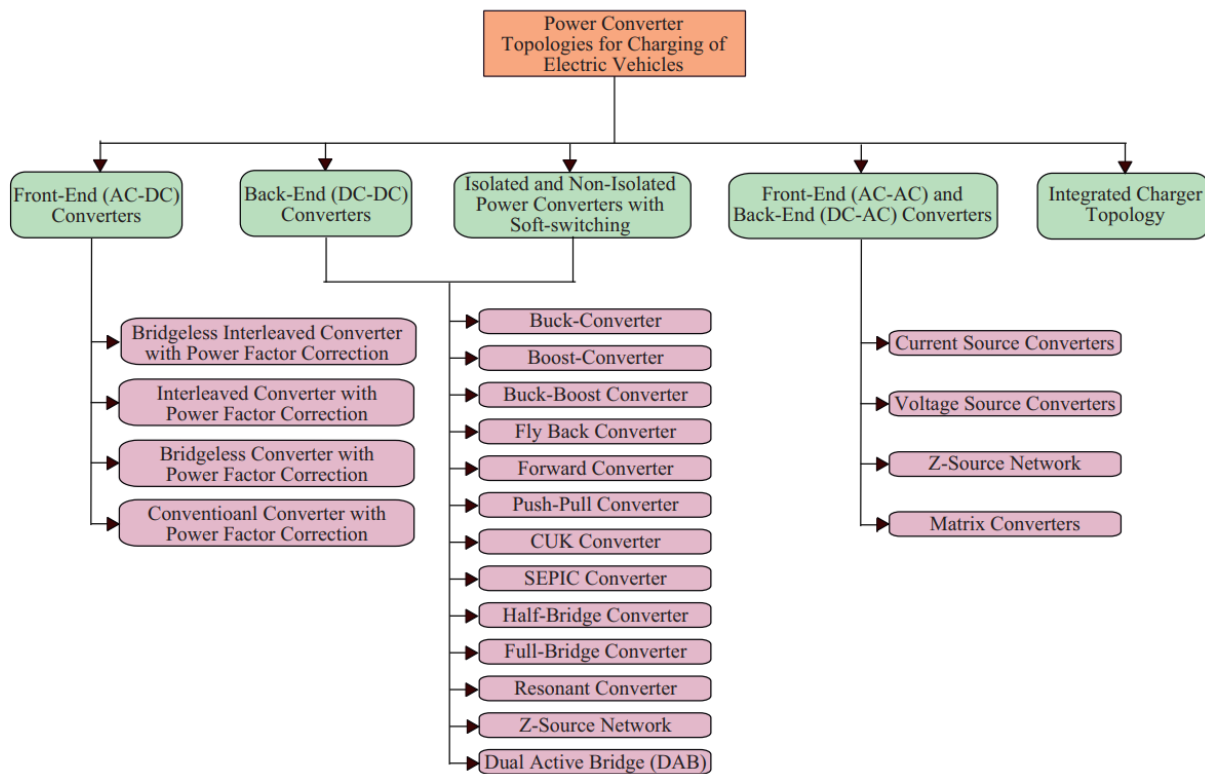
Figura 13 – Circuito auxiliar para soft-switching em um conversor de ponte completa.



Fonte: Habib et al. (2020)

Por fim, os carregadores a condução já se encontram em maturidade tecnológica (LUKIC; PANTIC, 2013). Portanto, os diversos modelos de veículos elétricos plug-in já

Figura 14 – Topologias de conversores utilizados em carregadores de VE.



Fonte: [Habib et al. \(2020\)](#)

possuem um sistema de carregamento, como mostrada na [Tabela 2](#).

### 3.1.2 Carregadores wireless

O carregamento por transferência de potência wireless (WPT) é realizado através do ar utilizando campos magnéticos variantes. Essa tecnologia oferece algumas vantagens em relação ao carregamento condutivo, que são ([WU et al., 2012](#)):

- Conveniência: O carregamento wireless pode se tornar completamente autônomo. O veículo pode simplesmente parar sobre o carregador e começar a recarregar.
- Maior durabilidade: Os carregadores de eletropostos à condução precisam de uma interface para que o usuário alcance o plugue de carregamento. Essa interface pode danificada com efeitos da natureza ou mesmo vandalismo. Já o sistema wireless pode ser instalado embaixo da superfície, onde é mais protegido.
- Baixo risco de acidentes: Por ser um sistema totalmente autônomo, o sistema WPT fornece menos riscos de manuseio como choques e mal conexão.

Tabela 2 – Modelos de VEB e VEHP com a potência dos seus carregadores

Model	Driving Distance/ Hour of Charging	Battery Energy Size	EV Type	Type of Charging	Full Charge Time (Hr)	Max Charge rate
Porsche Panamera S E-Hybrid	10	9 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	10hr/ 2.5	3 kW
Audi A3 e-tron	11	9 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	8hr/ 2.5hr	3.3 kW
Cadillac ELR	11	16.5 kWh	PHEV	Level 1 /Level2	12.5 hr -18hr / 5hr	3.3 kW
Chevy Spark EV	11	19.44 kWh	100% Electric	Level 1/Level 2/ DC fast charging	20hr /7hr/ 20min	3.3 kW
Chevy Volt	11	18.4 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	13hr/ 4.5hr	3.3 kW
Ford C-Max Energi	11	7.6 kWh	PHEV	Level 2	2.5 hr.	3.3 kW
Ford Fusion Energi	11	7.6 kWh	PHEV	Level 1/Level2	7/2.5hr	3.3 kW
Mercedes S550 Plug-in Hybrid	11	8 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	2hr /4hr-5hr	3.3 kW
Mercedes C350 Plug-in Hybrid	11	6.2 kWh	PHEV	Level 2	2hr	3.3 kW
Smart Electric Drive	11	17 kWh	100% Electric	Level 2	2.5hr	7.2 kW
Toyota Prius Plug-In	11	9 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	5.5/2	3.3 kW
Mitsubishi i-MiEV	11	16 kWh	100% Electric	Level 2 (16A, 10A, 8A) Level 3	6hr, 8hr, 10hr/ 30 min	3.6/2.4/1.92 kW
Nissan LEAF	11 / 22	24 kWh	100% Electric	Level 1/Level 2/Level 3	22hr , 8hr , 30 min	3.3 kW / 6.6 kW
Porsche Cayenne S E-Hybrid	12 / 24	11 kWh	PHEV	Level 2	3hr /(90 min)	3.6 kW / 7.2 kW
Volkswagen e-Golf	12 / 24	36.6 kWh	100% Electric	Level 1/ Level 2/DC fast	24hr/9hr/ 30 min(80%)	3.6 kW / 7.2 kW
Ford Focus Electric	22	23 kWh	100% Electric	Level 1/ Level 2	20hr /3hr - 4hr	6.6 kW
Fiat 500e	22	24 kWh	100% Electric	Level 2	4 hr	6.6 kW
Kia Soul EV	22	27 kWh	100% Electric	Level 1/Level 2/Level 3	24hr/4hr-5hr/43 min	6.6 kW
Honda Accord Plug-In Hybrid	22	7 kWh	PHEV	Level 2	3hr	6.6 kW
Honda Clarity Electric	25	25 kWh	100% Electric	Level 1, Level 2 and DC fast charging	19hr (Level 1), 3 (Level 2) and 30 min (80%)(DC fast)	NA
BMW i3	25	24 kWh	100% Electric	Level 1, Level 2 and DC fast charging	22hr, 8hr, 30 min	7.4 kW
Mercedes B-Class Electric	29	28 kWh	100% Electric	Level 2	2hr	10 kW
Tesla Model S	29 / 58/255	85 kWh	100% Electric	Level 1/Level 2 / Supercharger		11.5 kW / 17.2 kW/120kW

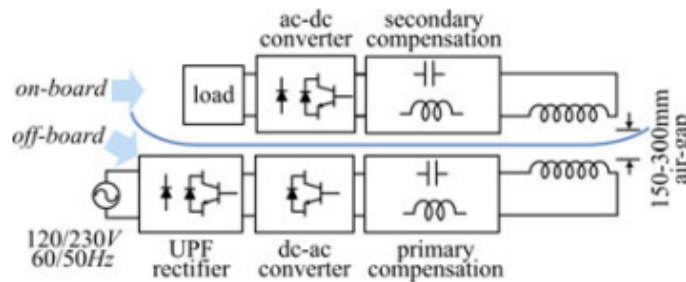
Fonte: Ahmad, Alam e Chabaan (2017, p. 41)

Porém, o carregamento sem fio sofre com problemas de desalinhamento e grade gap de ar (KHALIGH; DUSMEZ, 2012). Além disso, esse sistema causa mais gastos com a infraestrutura, por ser necessário quebrar o chão para a instalação.

Na Figura 15 é possível ver um diagrama básico de um sistema WPT. Para permitir a transferência de potência pelo ar, uma tensão alternada de alta frequência deve ser aplicada na bobina primária. Para isso a tensão CA de linha precisa ser retificada para tensão contínua por um conversor CA/CC. Este conversor deve realizar a correção do fator de potência PFC. Em seguida, a tensão CC é transformada em uma tensão CA de alta frequência por um inversor. Esses dois estágios também pode ser realizado por apenas um conversor.

A tensão CA de alta frequência é então aplicada ao transmissor. Geralmente, entre a saída do inversor e a entrada do transmissor, existe um sistema ressonante de compensação para diminuir os impactos do desalinhamento e do gap. Em seguida, a

Figura 15 – Diagrama de blocos de um sistema de carregamento sem fio.



Fonte: [Samanta e Rathore \(2017\)](#)

energia transferida é recebida por um conjunto de receptor mais compensação. Por fim, a tensão CA recebida é retificada e regulada para carregar a bateria.

### 3.1.2.1 Métodos WPT

Existem três métodos de WPT, que são ([PANCHAL; STEGEN; LU, 2018](#)):

- **Capacitivo:** No WPT capacitivo, duas placas condutoras são colocadas separadas pelo ar formando um capacitor. Esse capacitor é chamado de capacitor de acoplamento e através de uma tensão CA aplicada, é possível transmitir potência entre as duas placas. Essa tecnologia não é indicada para aplicação de carregamento de veículos devido à baixa eficiência em grandes gaps entre as placas.
- **Engrenagem Magnética:** No método de engrenagem magnética dois motores de ímãs magnético são posicionados lado a lado. Ao aplicar uma corrente na bobina do motor transmissor, um torque é criado e o motor começa a girar. O movimento do campo magnético provocado pelos ímãs permanentes induz um torque no motor receptor. O segundo motor então opera como um gerador transmitindo energia. Por causa dos efeitos de desalinhamento e por necessitar de uma velocidade constante e síncrona entre os dois motores essa tecnologia não é indicada para carregamento de VE.
- **Indutivo:** No carregamento indutivo, a transferência de energia segue o mesmo princípio de Nikola Tesla no qual se usa duas bobinas, uma transmissora e outra receptora. A bobina transmissora gera um campo magnético variante que induz uma tensão na bobina receptora, semelhantemente ao funcionamento de um transformador. Geralmente um esquema de capacitores e indutores chamado compensador é colocado antes da conexão com a bobina para produzir um efeito ressonante. Essa



técnica alivia os problemas de desalinhamento e grande gap de ar. Portanto esse é o sistema usado no carregamento de veículos elétricos.

Em [Panchal, Stegen e Lu \(2018\)](#) é realizada uma revisão dos métodos de transferência de potência sem fio.

### 3.1.2.2 Topologias dos transmissores

Na transferência pelo método indutivo as bobinas transmissoras e receptora são a parte mais importante. Diversas bobinas são propostas e estudadas na literatura ([SHI et al., 2014](#)).

As bobinas usadas são planares e possuem diversas geometrias. Elas podem ser classificadas como polarizadas, que geram fluxo apenas na vertical, e não polarizadas que geram fluxo na vertical e na horizontal ([AHMAD; ALAM; CHABAAN, 2017](#)). A bobina circular é um exemplo de bobina não polarizada. Já bobina duplo D é um exemplo de bobina polarizada que fornece uma boa tolerância de desalinhamento. Na [Tabela 3](#) é possível ver diversas geometrias e suas qualidades.

Ademais, placas ferromagnéticas são instaladas atrás da bobina. Essas placas direcionam as linhas de fluxo geradas pela bobina. Elas também melhoram a indutância mútua das bobinas ([PANCHAL; STEGEN; LU, 2018](#)). Além disso, uma placa de alumínio é colocada em baixo dessa estrutura. O alumínio fornece uma função estrutural e impede a penetração do fluxo para a parte de baixo da superfície.

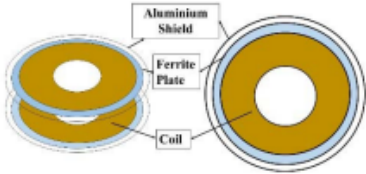
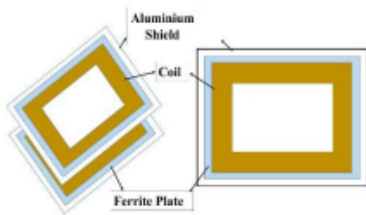
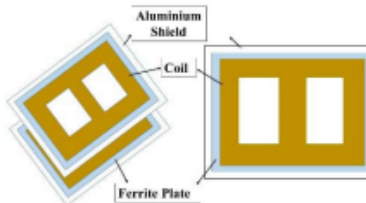
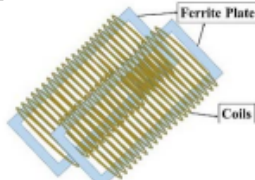
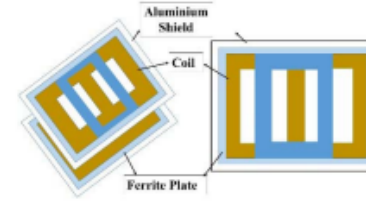
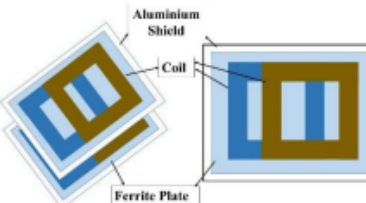
Por fim, duas placas de PVC, uma em cima e outra embaixo, são colocadas com a função de proteção. Esse conjunto é conhecido como PAD ou transmissor ([MACHURA; LI, 2019](#)). Uma estrutura semelhante é colocada no fundo do veículo. A [Figura 16](#) mostra as camadas da estrutura de um PAD.

### 3.1.2.3 Redes de compensação

Para minimizar o efeito do desalinhamento, do grande gap e transferir a potência necessária, uma rede de indutores e capacitores são usados na entrada da bobina transmissora e na saída da bobina receptora. Essa rede de capacitores e indutores, chamada de compensação ou tanque ressonante, deve trabalhar na frequência de ressonância. Isso elimina a diferença de fase entre corrente e tensão diminuindo a potência reativa ([MACHURA; LI, 2019](#)). Já a compensação no secundário maximiza a transferência de potência.

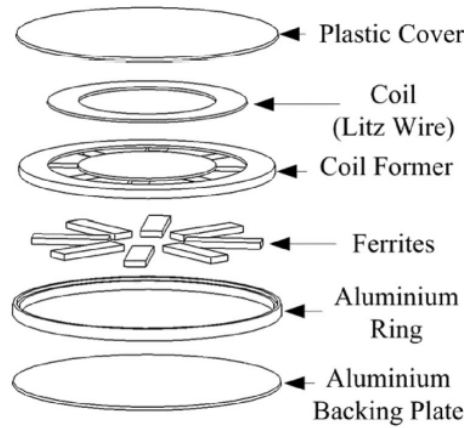
A disposição dos indutores e capacitores gera características diferentes. Uma topologia muito usada é a série-série (SS), no qual existe um capacitor em série com a bobina transmissora e outro em série com a bobina receptora. Essa topologia permite zerar a po-

Tabela 3 – Geometrias de bobinas polarizadas e não polarizadas.

Type	Shape	Features
<b>Polarized Pad Circular</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• It has lower coupling than other types of similarly sized coil geometries over identical air gaps and misalignments.</li> <li>• CP have same tolerance to misalignment in all directions, i.e. non-directional.</li> <li>• Circular geometry is still the most widely used for static EV charging applications [126]</li> <li>• It was established in [121] and [10] that regardless of how optimized the design is, CPs exhibit a null in their mutual coupling profile when offset horizontally by approximately 40% of the pad diameter.</li> <li>• This magnetic null occurs due to a phenomenon known as flux cancellation.</li> </ul>
<b>Polarized Rectangular Pad</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• It increases the flux area, edge flux leakage can be reduced.</li> <li>• Mostly used by dynamic wireless charging track coil. [4] [55], [118], [127]</li> <li>• Better tolerance to alignment in lateral direction, light weight and compact. [26]</li> <li>• Easier to design as compared to spiral. [128]</li> <li>• Rectangular coil is having larger cost effective value and better capability of transferring power.[55]</li> </ul>
<b>Non-Polarized Pad Double-D coil (DD) Coil</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• DDP generates a single-sided flux path, with extremely low leakage flux emanating out of the back, which allows for the addition of aluminum shielding without affecting the efficiency by a significant amount [10].</li> <li>• It also has a higher tolerance to misalignment in a horizontal direction compared with the NPP.</li> <li>• The height of the flux path is the same as the H-shaped pad.</li> <li>• Higher tolerance exists only along the width of the pad, due to coupling null when the horizontal offset is <math>\sim 34\%</math> of the pad length [129].</li> <li>• It generates only the parallel component of the flux, which makes this pad noninteroperable with NPPs.</li> </ul>
<b>Non-Polarized Pad Solenoid</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Smaller, Lighter, more tolerance of misalignment [9] [130],[131].</li> <li>• The solenoid is lighter, smaller and therefore simpler to be mounted in the underneath of the car hence [132] G. Lempidis et al have used solenoid in combination with DD coil.</li> </ul>
<b>Non-Polarized Pad Double-D Quadrature coil</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Addition of a quadrature coil to the DDP to form the DDQP.</li> <li>• This pad can couple and generate both the horizontal and vertical components of the flux and have higher tolerance to misalignments in both the lateral and horizontal directions.</li> <li>• Similar advantages are obtained with the BP with a lesser amount of copper than the DDQP.</li> <li>• Requires two synchronized inverters if used as primary pad, and two synchronized rectifiers for secondary pad.</li> </ul>
<b>Non-Polarized Pad Bi-Polar (BP) coil</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Both the DDQP and BP are interoperable with other types of pads.</li> <li>• Greater tolerance to misalignment and ability to interoperate with other pad types.</li> <li>• Requires two synchronized inverters if used as primary pad, and two synchronized rectifiers for secondary pad.</li> <li>• They are also sensitive to angular misalignments, and coupling can drop over 13% with a growing angular misalignment up to <math>30^\circ</math> [133].</li> <li>• They also require a location or flux sensor and complicated control strategy [129]. This, in turn, increases the overall cost and complexity of the charger. For static charging of personal EVs, the driver can park his/her vehicle within an acceptable misalignment.</li> </ul>

Fonte: Ahmad, Alam e Chabaan (2017, p. 52)

Figura 16 – Estrutura de um PAD circular.



Fonte: [Machura e Li \(2019\)](#)

tência reativa. Além disso, a topologia SS não é sensível à variação de carga ([MACHURA; LI, 2019](#)).

Outra topologia bem estudada recentemente é a LCC, composta de um indutor série, um capacitor paralelo e um capacitor série com a bobina. Essa topologia tem características semelhantes à topologia SS. Porém, a topologia LCC fornece uma maior tolerância contra desalinhamento ([MACHURA; LI, 2019](#)).

Na [Tabela 4](#) pode ser visto um resumo das qualidades e tipos de compensação.

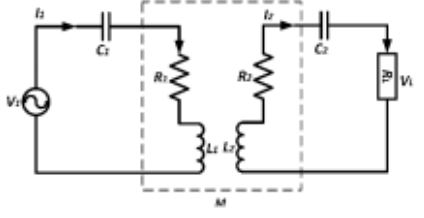
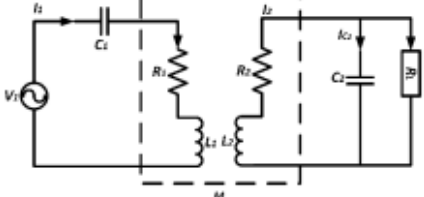
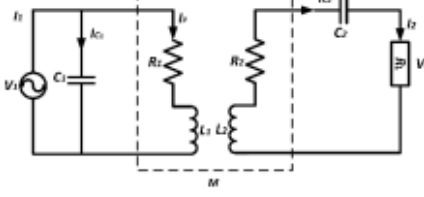
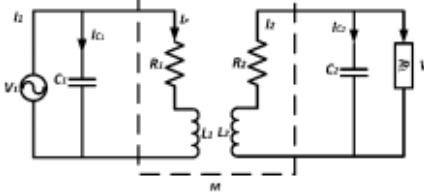
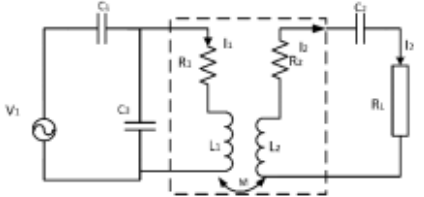
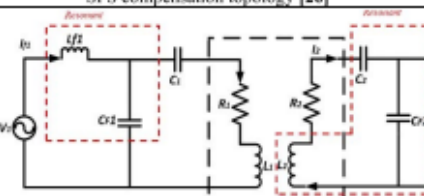
#### 3.1.2.4 Carregamento estático

Uma das aplicações do carregamento WPT é o carregamento estático. Neste caso, a bobina transmissora fica no chão. Quando o VE estaciona sobre ela o carregamento se inicia. Como o veículo fica estacionado, é criado um link de comunicação sem fio entre o sistema gerenciador da bateria e o sistema de carregamento para ajustar níveis de potência.

Para melhorar o alinhamento entre o veículo e a bobina um sistema de direcionamento de estacionamento pode ser usado.

Portanto, o funcionamento do carregamento sem fio estacionário se assemelha bastante ao carregamento condutivo, com as vantagens mencionadas no início da seção [3.1.2](#). Porém a eficiência desse sistema é um pouco menor devido a transmissão no ar. Além disso, devido a perda nas bobinas a potência desse sistema fica restrita à cerca de 20kW ([YILMAZ; KREIN, 2012](#)).

Tabela 4 – Topologias de compensação e suas qualidades

Topology	Specification
 <p style="text-align: center;"><b>SS Topology</b></p>	<p style="text-align: center;">Total Impedance</p> $\bar{Z}_{total}(SS) = \left( R_1 + j(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}) \right) + \frac{\omega^2 M^2}{\left( R_2 + R_L + j \left( L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega} \right) \right)}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• S/S compensation is designed to have a constant-current output as well as constant voltage output</li> <li>• Operating frequency is unique for constant current operation as follows.</li> <li>• <math>\omega = 1/\sqrt{L_1 C_1}</math></li> <li>• Operating frequency is not unique for constant voltage operation</li> </ul>
 <p style="text-align: center;"><b>SP Topology</b></p>	<p style="text-align: center;">Total Impedance</p> $\bar{Z}_{total}(SP) = \left( R_1 + j(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}) \right) + \frac{\omega^2 M^2}{\left( R_2 + jL_2\omega + \left( \frac{R_L}{1 + jR_L C_2\omega} \right) \right)}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• SS and SP are more economically suitable for high power transmission</li> <li>• SS and SP compensation topologies are more suitable for variable load conditions since the resonance is guaranteed</li> </ul>
 <p style="text-align: center;"><b>PS Topology</b></p>	<p style="text-align: center;">Total Impedance</p> $\bar{Z}_{total}(PS) = \frac{1}{\left( R_1 + jL_1\omega \right) + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_L + j \left( L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega} \right)} + jC_1\omega}$
 <p style="text-align: center;"><b>PP Topology</b></p>	<p style="text-align: center;">Total Impedance</p> $\bar{Z}_{total}(PP) = \frac{1}{\frac{1}{\left( R_1 + jL_1\omega \right) + \frac{\omega^2 M^2 (1 + jR_L C_2\omega)}{R_2 + (R_2 + jL_2\omega)(1 + jR_L C_2\omega)}} + jC_1\omega}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Parallel-parallel (PP) topologies for both the transmitter and receiver have higher impedance and can be driven more easily than SS topologies. A novel receiver circuit topology for a cordless EV charger is proposed in [156]</li> </ul>
 <p style="text-align: center;"><b>SPS compensation topology [26]</b></p>	$Z_{total}(SPS) = \frac{\bar{Z}_{11}}{1 + Z_{11} jC_2\omega_a}$ <p style="text-align: center;">where, <math>\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2</math>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• It is the combination of SS and PS topology.</li> <li>• Keeping K=1, system act as PS topology</li> <li>• Lower the value of Kc higher the possible rated misalignment rated power.</li> <li>• It can tolerate very high misalignment.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;"><b>LCC Compensation topology</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LCC topology was proposed by researchers from the University of Michigan, Dearborn (UM-Dearborn) [27]</li> <li>• <math>P = \frac{8k\sqrt{L_1 L_2} V_{in} V_{out}}{\pi^2 \omega L_{f1} L_{f2}}</math> where <math>k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}</math></li> <li>• Vin is the input voltage of the inverter stage</li> <li>• Vout is the battery pack voltage</li> </ul>

Fonte: Ahmad, Alam e Chabaan (2017, p. 54)

### 3.1.2.5 Carregamento dinâmico

O carregamento dinâmico, também conhecido como “on-line” ou “in-motion”, permite amenizar uma grande barreira de implantação do VE, aumentando a autonomia. Por permitir a recarga do veículo durante o seu movimento a requisição da bateria pode ser reduzido em até 20% (MUSAVI; EDINGTON; EBERLE, 2012).

No carregamento WPT dinâmico, as bobinas transmissoras são instaladas debaixo da superfície e a bobina receptora fica em baixo do veículo. Quando o veículo passa em cima da bobina, ela é energizada e o processo de carregamento se inicia.

A bobina instalada no chão pode ter duas configurações. Na primeira, a bobina transmissora é muito maior que a bobina receptora, chamada de bobina alongada, geralmente com 5 a 10 metros de comprimento (PANCHAL; STEGEN; LU, 2018). Essa configuração fornece uma característica de potência constante na rede, além de diminuir o número de componentes e a complexidade de controle. Em contrapartida, a eficiência desse sistema é baixa, pois toda a bobina deve ser energizada e apenas o trecho onde o carro está de fato estará sendo usado. A manutenção do sistema também é mais difícil já que em caso de um rompimento identificar o trecho fica mais difícil por causa do tamanho. Além disso, a potência máxima do conversor que alimenta a bobina deve ser maior, pois dois veículos poderiam estar carregando na mesma bobina.

Na outra configuração, o sistema de carregamento é composto por diversas bobinas segmentadas, com o tamanho comparável com a bobina receptora no veículo. Cada bobina tem seu próprio conversor, diminuindo a potência máxima do conversor. Além disso, é possível energizar a exata bobina em que o VE se encontra, permitindo uma maior eficiência. Contudo um maior número de componentes é necessário para energizar cada bobina. Outro fato é que o consumo de potência se torna pulsante, o que trás muitos prejuízos para a rede elétrica. Em Azad e Pantic (2019) um super-capacitor é usado para minimizar o efeito de potência pulsante. Contudo, para ambas as configurações de bobinas. A instalação desse sistema necessita que o asfalto seja refeito para cobrir os PAD's de carregamento.

Outra dificuldade do sistema de carregamento dinâmico sem fio é a comunicação entre o sistema de potência e o carro. A comunicação é necessária para transmitir o estado de carga da bateria, valor de potência entregue no secundário, ou até mesmo, implementar um sistema de cobrança (MACHURA; LI, 2019). Porém, devido ao breve momento de interação entre a bobina do carro e do carregador (cerca de 100 mili segundos à velocidade de 50km/h (TAVAKOLI; PANTIC, 2017)) e também a quantidade de veículos simultâneos carregando, a comunicação fica dificultada.

Ainda, outro problema enfrentado pelo WPT dinâmico é o desalinhamento das bobinas. Assim como no carregamento estático, o desalinhamento provoca perda de eficiência

na transmissão. Porém, no caso dinâmico esse problema é agravado devido ao movimento do veículo. O uso de compensação e PAD menos susceptível ao desalinhamento como o LCC e o PAD duplo D (DD) pode diminuir o problema (AHMAD; ALAM; CHABAAN, 2017). Em Hwang et al. (2017) é proposto um sistema de auto alinhamento das bobinas através de motores. Contudo a aplicação desse método é muito caro.

Além disso, devido ao fato de as bobinas serem colocadas debaixo da superfície a implementação da tecnologia de carregamento sem fio é muito custosa, visto que todo o asfalto do trecho deve ser refeito, além dos componentes do carregador serem caros.

Por fim, o conversor utilizado no carregamento estático permanece o mesmo que no carregamento dinâmico, mudando apenas o controle.

### 3.1.2.6 Padronização

O uso de campos magnéticos variantes, com relativa alta potência pode trazer riscos para a saúde além de choques (MACHURA; LI, 2019). Portanto é necessária a padronização do sistema de carregamento sem fio. Atualmente, essa padronização é regida pelos seguintes órgãos: Society of Automotive Engineers (SAE), International Electro Technical Commission (IEC) e Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (AHMAD; ALAM; CHABAAN, 2017).

### 3.1.2.7 Trabalhos futuros

Embora o carregamento por WPT ainda seja uma tecnologia emergente (AHMAD; ALAM; CHABAAN, 2017), algumas implementações físicas já podem ser vistas. Como é o caso do projeto OLEV<sup>2</sup>, desenvolvido no Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) (HUH; RIM, 2011).

Mas algumas tecnologias ainda estão sendo pesquisadas. Por exemplo, a tecnologia In-Wheel utiliza a bobina receptora no pneu do veículo (Figura 17). Isso reduz problemas com grandes e variáveis gaps (PANCHAL; STEGEN; LU, 2018).

## 3.2 Conclusões do capítulo

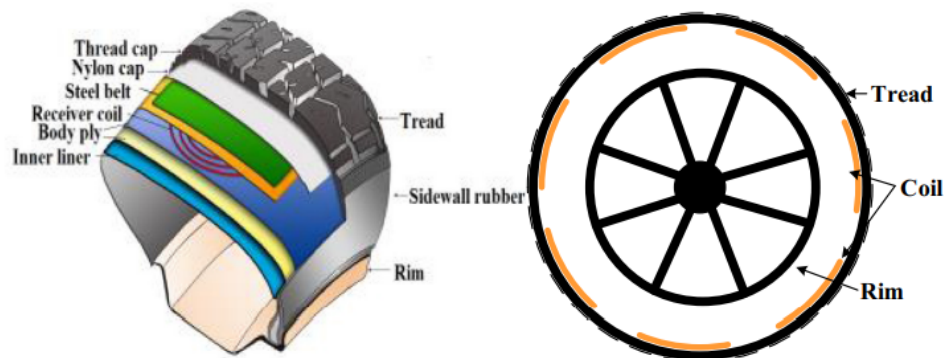
Esse capítulo mostrou que existem dois tipos de carregadores. Os carregadores a condução e os carregadores sem fio, possuindo vantagens e desvantagens entre eles. Além disso, os carregadores podem ser classificados quanto a potência em Level 1, 2 ou Level 3. Eles também podem ser *on-board* ou *off-board*, tendo diferentes limitações.

Ademais, esse capítulo abordou as principais topologias de circuitos usados no carregamento a condução. Para o carregamento dinâmico foram abordado os principais

---

<sup>2</sup> Online Electric Vehicle

Figura 17 – Estrutura de um sistema In-Wheel.



Fonte: Panchal, Stegen e Lu (2018)

componentes como as bobinas e os circuitos de compensação. Foi visto que a bobina é um elemento muito importante para a eficiência do sistema.

Por fim, esse capítulo mostrou que o carregamento dinâmico sofre com alguns problemas como o custo de implementação, perda de eficiência com o desalinhamento e dificuldade na comunicação. Mas diminui bastante a necessidade da bateria diminuindo o valor do veículo.





## 4 Metodologia

Esse capítulo aborda a metodologia que foi usada na obtenção dos resultados deste trabalho. É explicado como a pesquisa bibliográfica foi realizada e também como foi projetado os circuitos usados durante a investigação do conversor de entrada pela simulação.

### 4.1 Pesquisa bibliográfica

Primeiramente, adicionalmente ao estudo apresentado no [Capítulo 3](#), foi realizada uma pesquisa bibliográfica. A pesquisa bibliográfica tem o intuito de levantar as topologias que são mais usadas na atualidade. Além disso, a pesquisa levantou as características necessárias para o carregamento dinâmico. As características citadas aqui se baseiam em minimizar a complexidade da topologia e o custo envolvido na produção do sistema.

A base de dados escolhida foi a IEEE Xplore. As palavras chaves utilizadas foram:

- Wireless dynamic charging
- DWPT
- Battery chargers
- Inductive charging

A ferramenta de busca foi o Google Scholar. O critério de filtragem foram estudos publicados após 2014 e que possuíam mais citações segundo a ferramenta de busca escolhida.

### 4.2 Simulação - Definição dos conversores de entrada

Por existir poucos estudos sobre conversores CA/CC com PFC aplicados ao carregamento dinâmico, uma simulação foi realizada para identificar se para a faixa de potência de trabalho do carregamento dinâmico um conversor mais barato e com menor capacidade de potência é o suficiente.

Assim para a simulação foram considerados três circuitos: o circuito base, o conversor CA/CC SEPIC e o conversor CA/CC Full-bridge derivado do Boost.

Como o intuito do estudo é realizar uma análise comparativa e não propor uma nova topologia, a metodologia abordará apenas as fórmulas usadas e os estudos baseados, sem se preocupar com o desenvolvimento de cada equação.

O software utilizado para a simulação foi o PSIM. Os diodos são modelados como diodos de uso geral. As chaves semicondutoras são representadas como IGBT. Os demais componentes podem ser considerados como ideais.

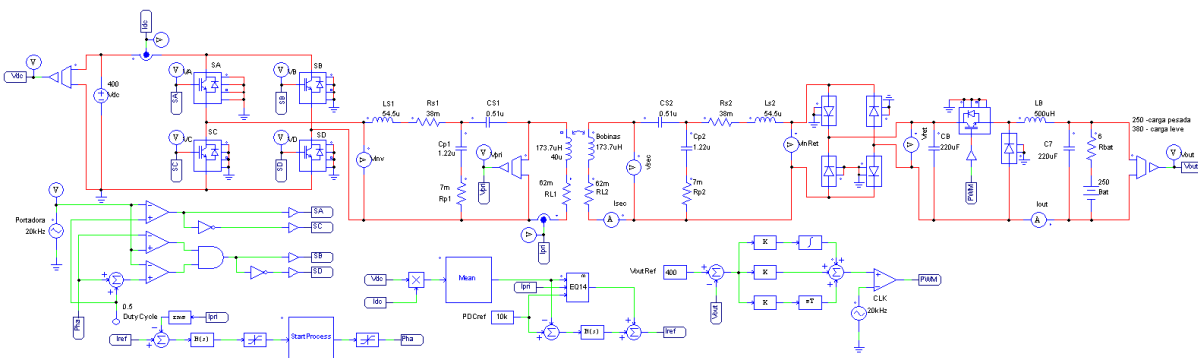
#### 4.2.0.1 Circuito base

O circuito base, definido pela pesquisa bibliográfica, é composto pelo inversor, bobinas transmissoras e conversor CA/CC do secundário. Esse circuito se baseou no trabalho proposto em [Tavakoli e Pantic \(2017\)](#), pois a topologia apresentada nesse trabalho é muito próxima da topologia preferida descoberta pela pesquisa bibliográfica.

Contudo, algumas modificações foram feitas, pois o objetivo é averiguar o funcionamento dos conversores CA/CC de entrada. Primeiramente, as informações geradas por um sensor de alinhamento das bobina foi substituído por um valor constante para simular um perfeito alinhamento das bobinas. Além disso a potência de trabalho foi diminuída para 10kW para se adequar aos níveis de potência do Level 2 ([Tabela 1](#)). Para isso a tensão de entrada foi reduzida de 600 para 400V. O restante do circuito foi mantido intacto. Vale ressaltar que as bobinas são modeladas como dois indutores acoplados. O gap e o desalinhamento são configurados alterando a indutância mútua das bobinas acopladas. Assim, para simular um perfeito alinhamento entre as bobinas a indutância mutua foi mantida no valor máximo que é de 38uH ([TAVAKOLI; PANTIC, 2017](#)).

Portanto, o circuito utilizado na simulação juntamente com a malha de controle pode ser visto na [Figura 18](#). As equações de projeto e dos compensadores pode ser vista em [Tavakoli e Pantic \(2017\)](#).

Figura 18 – Circuito base utilizado na simulação.



Fonte: Autor

### 4.2.1 Conversor CA/CC SEPIC

Para o conversor SEPIC, foi escolhido o modo DCM por dois motivos: ele tem uma característica de carga resistiva na entrada (PFC natural) e também tem menor capacidade de potência (SINGH et al., 2011). O projeto do circuito se baseou nas equações propostas em Jørgensen (2019), Tibola e Barbi (2013) e Falin (2008).

Como não tem capacitor de entrada, a tensão da rede é  $220V_{rms}$  e a tensão de saída tem que ser  $400V_{dc}$  o duty cycle é definido por:

$$\frac{V_{dc}}{V_{ac_{pico}}} = \frac{D}{1-D} \quad \therefore D = 0.56 \quad (4.1)$$

O limite de condução contínua é dada por (JØRGENSEN, 2019):

$$L_2 \geq (1-D) \frac{R_o}{2f_s} \quad (4.2)$$

Assim, para tensão de saída igual à  $400V_{dc}$  e potência igual 10kW,  $R_o$  será  $14.55\Omega$ . Utilizando a mesma frequência do circuito base, que é 20kHz, e a Equação 4.2 tem-se que:

$$L_{2_{critico}} = 160\mu H$$

Para assegurar condução descontínua:

$$L_2 = 1/4 * L_{2_{critico}} = 40\mu H$$

$$L_1 = L_{2_{critico}} = 160\mu H$$

Em modo descontínuo a tensão de saída depende da carga, portanto  $V_{dc}$  é dado por (TIBOLA; BARBI, 2013):

$$V_{dc} = V_{rms} * D \sqrt{\frac{3 * R_o}{4 * f_s * L_{eq}}} \quad (4.3)$$

Onde:

$$L_{eq} = L_1 // L_2$$

Portanto, para condução descontínua  $D = 0.44$ . O capacitor  $C_1$  é dado por (FALIN, 2008):

$$C_1 = \frac{I_o D}{\Delta V_{c_1} f_s} \quad (4.4)$$

Para  $V_{dc}$  igual a 400V e  $P_o$  igual a 10kW,  $I_o = 25A$ . Portanto para  $\Delta V_{c_1} = 10\% V_{dc} = 40V$  tem-se:

$$C_1 \simeq 10\mu F$$

O capacitor de saída  $C_2$  deve filtrar um ripple com o dobro da frequência da rede que é 120Hz (HUSSEIN; ABDI; MASSOUD, 2021). Portanto para  $\Delta V_{c_2} = 10\% V_{dc} = 40V$  tem-se que (FALIN, 2008):

$$C_2 = \frac{I_o D}{\Delta V_{c_2} f_s} \simeq 2mF \quad (4.5)$$

Para melhorar a estabilidade, o valor de  $C_2$  foi aumentado para 5mF.

O filtro LC de entrada foi projetado com base em Sclocchi (2010). Portanto, a frequência de corte do filtro foi escolhida 10% da frequência de chaveamento, ou seja 2kHz. A frequência de corte é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_F}} \quad (4.6)$$

Escolhendo  $C_F = 20\mu F$  tem-se que:

$$L_F \simeq 316\mu H$$

Para que o filtro EMI não influencie no controle, o pico de impedância de saída do filtro deve ser atenuado. Assim, o amortecimento escolhido foi através de um resistor e capacitor em paralelo (SCLOCCHI, 2010). O valor da resistência e do capacitor é dado por:

$$R_d = \sqrt{\frac{L_F}{C_F}} \simeq 3.97\Omega \quad (4.7)$$

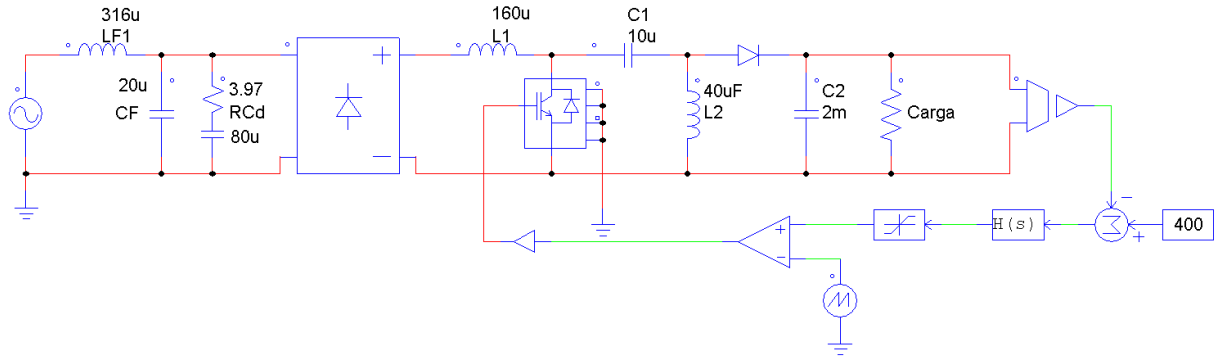
$$C_d = 4 * C_F = 80\mu F \quad (4.8)$$

Por fim, o SEPIC operando em DCM e com função de correção do fator de potência (PFC) pode ser aproximado por uma função de transferência de primeira ordem (CHEN; LAI, 2015). Para isso, a função de transferência da malha de controle precisa ter uma frequência de corte menor que a frequência da rede. Além disso, devido a característica natural de carga resistiva, apenas é necessário um simples loop controlando a tensão de saída. Assim, o compensador escolhido é composto por uma parcela com a mesma função de transferência do SEPIC seguido de um compensador proporcional derivativo. Os valores dos polos e zero foram determinados graficamente através de uma análise gráfica no MatLab, buscando uma frequência de corte próxima de 10Hz e uma margem de fase próxima de 60°. Portanto a função de transferência do compensador é:

$$G_c(s) = 6 \frac{34s + 1000}{s^2 + 199100s + 72295} \quad (4.9)$$

A malha de controle e o circuito descrito usado na simulação pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Circuito SEPIC utilizado na simulação.



Fonte: Autor

#### 4.2.2 Conversor CA/CC Full-Bridge derivado do Boost

O conversor CA/CC Full-Bridge derivado da topologia Boost foi escolhido por ter maior capacidade de potência (SINGH et al., 2011), além de possuir melhor qualidade da corrente na entrada. Para este conversor foi escolhido o modo de condução contínuo (CCM) pois permite um melhor controle do PFC (MAHMUD; TAO, 2013). O cálculo dos componentes do Boost Full-bridge foi realizado com base em Mohan, Undeland e Robbins (2003).

Assim os mesmos parâmetros foram adotados:  $V_{dc} = 400V$ ,  $P_o = 10kW$ ,  $V_{ac} = 220V_{rms}$  e  $f_s = 20kHz$ . Deve-se ressaltar que para o Full-bridge a frequência de chaveamento é o dobro da frequência de comando (40kHz). A relação entre a saída e a entrada é dada por (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003):

$$\frac{V_{dc}}{V_{ac_{pico}}} = \frac{1}{1-D} \quad \therefore D = 0.28 \quad (4.10)$$

A corrente de entrada é dada por:

$$I_{in} = \frac{I_{dc}}{1-D} \quad (4.11)$$

Assim, para  $I_{dc} = 25A$  a corrente de entrada é:

$$I_{in} = 35A$$

Considerando o ripple de corrente no indutor de 30% da corrente de entrada (10,5A), e que o ripple de corrente é dado por:

$$\Delta I_{L_i} = \frac{V_{dc} D (1-D)}{L_i 2f_s} \quad (4.12)$$

Portanto, o indutor de entrada é:

$$L_i = \frac{400 * 0.26 * (1 - 0.26)}{10.5 * 20k * 2} \simeq 190\mu H$$

O capacitor de saída é dado por:

$$C_o = \frac{DI_d c}{f_r \Delta V_{dc}} \quad (4.13)$$

Onde  $f_r$  é o dobro da frequência da rede. Portanto para  $\Delta V_{dc} = 40V$ .

$$C_o \simeq 2mF$$

A técnica de controle escolhida foi o controle por corrente média, pois esse controle mantém a frequência constante e não precisa de uma rampa de compensação (ROSSETTO; SPIAZZI; TENTI, 1994). O cálculo dos da função de transferência dos compensadores foi baseado no artigo Ekemezie (2007). Assim para o loop de tensão a função de transferência encontrada é dada por:

$$G_{CV} = 0.96 \frac{1 + 0.0059s}{0.0059s} \quad (4.14)$$

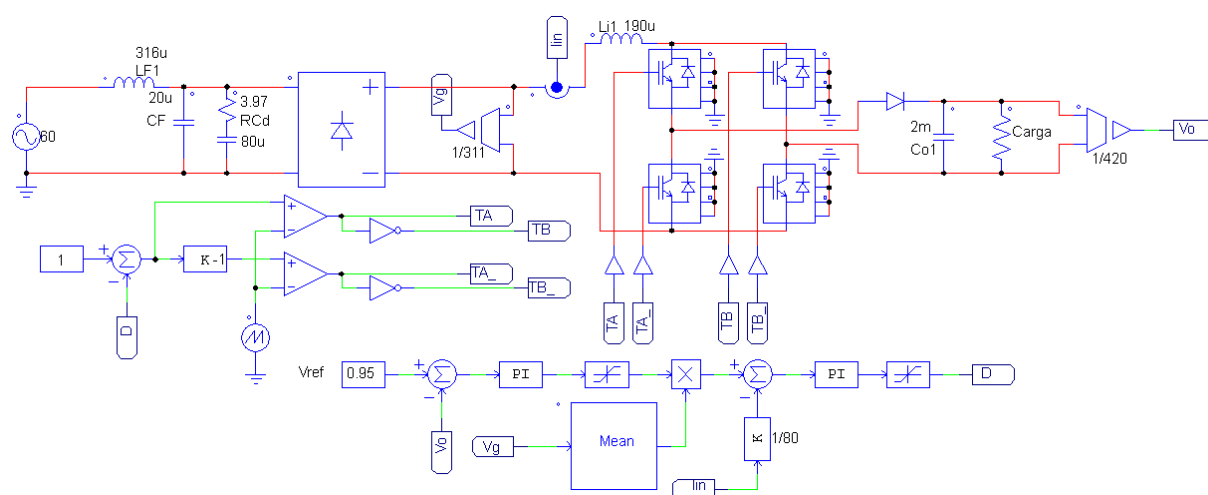
Para o loop de corrente a função de transferência encontrada é dada por:

$$G_{CA} = 1 \frac{1 + 0.000199s}{0.000199s} \quad (4.15)$$

O filtro de entrada é projetado do mesmo jeito que para o conversor CA/CC SEPIC.

Portanto o esquema de controle e o circuito utilizado na simulação pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Circuito do conversor CA/CC Full-bridge baseado no Boost utilizado na simulação.



Fonte: Autor





## 5 Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta primeiramente os resultados encontrados através da pesquisa bibliográfica. É realizada uma análise das informações obtidas para determinar a topologia base e as características essenciais para o funcionamento do carregamento dinâmico.

Em seguida foi apresentado os resultados gerados pela simulação considerando à avaliação dos dois conversores de entrada, mantendo o circuito base definido pela pesquisa.

### 5.1 Análise das informações geradas pela pesquisa bibliográfica

A conversão de uma tensão CA de baixa frequência para uma tensão CA de alta frequência (CA/CA) pode ser feita em um ou dois estágios. Assim, a primeira característica do sistema de potência do carregamento sem fio dinâmico (DWPT) a ser analisada é a topologia do conversor CA/CA.

A conversão em dois estágios consiste em um conversor CA/CC seguido de um conversor CC/CA. O conversor de entrada CA/CC tem a função de correção do fator de potência (PFC) para valores de acordo com as normas (SINGH et al., 2011). Um filtro EMI deve ser colocado na entrada do conversor CA/CC para diminuir a distorção na corrente da rede. Em Singh et al. (2011) e García et al. (2003) é realizada uma revisão dos principais conversores CA/CC com PFC. Depois do conversor CA/CC, é necessário introduzir um capacitor para minimizar o ripple na tensão CC, permitindo absorver a potência pulsante na entrada e facilitar o controle da tensão.

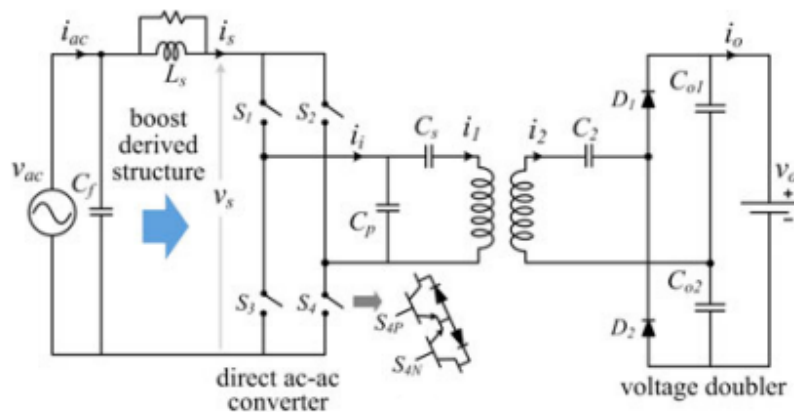
Após o circuito de entrada, vem o conversor CC/CA. Esse conversor, também conhecido como inversor, transforma a tensão contínua em alternada com a frequência escolhida. Existem várias topologias de inversores, mas para a aplicação de WPT o mais usado é o inversor em ponte completa (HUYNH et al., 2020).

A conversão em apenas um estágio é realizada, principalmente, através de uma topologia chamada de conversor matricial. Este conversor transforma a tensão alternada de frequência fixa diretamente em uma tensão alternada de frequência variável. A conversão em um estágio elimina o capacitor necessário na topologia com dois estágios, reduzindo o tamanho e o custo do projeto. Além disso, o conversor matricial derivado da topologia Buck é mais eficiente, como mostrado em Huynh et al. (2020). O estudo mostra também que o conversor em um estágio derivado da topologia Boost possui menor distorção harmônica que o conversor em dois estágios.

Em Samanta e Rathore (2017) é proposto um conversor matricial derivado da

topologia Boost, aplicado na tecnologia de carregamento dinâmico WPT. Neste estudo é proposto um sistema de controle que melhora a qualidade da corrente drenada da rede, além de oferecer *soft switching* para as chaves. O circuito proposto no estudo pode ser visto na [Figura 21](#).

Figura 21 – Conversor matricial derivado da topologia Boost proposto no estudo [Samanta e Rathore \(2017\)](#).



Fonte: [Samanta e Rathore \(2017\)](#)

Porém, o conversor CA/CA em um estágio possui algumas desvantagens. Primeiramente, o controle deste tipo de conversor é mais difícil. Portanto, garantir todos os requerimentos do projeto fica mais complicado e portanto com um custo de produção maior. Além disso, esse conversor precisa usar chaves bidirecionais, que pode ser feita usando duas chaves convencionais. Outro fator é que a corrente na bateria tem uma característica pulsante, com frequência igual a frequência da rede. Isso causa uma leve deterioração da bateria. Por último, a desvantagem mais relevante é devido ao fato que o carregamento dinâmico tem um perfil de potência pulsante.

A pulsação da potência na rede, no pior caso, pode levar a instabilidade ([AZAD; PANTIC, 2019](#)). Uma solução para esse problema causado pelo DWPT é usar a bobina alongada. Porém, essa configuração de bobina causa maiores perdas e tem difícil manutenção. Outra solução, usando bobinas segmentadas, é inserindo um elemento armazenador no conversor CA/CA no lado primário, como mostrado em [Azad e Pantic \(2019\)](#).

Assim o conversor matricial, para reduzir o comportamento de potência pulsante, ainda sim precisaria do capacitor como elemento armazenador.

Portanto, a topologia preferida para o carregamento sem fio dinâmico (DWPT) é a topologia em dois estágios. O conversor CC/CA do segundo estágio é o inversor em ponte completa, por ele ter a saída muito próximo de uma senoide e também devido ao

fato desse conversor ser o mais usado na literatura para o WPT. O conversor usado no primeiro estágio será discutido mais adiante.

Outro aspecto do sistema WPT é o controle. Como dito na Seção 3.1.2.5, a comunicação entre o primário e o secundário do carregador é complicada, portanto diminuir o fluxo de dados é importante. Desse modo, controlar a tensão de saída (na bateria) variando parâmetros do primário, como duty cycle do inversor, deve ser evitado.

Portanto, é necessário que exista um retificador controlado ou um conversor CA/CC no secundário (lado da bateria). Devido ao fato desse conversor não precisar corrigir o fator de potência e da tensão alternada de entrada ser de alta frequência, uma ponte de diodos retificadora seguida de um pequeno capacitor e um conversor CC/CC é o suficiente. Assim, a topologia do secundário mais provável é um conversor CA/CC possuindo uma ponte de diodos retificadora e um conversor CC/CC como a topologia Boost, Buck ou outra similar. Vale ressaltar que o conversor CA/CC da saída depende da tensão da bateria ser maior ou menor do que a tensão retificada, e também não precisa de isolamento, que é fornecido pelas bobinas.

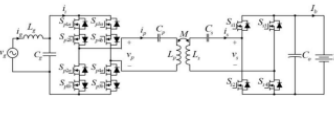
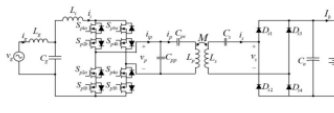
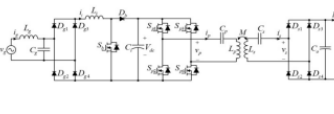
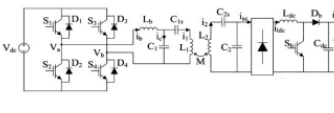
Além do controle da tensão de saída, é necessário o controle da potência recebida pela bobina secundária (bobina receptora). A potência recebida depende do alinhamento entre a bobina transmissora e a receptora (PANCHAL; STEGEN; LU, 2018). Assim, através da informação do alinhamento é possível realizar o controle sem usar uma comunicação.

O estudo Diep, Trung e Minh (2019) propõem um método para estimar o coeficiente de acoplamento através da tensão e corrente na bobina transmissora. O coeficiente de acoplamento depende do alinhamento entre a bobina transmissora e receptora e pode ser usado para estimar a potência no secundário. Porém, esse método ainda necessita de um sensor para identificar a presença do veículo e ativar o carregador. Já em Tavakoli e Pantic (2017), o sensor de detecção do veículo é usado para medir o deslocamento das bobinas. A informação das características da bobina e do desalinhamento é usado para determinar a relação entre a potência de entrada e a potência no secundário.

Portanto, um dos dois métodos, ou algum similar pode ser usado no controle do lado primário. Vale ressaltar que a técnica de controle mais usada no sistema de DWPT é composto por dois loops, chamado Dual-loop. O loop interno mantém a corrente do primário na referência. O loop externo mantém a potência do secundário na referência. A variável de controle é o ângulo de defasagem entre as pernas do inversor. Essa técnica pode ser visto em Diep, Trung e Minh (2019), Tavakoli e Pantic (2017), Miller et al. (2014) e Farajizadeh et al. (2019).

Outro circuito que influencia o conversor em um sistema DWPT é a compensação. O circuito de compensação ou tanque ressonante precisa ser tolerante ao desalinhamento

Tabela 5 – Comparação das topologias analisadas

Descrição	Descrição Lado da bateria	Vantagens	Desvantagens	Diagrama	Avaliação	Fonte
Conversor estágio único matricial baseado em buck. Usa compensação SS e não possui capacitor de entrada.	Retificador controlado e capacitor para diminuição do ripple de tensão.	# Não possui capacitor de entrada. # Maior eficiência # Controle mais simples no lado da bateria.	# Precisa de sincronia com o retificador. # Tem um controle mais complicado # A saída possui corrente com ripple na frequência da tensão de entrada. # Possui muitas chaves.		Embora o sistema tenha maior eficiência, devido a quantidade de chaves essa topologia se torna muito cara. Outro fato é que ela causa potência de entrada pulsante devido a falta de elementos armazenadores. Isso pode causar prejuízos para a rede.	Huynh et al. (2020)
Conversor estágio único matricial baseado em boost. Usa compensação PS e não possui capacitor de entrada.	Retificador não controlado e capacitor para amenizar o ripple de tensão.	# Causa menor THD na entrada. # Elimina o capacitor de entrada. # Não necessita sincronia com o lado da bateria.	# Possui um controle complicado. # A saída possui corrente com ripple na frequência da tensão de entrada. # Possui muitas chaves. # Maior estresse físico das chaves.		Essa topologia resolve o problema da sincronia com o lado da bateria, em troca de maior estresse físico na chave. Além disso a característica de potência pulsante permanece. Por fim o controle da tensão na bateria fica mais difícil.	Huynh et al. (2020)
Conversor em dois estágios. O primeiro estágio é composto de um conversor AC/DC com PFC baseado em boost. Seguido de um inversor full bridge. Usa compensação SS e um capacitor entre os dois estágios.	Retificador não controlado e capacitor para amenizar o ripple de tensão.	# Controle muito mais simples. # Menor estresse físico das chaves. # Menor número de chaves. # Menor dependência da carga.	# Menos eficiente pela perda em cada estágio. # Controle complicado no lado da bateria.		Cada estágio pode ser otimizado e controlado independentemente, facilitando o controle. Também o capacitor entre os estágios pode ser usado para diminuir o efeito de potência pulsante.	Huynh et al. (2020)
Conversor em dois estágios. O primeiro estágio é composto de um conversor AC/DC com PFC genérico. O segundo usa um inversor full-bridge. Usa compensação LCC e capacitor entre os dois estágios.	Retificador em ponte seguido de um conversor DC/DC baseado em boost e capacitor para diminuição do ripple na tensão.	# Controle muito mais simples. # Menor estresse físico das chaves. # Menor dependência da carga. # Melhor controle no lado da bateria.	# Menos eficiente pela perda em cada estágio.		Nesse esquema, o controle em cada estágio e também no lado da bateria pode ser independente, facilitando bastante o desing e permitindo uma melhor performance.	Wu et al. (2012)

Fonte: Autor

das bobinas e a variação de carga. Assim, a compensação mais usada é a LCC, no lado primário e lado secundário, como pode ser visto nos estudos [Diep, Trung e Minh \(2019\)](#), [Tavakoli e Pantic \(2017\)](#), [Wu et al. \(2012\)](#), [Farajizadeh et al. \(2019\)](#) e [Lu et al. \(2015\)](#).

A Tabela 5 faz um resumo das análises feitas.

## 5.2 Análise do conversor de entrada - Simulação

O circuito base mais adequado para o carregamento dinâmico foi apresentado pela pesquisa e é definido por: um inversor em ponte completa no segundo estágio do primário, seguido da compensação LCC, no primário e no secundário e, por fim, um conversor CA/CC no secundário. Contudo, por falta de estudos de conversores CA/CC com PFC aplicados diretamente ao carregamento dinâmico foi realizada uma simulação utilizando o circuito base e dois conversores CA/CC com PFC.

O intuito dessa análise é verificar a influência do conversor no restante do sistema.

Além disso, é investigado se, para a faixa de potência do Level 2, um conversor com alta capacidade de potência, como o conversor Full-bridge (SINGH et al., 2011), é necessário ou pode ser um conversor mais barato como o Push-pull ou Cúk.

Portanto, foi simulado um sistema WPT com potência máxima de 10kW que foi explicado no Capítulo 4. Foram escolhidos dois conversores CA/CC com PFC que são:

- SEPIC operando em DCM<sup>1</sup>: Foi escolhido devido ao fato de apresentar uma característica resistiva na entrada quando operado em DCM (HUSSEIN; ABDI; MASSOUD, 2021). Isso permite um Fator de Potência (FP) próximo do unitário e menor THD na corrente sem a necessidade de um controle complexo. Porém, esse circuito tem menor capacidade de potência.
- Full-Bridge derivado do Boost operando em CCM<sup>2</sup>: Foi escolhido por tem maior capacidade de potência devido ao fato de dividir as perdas entre as chaves. Além disso, o conversor Boost é o mais usado para PFC por melhorar a qualidade da corrente da rede (GARCÍA et al., 2003). Foi utilizado a técnica de controle da corrente média para realizar a correção do fator de potência.

Primeiramente, foi verificado o funcionamento do circuito com os dois conversores para situação de 100% de carga (10kW) e 20% de carga (2kW) . Para isso foram capturadas a tensão e corrente da saída de cada estágio:

- $V_{out}$  e  $I_{out}$ : Tensão e corrente medidos na bateria (lado secundário).
- $V_{sec}$  e  $I_{sec}$ : Tensão e corrente medidos na bobina do secundário.
- $V_{pri}$  e  $I_{pri}$ : Tensão e corrente medidos na bobina do primário.
- $V_{dc}$  e  $I_{dc}$ : Tensão e corrente na saída conversor CA/CC ou entrada do inversor.

Portanto o funcionamento do circuito para o Full-bridge (letra (a)) e para o SEPIC (letra (b)), considerando 100% de carga pode ser visto nas figuras: Figura 22a, Figura 22b, Figura 23a, Figura 23b, Figura 24a, Figura 24b, Figura 25a e Figura 25b.

O funcionamento do circuito para o Full-bridge (letra (a)) e para o Sepic (letra (b)), agora considerando 20% de carga pode ser visto nas figuras: Figura 26a, Figura 26b, Figura 27a, Figura 27b, Figura 28a, Figura 28b, Figura 29a e Figura 29b.

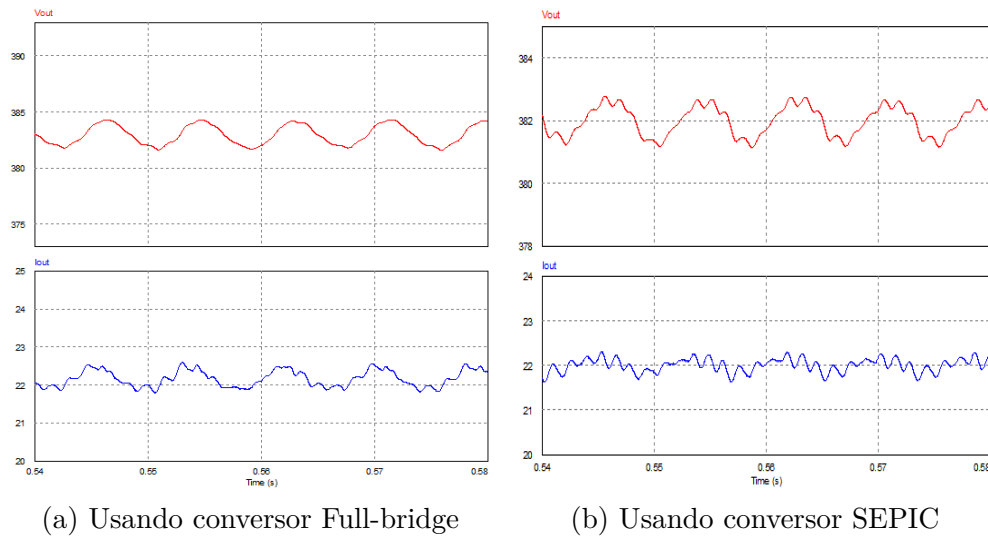
Analisando esses resultados, é possível ver na Figura 22 e Figura 26 que a saída do circuito tem um ripple baixo e também os valores de tensão e corrente são semelhantes

---

<sup>1</sup> Modo de corrente descontínuo

<sup>2</sup> Modo de corrente contínua

Figura 22 – Comportamento da saída do sistema para os dois conversores e 100% de carga.



(a) Usando conversor Full-bridge

(b) Usando conversor SEPIC

Fonte: Autor

para os dois conversores. Além disso é visto que o valor de tensão está bem próximo do desejado que é 400V.

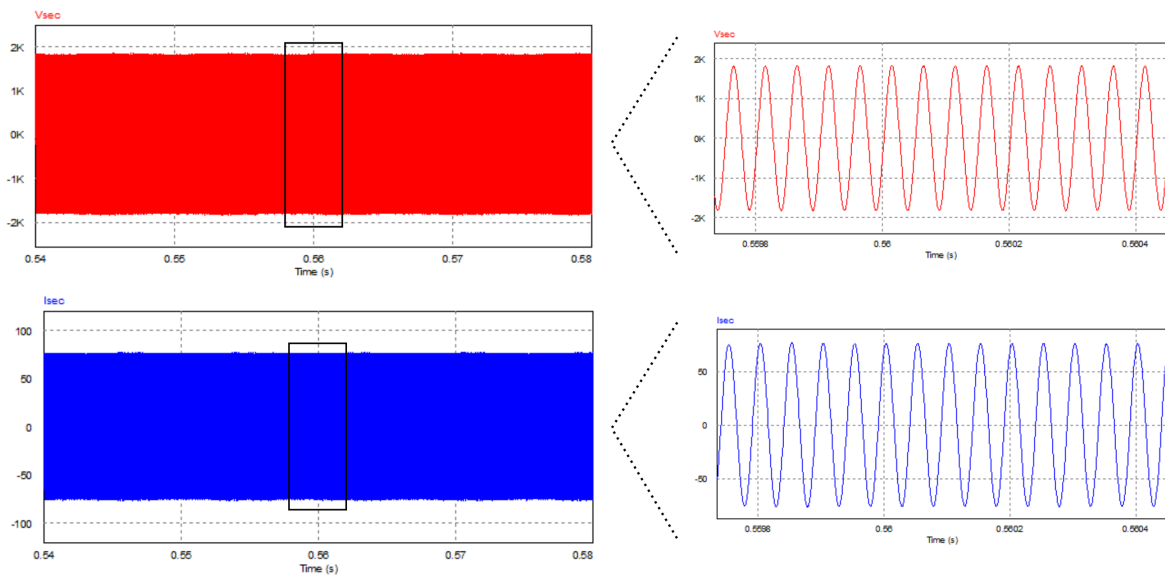
Ainda, é visto que a tensão e corrente no secundário tem um comportamento capacitivo, visto que a corrente está adiantada em relação à tensão, como visto na [Figura 23](#) e [Figura 27](#). A relação é inversa no primário, possuindo um comportamento indutivo por a corrente estar atrasada em relação à tensão, como visto na [Figura 24](#) e [Figura 28](#). Ademais, para 100% da carga é notado tensões muito altas o que é explicado por o sistema ser ressonante, devido ao circuito de compensação. Vale ressaltar que em todos esses resultados, os valores de tensão e corrente e também a frequência dos sinais é semelhante para o SEPIC e Full-Bridge.

Os resultados na entrada do inversor visto na [Figura 25](#) e na [Figura 29](#) mostram que os dois conversores de entrada mantêm a tensão média próxima de 400V. Também o ripple na tensão se mantêm dentro do valor esperado, determinado no [Capítulo 4](#).

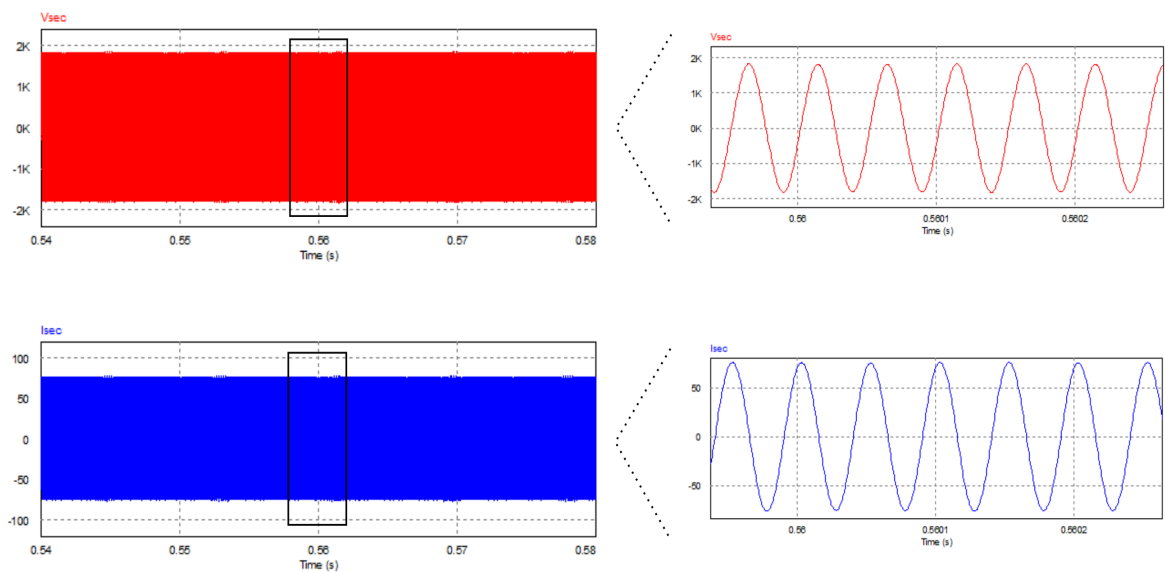
Por fim, os resultados obtidos mostram que o funcionamento do sistema não se altera com a troca do conversor de entrada, como esperado. Portanto o conversor CA/CC do primeiro estágio pode ser otimizado independentemente do restante do circuito.

Assim para analisar o funcionamento do conversor CA/CC de entrada a tensão ( $V_{ac}$ ) e a corrente ( $I_{ac}$ ) da rede foi registrada. Além disso, uma análise em frequência da corrente da rede foi realizada. Esses resultados para os dois conversores, considerando 100% de carga pode ser visto nas figuras: [Figura 30a](#), [Figura 30b](#), [Figura 31a](#) e [Figura 31b](#). Esses resultados considerando 20% de carga pode ser visto nas figuras: [Figura 32a](#), [Fi-](#)

Figura 23 – Comportamento na bobina do secundário do sistema para os dois conversores e 100% de carga.



(a) Usando conversor Full-bridge



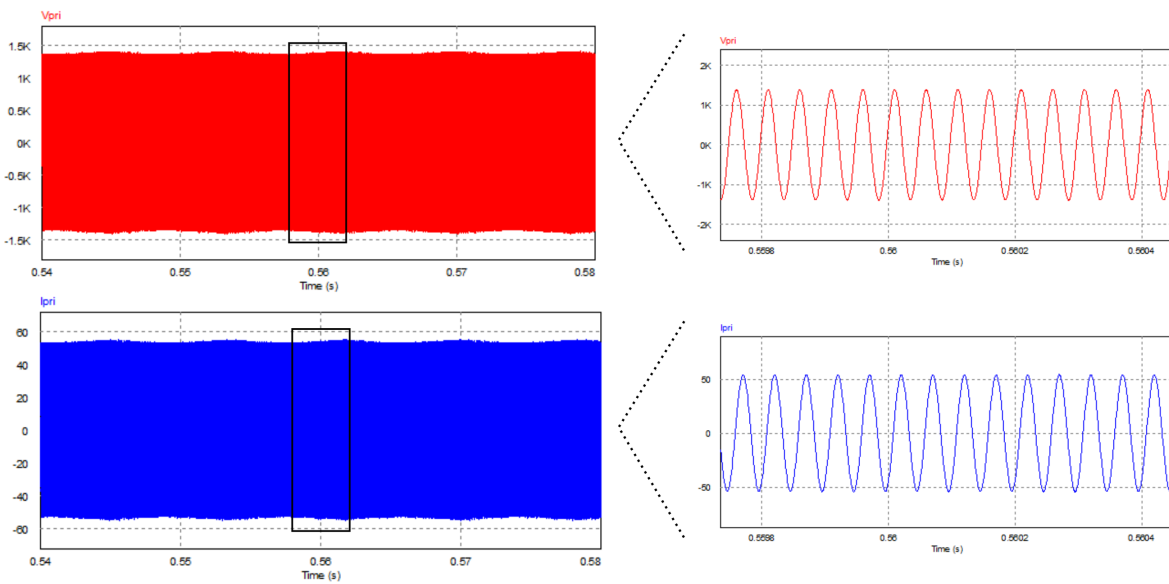
(b) Usando conversor SEPIC

Fonte: Autor

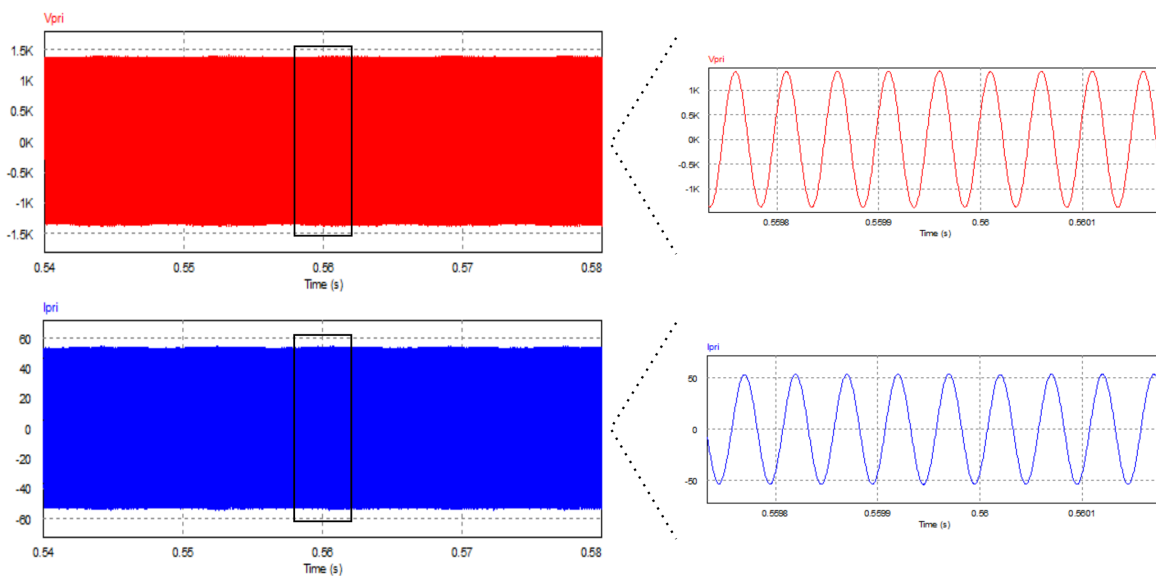
gura 32b, Figura 33a e Figura 33b.

Além dos resultados gráficos, foi calculado a eficiência de cada estágio: conversor CA/CC, conversor CC/CA, bobina do primário para o secundário e conversor CA/CC do secundário. A eficiência geral também foi calculada. Os resultados para 100% da carga e 20% da carga podem ser vistos na [Tabela 6](#). Esses valores de eficiência foram obtidos usando a ferramenta de medição de potência real disponibilizada pelo PSIM. Assim medi-

Figura 24 – Comportamento na bobina do primário do sistema para os dois conversores e 100% de carga.



(a) Usando conversor Full-bridge



(b) Usando conversor SEPIC

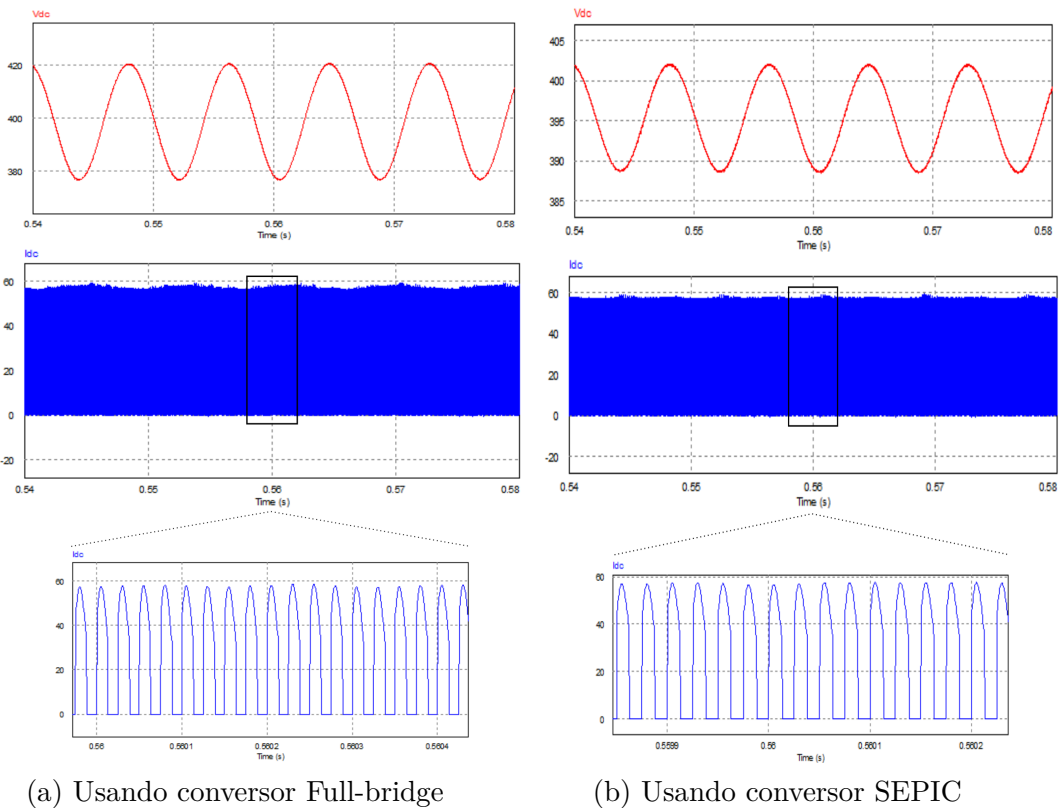
Fonte: Autor

se a potência real vista na saída do conversor do primeiro estágio e também a potência real vista na entrada desse circuito. Em seguida eficiência foi obtida pela razão da potência real na saída e potência real na entrada. O mesmo foi realizado para as demais partes do circuito. Vale ressaltar que essa eficiência não leva em conta a perda nos elementos reativos, já que eles são modelados como ideais na simulação.

Por fim, o fator de potência e o THD para cada conversor, em 100% e 20% da



Figura 25 – Comportamento na entrada do inversor do sistema para os dois conversores e 100% de carga.



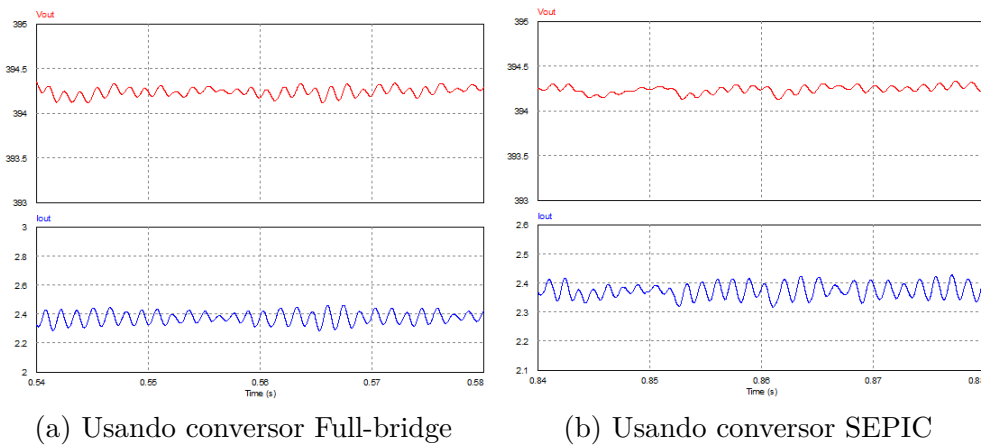
Fonte: Autor

carga, foram calculados e podem ser vistos na [Tabela 7](#). Esses valores foram obtidos usando diretamente a ferramenta disponibilizada pelo PSIM, sendo necessário considerar apenas períodos inteiros dos sinais.

Primeiramente, vale ressaltar que para carga nominal tanto o conversor Full-bridge quanto o conversor SEPIC tem um bom desempenho, visto que o alto valor de eficiência do primeiro estágio visto na [Tabela 6](#). Além disso, é visto que o valor do fator de potência e de THD para ambos os circuitos está dentro das normas. Esses resultados são confirmados através da fase e do formato senoidal da corrente nas figuras [Figura 30a](#) e [Figura 30b](#) e também pela amplitude dos harmônicos nas figuras [Figura 31a](#) e [Figura 31b](#). Ainda, é visto que o Full-bridge obtém resultados levemente melhores.

Para 20% da carga, é visto uma piora do sistema como um todo. Essa piora é causada pela energia reativa drenada pelas bobinas. Como visto na [Tabela 6](#) a eficiência geral fica muito baixa. É visto que, embora o fator de potência piore, o SEPIC ainda gera poucos harmônicos na corrente de entrada. Isso pode ser confirmado analisando a [Figura 33b](#) e a [Tabela 7](#).

Figura 26 – Comportamento da saída do sistema para os dois conversores e 20% de carga.



Fonte: Autor

Tabela 6 – Eficiência por estágio

100% da Carga	Eficiência Estágio 1 (%)	Eficiência Estágio 2 (%)	Eficiência Bobina (%)	Eficiência retificador da bateria. (%)	Eficiência geral. (%)
Full-Bridge	97,5	94,2	94,4	95,5	82,7
SEPIC	96,5	94,0	94,1	95,0	81,1
20% da Carga	Eficiência Estágio 1 (%)	Eficiência Estágio 2 (%)	Eficiência Bobina (%)	Eficiência retificador da bateria. (%)	Eficiência geral. (%)
Full-Bridge	97,4	73,3	78,4	81,4	45,6
SEPIC	98,5	72,8	79,7	80,7	46,1

Fonte: Autor

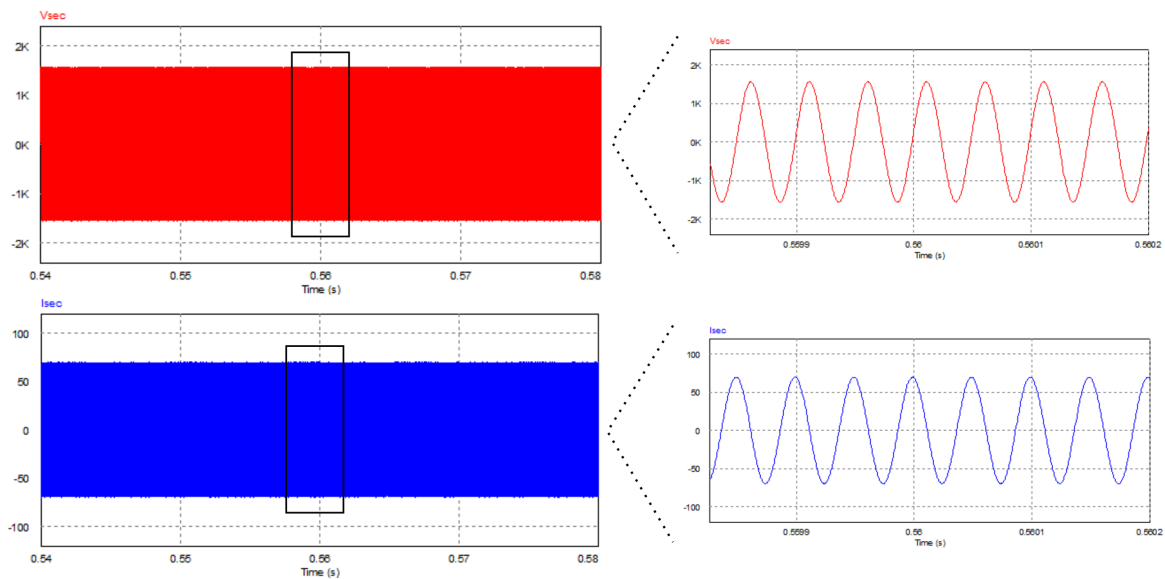
Portanto, para a faixa de potência do Level 2, que é a potência indicada para o DWPT, o conversor SEPIC ou similares é o indicado, além de ser mais barato devido a quantidade de chaves.

### 5.3 Conclusões do capítulo

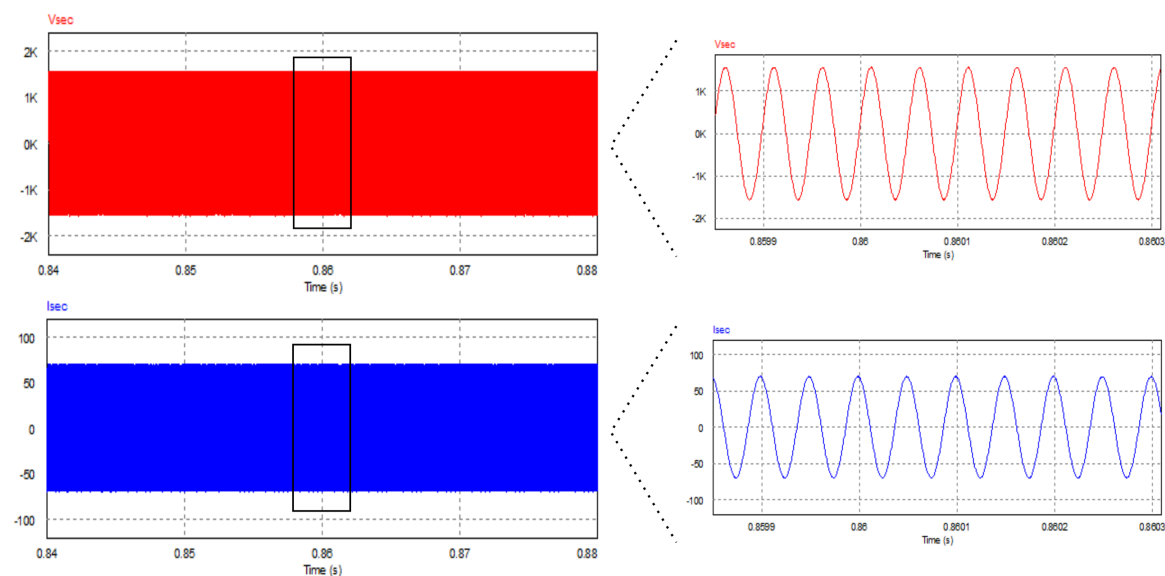
Os resultados mostraram que a topologia preferida para um sistema DWPT é composta no primário por dois estágios. O primeiro estágio, definido pela simulação, é um conversor CA/CC com PFC similar ao SEPIC, como por exemplo o Cúk ou o Push-Pull.

Já a pesquisa bibliográfica mostrou que após o conversor CA/CC um elemento

Figura 27 – Comportamento na bobina do secundário do sistema para os dois conversores e 20% de carga.



(a) Usando conversor Full-bridge

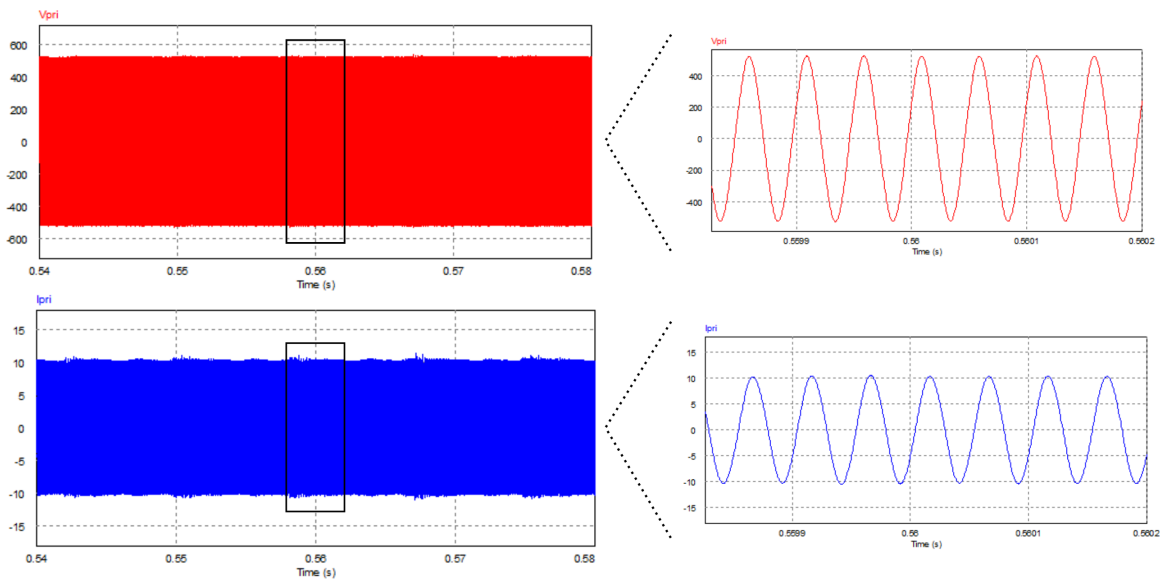


(b) Usando conversor SEPIC

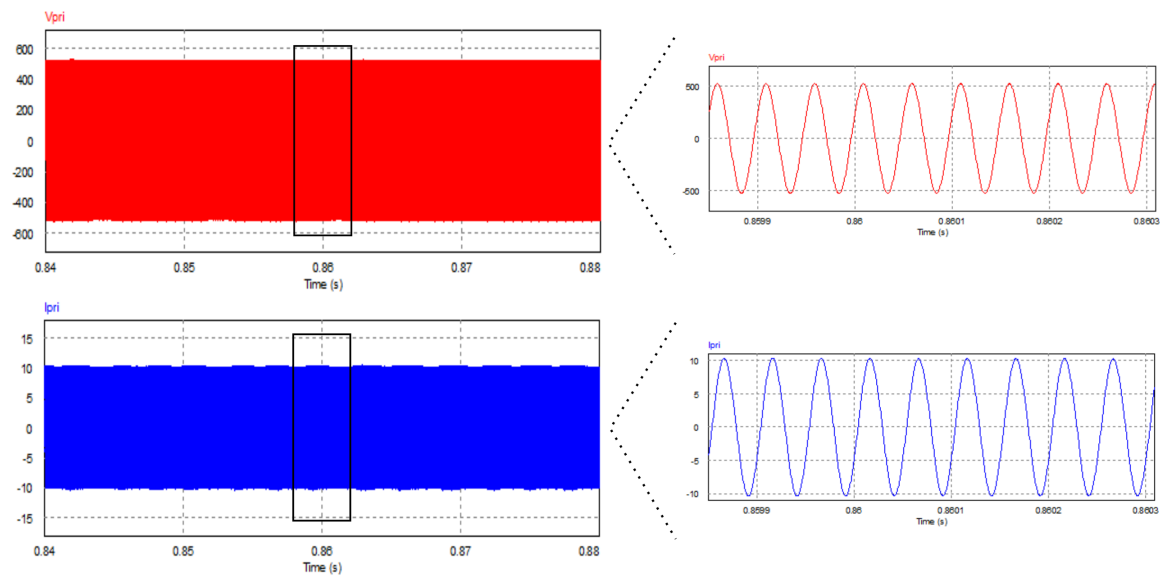
Fonte: Autor

armazenador de energia é necessário para suavizar a característica de potência pulsante. O segundo estágio é geralmente composto por um conversor CC/CA em ponte completa (Full-bridge), utilizando o controle por dois loop e estimando a potência de saída. A topologia do circuito de compensação geralmente é o LCC, tanto no lado primário quanto no lado secundário. Em seguida, no secundário, está um conversor CA/CC similar ao Boost ou ao Buck. Sendo que o conversor no secundário é necessário para diminuir a

Figura 28 – Comportamento na bobina do primário do sistema para os dois conversores e 20% de carga.



(a) Usando conversor Full-bridge

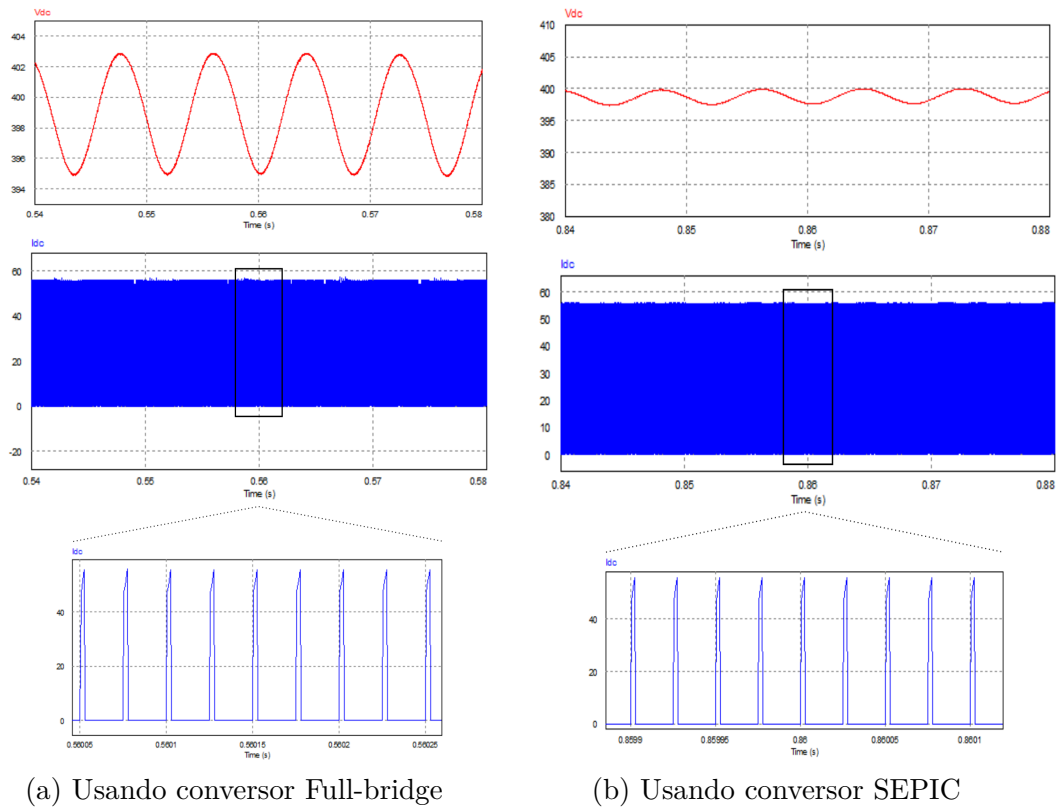


(b) Usando conversor SEPIC

Fonte: Autor

quantidade de dados trocados entre o primário e o secundário. Essa topologia pode ser vista na [Figura 34](#).

Figura 29 – Comportamento na entrada do inversor do sistema para os dois conversores e 20% de carga.



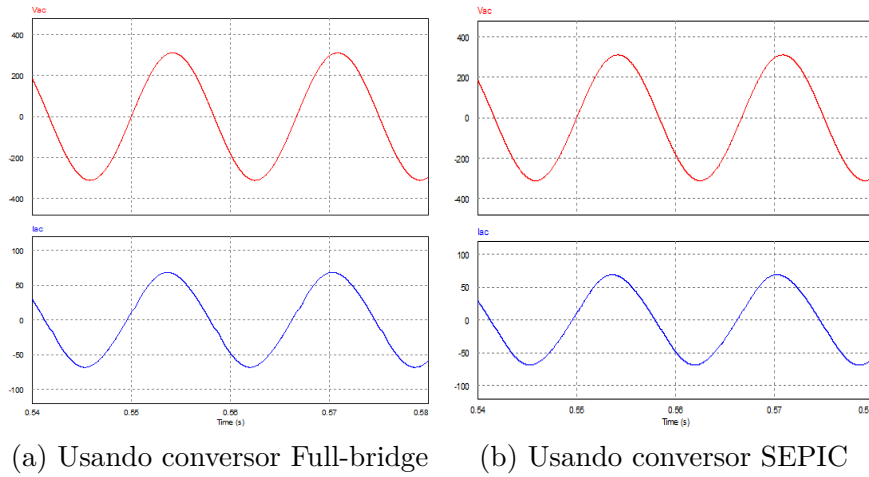
Fonte: Autor

Tabela 7 – Fator de potência e distorção harmônica total (THD) para cada conversor

	100% da Carga		20% da Carga	
	Fator de potência	THD (%)	Fator de potência	THD (%)
Full-Bridge	0,98	2,2	0,69	6,1
SEPIC	0,98	2,3	0,71	2,8

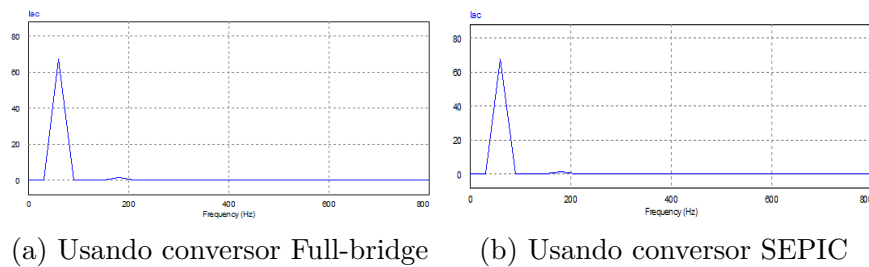
Fonte: Autor

Figura 30 – Tensão e corrente da rede considerando os dois conversores e 100% de carga.



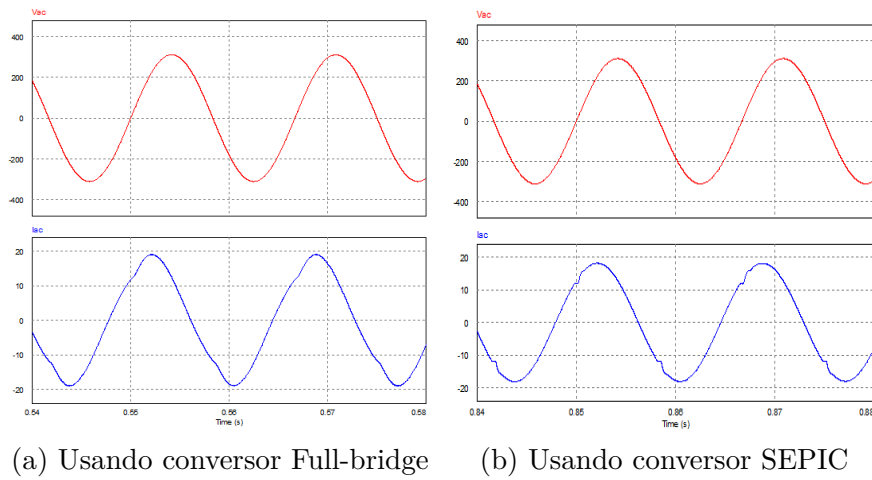
Fonte: Autor

Figura 31 – Análise em frequência da corrente de entrada considerando os dois conversores e 100% de carga.



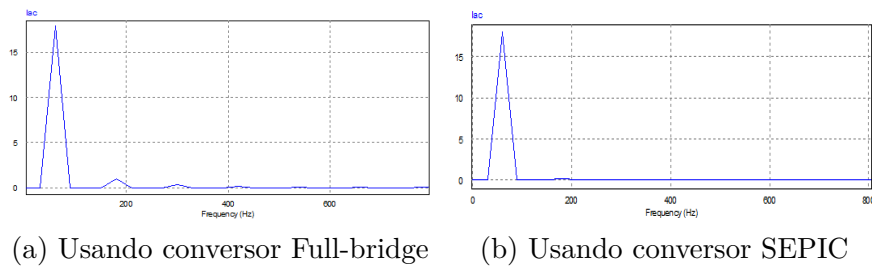
Fonte: Autor

Figura 32 – Tensão e corrente da rede considerando os dois conversores e 20% de carga.



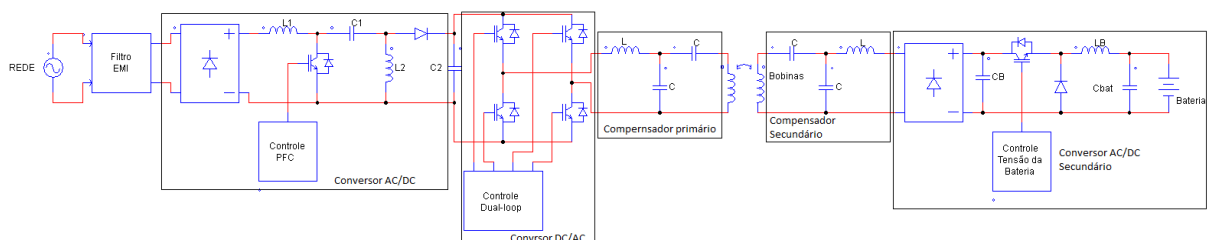
Fonte: Autor

Figura 33 – Análise em frequência da corrente de entrada considerando os dois conversores e 20% de carga.



Fonte: Autor

Figura 34 – Topologia do conversor aplicado ao DWPT mais adequado.



Fonte: Autor





## 6 Conclusões

Os veículos elétricos possuem uma tendência de grande crescimento no Brasil e no mundo. É esperado que em 2030 a frota de carros elétricos mundial cresça cerca de 700% em relação ao ano de 2020. No Brasil, o crescimento esperado é de cerca de 4000% em relação à 2020.

Para tanto, é necessário que as tecnologias que dão suporte para o veículo elétrico cresçam também. Essas tecnologias incluem centros de manutenção de VE, pontos de carregamento físico, rede elétrica entre outras áreas. Porém, pelo menos no Brasil, é previsto que a rede não necessitará de grandes investimentos para comportar a introdução dos veículos elétricos. Mas para isso, a recarga dos VE precisam ser coordenadas, ou seja, aconteçam no período em que a rede elétrica não está carregada, como durante a madrugada.

Contudo, o mesmo não pode ser dito para os pontos de carregamento. No Brasil ainda existem poucos eletropostos, causando a *Range Anxiety*. Esse fato causa impactos nas vendas de veículos elétricos. Outro fato que interfere as vendas é o preço do veículo elétrico. É visto que quase metade do valor do VE é devido à bateria.

Assim, estudos acreditam que uma boa opção de investimento relacionado ao carregamento de VE é na tecnologia de WPT dinâmico. Pois essa tecnologia pode diminuir a necessidade da bateria por permitir o carregamento contínuo do carro.

Porém, é visto que o WPT aplicado ao carregamento dinâmico ainda está em desenvolvimento e muitas topologias de conversores são propostos. O presente estudo definiu uma topologia de conversor de potência que possivelmente será adequada para o DWPT.

Portanto, é demonstrado que a topologia do primário é composta por um conversor CA/CA em dois estágios. O primeiro estágio é um conversor CA/CC com PFC. Devido ao DWPT não possuir grandes requerimentos de potência, por ser limitado ao Level 2, o conversor do primeiro estágio pode ser de pouca capacidade de potência, como um SEPIC ou CUK operando em DCM. O que deve ser priorizado nesse estágio é um fator de potência unitário e baixo THD.

Já o segundo estágio do conversor primário, deverá ser um conversor CC/CA que prove uma saída de corrente senoidal. Não foram estudadas as características necessárias desse conversor. Porém, é visto que todos os trabalhos já propostos utilizam um conversor CC/CA em ponte completa. Geralmente o método de controle usado nesse conversor é chamado de dual-loop.

Além dos dois conversores vistos no primário, é necessário existir um elemento armazenador de energia para suavizar a potência pulsante vista pela rede elétrica.

Não foi realizado um estudo profundo da compensação ressonante à ser usada no conversor. Porém, é visto que a maioria dos estudos propõem o uso da compensação LCC na entrada da bobina do primário e na saída da bobina do secundário.

Por fim, foi visto que no secundário deve existir um conversor CA/CC que regule a tensão de carregamento da bateria. Esse conversor não precisa se preocupar com o fator de potência ou uma potência pulsante vista na bobina do secundário.

Ademais, a pesquisa mostrou duas características desejáveis para o carregamento dinâmico: o circuito deve suavizar a potência vista pela entrada e a comunicação entre o primário e secundário deve ser minimizada. Além dessas características, o sistema de carregamento tem que levar em conta a complexidade e o custo dos conversores para facilitar a implantação dessa tecnologia.

## 6.1 Trabalhos futuros

Embora muitos estudos foram realizados, não foram encontrados artigos que analisam a viabilidade econômica do DWPT em alguma cidade do Brasil.

Além disso, não se tem muita informação de como o campo eletromagnético gerado no WPT pode influenciar os dispositivos de comunicação, ou mesmo nos sistemas elétricos de outros veículos.

Também não foi analisado se o uso do DWPT durante o dia, com diversos carregadores funcionando em uma rua, causaria impacto no sistema elétrico de potência. Ademais, o uso dos conversores energizando muitas bobinas simultaneamente não foi analisado.

Por fim, alguns estudos desse sistema são interessantes como: melhorar a implementação dessa topologia, avaliar as perdas eletromagnéticas das bobinas e também uma análise das chaves de potência mais adequadas para o carregamento dinâmico.

## Referências

- AHMAD, A.; ALAM, M. S.; CHABAAN, R. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles. *IEEE transactions on transportation electrification*, IEEE, v. 4, n. 1, p. 38–63, 2017. Citado 7 vezes nas páginas 23, 38, 45, 47, 48, 50 e 52.
- ANFAVEA. *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira*. 2021. Adaptado. Citado na página 23.
- ARIOLI, V. T. et al. Análise de impactos técnicos provocados pela penetração massiva de veículos elétricos em redes de distribuição de energia elétrica. [sn], 2016. Citado 5 vezes nas páginas 28, 29, 32, 34 e 35.
- AZAD, A.; PANTIC, Z. A supercapacitor-based converter topology for grid-side power management in dynamic wireless charging systems. In: IEEE. *2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. [S.l.], 2019. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 64.
- BCG. *Carro Elétrico no Brasil*. 2019. Citado na página 23.
- BERNSTEIN, L. et al. *IPCC, 2007: climate change 2007: synthesis report*. [S.l.]: IPCC, 2008. Citado na página 21.
- BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. *Química Nova na escola*, n, v. 11, n. 3, 2000. Citado na página 34.
- BOTSFORD, C.; SZCZEPANEK, A. Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles. In: CITESEER. *International Battery Hybrid Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*. [S.l.], 2009. p. 1–9. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 38.
- CASTRO, B. H. R. d.; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. *BNDES Setorial*, n. 32, set. 2010, p. 267-310, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 34.
- CEBDS. *Fernando de Noronha começa a implantar projeto Carbono Zero*. 2019. Disponível em: <<https://cebds.org/noronha-comeca-a-implantar-projeto-carbono-zero/#.YQhI-I5KiUl>>. Citado na página 22.
- CHEN, R.; LAI, J.-S. Analysis and design of dc-dc sepic pfc with adjustable output voltage. In: IEEE. *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. [S.l.], 2015. p. 477–484. Citado na página 58.
- CHOE, G.-Y. et al. A bi-directional battery charger for electric vehicles using photovoltaic pcs systems. In: IEEE. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado na página 41.
- COWAN, R.; HULTÉN, S. Escaping lock-in: the case of the electric vehicle. *Technological forecasting and social change*, Elsevier, v. 53, n. 1, p. 61–79, 1996. Citado na página 27.

- DAS, H. et al. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 120, p. 109618, 2020. Citado na página 30.
- DIEP, N. T.; TRUNG, N. K.; MINH, T. T. Power control in the dynamic wireless charging of electric vehicles. In: IEEE. *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia)*. [S.l.], 2019. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 66.
- EKEMEZIE, P. N. Design of a power factor correction ac-dc converter. In: IEEE. *AFRICON 2007*. [S.l.], 2007. p. 1–8. Citado na página 60.
- EMADI, A. Transportation 2.0. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 9, n. 4, p. 18–29, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 30, 31, 32 e 33.
- FAHEM, K.; CHARIAG, D. E.; SBITA, L. On-board bidirectional battery chargers topologies for plug-in hybrid electric vehicles. In: IEEE. *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 43.
- FALIN, J. Designing dc/dc converters based on sepic topology. *Analog Applications*, p. 19–20, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.
- FARAJIZADEH, F. et al. Expandable n-legged converter to drive closely spaced multitransmitter wireless power transfer systems for dynamic charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 35, n. 4, p. 3794–3806, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 66.
- FERNANDEZ, L. P. et al. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. *IEEE transactions on power systems*, IEEE, v. 26, n. 1, p. 206–213, 2010. Citado na página 29.
- GARCÍA, O. et al. Single phase power factor correction: A survey. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 749–755, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 67.
- GAUTAM, D. S. et al. An automotive onboard 3.3-kw battery charger for phev application. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 61, n. 8, p. 3466–3474, 2012. Citado na página 40.
- HABIB, S.; KAMRAN, M.; RASHID, U. Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks—a review. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 277, p. 205–214, 2015. Citado na página 30.
- HABIB, S. et al. Contemporary trends in power electronics converters for charging solutions of electric vehicles. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, CSEE, v. 6, n. 4, p. 911–929, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 39, 40, 43 e 44.
- HØYER, K. G. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, Elsevier, v. 16, n. 2, p. 63–71, 2008. Citado na página 27.
- HUH, J.; RIM, C.-T. *KAIST wireless electric vehicles-OLEV*. [S.l.], 2011. Citado na página 52.

- HUSSEIN, B.; ABDI, N.; MASSOUD, A. Single-phase sepic-based power factor correction for electric vehicles charging. In: IEEE. *2021 IEEE 11th IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*. [S.l.], 2021. p. 180–184. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 67.
- HUYNH, P. S. et al. Overview and comparative assessment of single-phase power converter topologies of inductive wireless charging systems. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 9, p. 2150, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 63.
- HWANG, K. et al. An autonomous coil alignment system for the dynamic wireless charging of electric vehicles to minimize lateral misalignment. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 3, p. 315, 2017. Citado na página 52.
- IEA. Global ev outlook 2021. *IEA (2021), Paris*, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- JØRGENSEN, A. B. Derivation, design and simulation of the single-ended primary-inductor converter (sepic). 2019. Citado na página 57.
- KARAMUK, M. A survey on electric vehicle powertrain systems. In: IEEE. *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference*. [S.l.], 2011. p. 315–324. Citado na página 34.
- KHALIGH, A.; DUSMEZ, S. Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 61, n. 8, p. 3475–3489, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 45.
- KIM, J.-S. et al. Design and implementation of a high-efficiency on-board battery charger for electric vehicles with frequency control strategy. In: IEEE. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado na página 38.
- KOLAR, J. W.; ZACH, F. C. A novel three-phase utility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 44, n. 4, p. 456–467, 1997. Citado na página 42.
- LIMA, J. C. Impacto dos veículos elétricos sobre as decisões das concessionárias de energia. 2012. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.
- LU, F. et al. A high efficiency 3.3 kw loosely-coupled wireless power transfer system without magnetic material. In: IEEE. *2015 IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE)*. [S.l.], 2015. p. 2282–2286. Citado na página 66.
- LUKIC, S.; PANTIC, Z. Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, Ieee, v. 1, n. 1, p. 57–64, 2013. Citado na página 43.
- LUNA, T. F. et al. Barreiras à difusão de carros elétricos no mundo e a situação no brasil. 2019. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 34.
- MACHURA, P.; LI, Q. A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 104, p. 209–234, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 47, 49, 51 e 52.

MAGALHÃES, M. V. et al. Estudo de utilização da energia eólica como fonte geradora de energia no brasil. Florianópolis, 2009. Citado na página 22.

MAHMUD, K.; TAO, L. Power factor correction by pfc boost topology using average current control method. In: IEEE. *2013 IEEE Global High Tech Congress on Electronics*. [S.l.], 2013. p. 16–20. Citado na página 59.

MALDONADO, M. U. Panorama do estado atual da difusão de veículos elétricos no brasil tainara volan caroline rodrigues vaz. 2019. Citado na página 22.

MILLER, J. M. et al. Demonstrating dynamic wireless charging of an electric vehicle: The benefit of electrochemical capacitor smoothing. *IEEE Power Electronics Magazine*, IEEE, v. 1, n. 1, p. 12–24, 2014. Citado na página 65.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. *Power electronics: converters, applications, and design*. [S.l.]: John wiley & sons, 2003. Citado na página 59.

MUSAVI, F.; EDINGTON, M.; EBERLE, W. Wireless power transfer: A survey of ev battery charging technologies. In: *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1804–1810. Citado na página 51.

NETO, J. P. C.; PIMENTEL, R. M. de M.; SANTOS, S. M. Infraestrutura energética brasileira: perspectivas e desafios para o suporte aos veículos elétricos. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 1, p. 385–396, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

PANCHAL, C.; STEGEN, S.; LU, J. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Engineering science and technology, an international journal*, Elsevier, v. 21, n. 5, p. 922–937, 2018. Citado 8 vezes nas páginas 23, 37, 46, 47, 51, 52, 53 e 65.

ROSSETTO, L.; SPIAZZI, G.; TENTI, P. Control techniques for power factor correction converters. *Proc. of Power Electronics, Motion Control (PEMC)*, Citeseer, p. 1310–1318, 1994. Citado na página 60.

SA, C. E. Projeto emotive. 2018. Citado na página 22.

SAMANTA, S.; RATHORE, A. K. A new inductive power transfer topology using direct ac–ac converter with active source current waveshaping. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 33, n. 7, p. 5565–5577, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 13, 46, 63 e 64.

SCLOCCHI, M. Input filter design for switching power supplies. Citeseer, 2010. Citado na página 58.

SHI, X. et al. Effects of coil shapes on wireless power transfer via magnetic resonance coupling. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Taylor & Francis, v. 28, n. 11, p. 1316–1324, 2014. Citado na página 47.

SINGH, B. et al. Comprehensive study of single-phase ac-dc power factor corrected converters with high-frequency isolation. *IEEE transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 540–556, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 57, 59, 63 e 67.

- TAVAKOLI, R.; PANTIC, Z. Analysis, design, and demonstration of a 25-kw dynamic wireless charging system for roadway electric vehicles. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, IEEE, v. 6, n. 3, p. 1378–1393, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 51, 56, 65 e 66.
- TIBOLA, G.; BARBI, I. Isolated three-phase high power factor rectifier based on the sepic converter operating in discontinuous conduction mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 28, n. 11, p. 4962–4969, 2013. Citado na página 57.
- TRIVEDI, N. et al. Different fast charging methods and topologies for ev charging. In: IEEE. *2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxt)*. [S.l.], 2018. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 41.
- WU, H. H. et al. A high efficiency 5 kw inductive charger for evs using dual side control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 585–595, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 66.
- YILMAZ, M.; KREIN, P. T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 28, n. 5, p. 2151–2169, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 38, 39, 41 e 49.
- ZANETI, L. A. L. *Diagnóstico dos produtos e serviços complementares para a adoção dos carros elétricos e híbridos no Brasil*. [S.l.]: Trabalho de Conclusão de Curso–Universidade Federal de Santa Catarina . . . , 2018. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 27.