

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



Jhully Anne da Silva Vita

**TOPOLOGIA DE CONVERSORES MATRICIAIS  
APLICADOS A VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Vitória-ES

Outubro/2021

Jhully Anne da Silva Vita

# **TOPOLOGIA DE CONVERSORES MATRICIAIS APLICADOS A VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Jhully Anne da Silva Vita, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Vitória-ES

Outubro/2021

Jhully Anne da Silva Vita

## **TOPOLOGIA DE CONVERSORES MATRICIAIS APLICADOS A VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Jhully Anne da Silva Vita, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Aprovado em 05 de outubro de 2021.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Walbermark Marques dos  
Santos**

Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

**Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz**

Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

---



---

**Eng. André Salume Lima Ferreira  
Leão**

Aruna Energia Solar  
Examinador

Vitória-ES

Outubro/2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
PAULO JOSE MELLO MENEGAZ - SIAPE 2236444  
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT  
Em 15/10/2021 às 13:51

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/288751?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por  
WALBERMARK MARQUES DOS SANTOS - SIAPE 1481843  
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT  
Em 15/10/2021 às 17:13

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:  
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/289129?tipoArquivo=O>

*A Deus pela sua imensa graça.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas essas pessoas especiais que apareceram (e estão) na minha vida e que permitem que eu continue com os meus estudos. A todos vocês, minha eterna gratidão.

Aos meus pais, Sandra e Antônio Vita, pelo apoio, dedicação e suporte.

Ao meu irmão Wanderson por todo apoio emocional e por me servir de inspiração.

À minha família e amigos por toda compreensão e apoio durante toda a graduação.

A meu orientador Walbemark por despertar meu interesse por esse tema fascinante e por toda ajuda, orientação e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de trabalho, pela compreensão, por acreditar em mim e me dar tanto suporte.

À banca examinadora pela aceitação do convite e pelo tempo investido para leitura e avaliação desse trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo pela minha formação.

## RESUMO

Aquecimento global e poluição do ar são as maiores consequências dos gases do efeito estufa. E veículos são os principais emissores desses gases. Uma alternativa seria a troca de veículos a combustão por veículos elétricos, pois geram menos poluição, chegando a zero em alguns casos. Portanto o estudo de tecnologias para esse tipo de transporte pode ajudar sua popularização. Foi percebido que embora a eficiência dessa tecnologia seja alta quando comparada aos veículos populares (à gasolina), ainda se pode aperfeiçoar a eletrônica de potência envolvida nos processos desses veículos e ter resultados expressivos. Os conversores convencionais atualmente são volumosos e o uso de conversores matriciais em inúmeras aplicações tem mostrado muitos benefícios. Portanto, neste trabalho, é proposto o estudo bibliográfico de conversores matriciais e suas aplicações em veículos elétricos. O método de pesquisa foi primeiro a análise dos conversores em veículos elétricos, depois um estudo dos conversores matriciais em si e finalmente uma inspeção dos estudos onde os conversores matriciais foram aplicados em veículos elétricos. A topologia se mostrou com vantagens predominantes. Os conversores matriciais possuem tamanho reduzido, funcionamento nos quatro quadrantes, baixo custo, alta confiabilidade, alto rendimento e fator de potência quase unitário. Apesar de ter controle complexo e perdas de comutações, os estudos conseguiram contornar isso e recomendar a topologia.

**Palavras-chave:** Veículos elétricos. Conversor matricial.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perua eletrificada de William Morrison. . . . .	17
Figura 2 – <i>General Motors</i> EV1. . . . .	19
Figura 3 – Gurgel Itaipu - o primeiro carro elétrico da América Latina. . . . .	21
Figura 4 – Topologia básica de um veículo elétrico a bateria. . . . .	27
Figura 5 – Possíveis configurações de <i>powertrain</i> . . . . .	30
Figura 6 – Possíveis alocações do conversor. . . . .	32
Figura 7 – Conversor em matriz com n entradas e m saídas. . . . .	34
Figura 8 – Chave bidirecional. . . . .	35
Figura 9 – Sistema ITP bidirecional, proposto, baseada em conversor em matriz. . . . .	36
Figura 10 – Topologia proposta para o carregador bidirecional baseada na <i>Dual Active Bridged</i> CA-CC. . . . .	37
Figura 11 – Proposta de sistema de conversor de energia de carregamento de bateria VE trifásico usando ponte ativa dupla baseada em conversor em matriz. . . . .	38
Figura 12 – Sistema de transferência de energia indutivo bidirecional baseado no CM. . . . .	38
Figura 13 – VEH série CA-CA direto com um conversor CM e um conversor de bateria CM auxiliar [0x5]. . . . .	39
Figura 14 – conversor em matriz de integração de VEH e torque direto. . . . .	40
Figura 15 – Conversor CA-CC isolado trifásico para monofásico. . . . .	41
Figura 16 – VEH série/paralelo CA-CA com um conversor CM e dois motores de tração M1, M2 com controle independente. . . . .	42

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos diferentes tipos de VE. . . . .	26
Quadro 2 – Uma revisão comparativa sobre topologias de conversão de energia para veículos elétricos. . . . .	33
Quadro 3 – Resumo dos prós e contras do CM. . . . .	42
Quadro 4 – Continuação do resumo dos prós e contras do CM. . . . .	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMS	<i>Battery Management System</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
CE	Caixa de engrenagem
CM	Conversor Matricial
EF	Engrenagem fixa
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FV	Fotovoltaico
GEE	Gases do Efeito Estufa
GM	<i>General Motors</i>
GS	Gerador síncrono
IGBT	<i>Insulated-gate bipolar transistor</i>
INEE	<i>Instituto Nacional de Eficiência Energética</i>
IPT	<i>Inductive Power Transfer</i>
MCI	Motor a Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
MI	Maquina de Indução
MIG	Maquina de Indução Gaiola
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSFET	<i>Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i>
PWM	<i>Pulse-width modulation</i>
SC	Super Capacitor

SVM	<i>Space Vector Modulation</i>
T	Transmissão
TCE	Técnica de Controle Preditivo
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UE	União Europeia
V2G	<i>Vehicle to grid</i>
VC	Voltagem constante
VE	Veículo Elétrico
VEB	Veículo Elétrico à Bateria
VECC	Veículo Elétrico a Células Combustível
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VES	Veículo Elétrico Solar
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

eq/ano	Equivalente por ano
Gt	Giga Tonelada
h	Hora
Km	Quilômetro
rpm	Rotações por minuto

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Contextualização</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>HISTÓRIA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>História</b>	<b>17</b>
2.1.1	Nascimento dos Veículos Elétricos	17
2.1.2	Rápida ascensão e queda	18
2.1.3	Retorno	18
<b>2.2</b>	<b>Mobilidade pré e pós pandemia</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Perspectivas no Brasil</b>	<b>22</b>
<b>2.4</b>	<b>Comentários gerais</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivos geral e específicos</b>	<b>24</b>
3.1.1	Objetivo Geral	24
3.1.2	Objetivos Específicos	24
<b>4</b>	<b>VEÍCULOS ELÉTRICOS</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Tecnologias envolvidas nos veículos elétricos</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Topologia de Veículos Elétricos a Bateria</b>	<b>27</b>
4.2.1	Funcionamento	27
4.2.2	Banco de baterias	28
4.2.3	Carregamento	28
4.2.4	Tração elétrica	29
<b>4.3</b>	<b>Sistemas de Acionamento e Tração elétrica</b>	<b>29</b>
<b>4.4</b>	<b>Comentários gerais</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>CONVERSOR EM MATRIZ E ALGUMAS APLICAÇÕES EM VEÍCULOS ELÉTRICOS</b>	<b>32</b>
<b>5.1</b>	<b>Conversores envolvidos nos processos de veículos elétricos</b>	<b>32</b>
<b>5.2</b>	<b>Princípio de Funcionamento do CM</b>	<b>34</b>
<b>5.3</b>	<b>Aplicação dentro do Processo de Veículos Elétricos</b>	<b>35</b>
<b>5.4</b>	<b>Comentários gerais</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS</b>	<b>44</b>
<b>6.1</b>	<b>Comentários finais</b>	<b>44</b>

<b>6.2</b>	<b>Propostas de trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>46</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

O Brasil possui uma matriz energética mais renovável que a mundial (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018a), produz boa parte de seu consumo, mas ainda usa combustíveis fósseis. O setor de transporte produziu 7,0Gt de emissões diretas de gases do efeito estufa (GEE) em 2010 sendo responsável por aproximadamente 23% do total de emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia. A tendência caso nenhuma medida de mitigação seja tomada é que esse número quase dobre em 2050, chegando a 12Gt de emissões de CO<sub>2</sub>eq/ano.

Um documento sobre eletromobilidade foi divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em conjunto com o Ministério de Minas e Energia (MME) e ele não examina se, mas quando a transição energética no setor automotivo irá acontecer. No cenário menos conservador, brasileiros irão acelerar a transição a partir de 2030 até alcançar plena substituição em 2045 por veículos minimamente híbridos. Os benefícios da transição absoluta da frota são a redução de GEE, melhora na qualidade do ar, implicando inclusive na melhora da saúde pública, redução de ruído e desenvolvimento urbano com geração de emprego e renda (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018b).

## 1.2 Contextualização

O apelo ambiental à utilização dos veículos elétricos (VE) tem crescido consideravelmente ao longo do tempo e, com isso, o desenvolvimento de conversores de potência. Há diversas topologias que podem ser aplicados em veículos elétricos, e dentre essas, a que tem chamado atenção são os conversores matriciais (CM).

Os conversores matriciais possuem volume nulo ou bastante diminuto de elementos reativos (indutores e capacitores), o que minimiza seu peso e volume, características atrativas em eletrônica de potência embarcada, o que justifica a escolha do tema. Sendo assim, com o propósito de contribuir para o amadurecimento do conhecimento em conversores matriciais, prever obstáculos e superá-los que esta proposta de projeto surgiu.

Servindo para aplicações como guindastes de convés, guinchos, condicionadores de ar e ventiladores, controle de bomba, dentre outros, a tecnologia do CM foi aplicada à conversão CA-CC com resultados interessantes em Garcia-Gil et al. (2005), Metidji, Metidji e Mendil



(2013), Yan et al. (2013) e You et al. (2014).

Essa também tem sido a estrutura mais estudada e a que se apresenta mais viável para utilizações práticas, tais como: acionamento de motores de indução (KLUMPNER et al., 2000), energia renováveis (BARAKATI; KAZERANI; CHEN, 2005), qualidade de energia (IRANAQ; HAQUE; BABAEI, 2010), transferência de energia *wireless* de alta potência para VEB (FOOTE; ONAR, 2017), dentre outras aplicações.

## 2 HISTÓRIA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

### 2.1 História

Veículos elétricos podem parecer uma tecnologia nova, mas eles foram inventados no início do século 19. Nessa época a mobilidade nos centros urbanos ainda era majoritariamente à cavalo enquanto que os veículos à combustão externa, interna e veículos elétricos iam sendo desenvolvidos.

#### 2.1.1 Nascimento dos Veículos Elétricos

Inovadores na Hungria, Países Baixos, Inglaterra, França e EUA, criaram alguns dos primeiros carros elétricos de pequena escala. Por isso é difícil dizer o local ou a data exata da criação dos VE. Nos Estados Unidos, o primeiro carro elétrico de sucesso estreou por volta de 1890 (Figura 1). O veículo de seis passageiros, capaz de atingir a velocidade máxima de 14 milhas por hora (aproximadamente  $20\text{km/h}$ ), era basicamente uma perua eletrificada (MATULKA, 2014).

Figura 1 – Perua eletrificada de William Morrison.



Fonte: Murgovski (2012).

### 2.1.2 Rápida ascensão e queda

No início do século 20, veículos elétricos de diferentes fabricantes de automóveis começaram a surgir, e estavam em seu ápice, representando cerca de um terço do mercado. À medida que os americanos se tornaram prósperos, eles adquiriram veículos a motor, seja à vapor, gasolina ou elétrico para se locomover. Os à vapor não eram muito práticos para uso pessoal. Exigiam longos tempos de inicialização e precisavam ser recarregados, limitando seu alcance. Entre trocar as marchas e dar partida com uma manivela, o carro movido a gasolina exigia muito esforço manual para dirigir, além de serem barulhentos e possuírem escapamento desagradável. Já os carros elétricos não tinham nenhum dos problemas associados ao vapor ou à gasolina. Rapidamente se tornando populares entre os residentes urbanos, especialmente as mulheres (MATULKA, 2014).

Mesmo os veículos elétricos sendo uma tecnologia superior comparada aos outros e grandes inventores, como Thomas Edison, explorando maneiras de melhorar a tecnologia, a queda da popularidade dos VE foi inevitável. Três fatores foram decisivos para a ascensão dos veículos convencionais: o sistema de produção em massa criado por Henry Ford, deixando os preços acessíveis; o baixo custo da gasolina; e a invenção da partida elétrica, eliminando a necessidade da manivela, proporcionando mais vendas de veículos movidos a gasolina; (MATULKA, 2014).

### 2.1.3 Retorno

Com a crise do petróleo de 1973, os EUA tiveram um interesse em reduzir a dependência do petróleo estrangeiro e em encontrar fontes de combustível local. Assim, o Congresso aprovou a Lei de Pesquisa e Desenvolvimento e Demonstração de Veículos Elétricos e Híbridos de 1976. No entanto, os veículos desenvolvidos e produzidos na década de 1970 ainda sofriam de desvantagens em comparação com os carros movidos a gasolina. Seu desempenho era limitado e seu alcance normal era restringido a 40 milhas (64km) antes de precisarem ser recarregados (MATULKA, 2014).

Na década de 1990, novos regulamentos federais e estaduais fomentaram o mercado. Com isso, em vez de modificar um veículo existente, a General Motors (GM) projetou e desenvolveu o EV1 do zero (Figura 2). Ele tinha um alcance de 128 quilômetros e a capacidade de acelerar de 0 a 80 quilômetros por hora em apenas sete segundos. Mas, devido aos altos custos de produção, o EV1 nunca foi comercialmente viável e a GM o interrompeu em 2001 (MATULKA, 2014).

Figura 2 – General Motors EV1.



Fonte: Rick Rowen (2002).

Mas, o verdadeiro renascimento do veículo elétrico não aconteceu até o início do século 21, começando com a introdução do Toyota Prius. Lançado no Japão em 1997, o Prius se tornou o primeiro veículo elétrico híbrido produzido em massa do mundo. Em 2000, o Prius foi lançado mundialmente e tornou-se um sucesso instantâneo. Desde então, o aumento dos preços da gasolina e a crescente preocupação com a poluição do carbono ajudaram a torná-lo o híbrido mais vendido em todo o mundo durante a última década (MATULKA, 2014).

Outro evento que ajudou a remodelar os veículos elétricos foi o anúncio em 2006 de uma *startup* no Vale do Silício, a Tesla Motors. Empresa que começaria a produzir um carro esportivo elétrico de luxo capaz de percorrer mais de 320 quilômetros com uma única carga. Em um curto espaço de tempo, a Tesla ganhou grande aclamação por seus carros e se tornou o maior empregador da indústria automobilística na Califórnia (MATULKA, 2014).

O anúncio da Tesla e o subsequente sucesso estimularam grandes montadoras a acelerar o trabalho em seus próprios veículos elétricos. No entanto, os consumidores ainda enfrentavam um dos primeiros problemas do veículo elétrico: onde carregar seus veículos? Por meio da lei de recuperação, o departamento de energia americano ajudou a construir uma infraestrutura de carregamento em todo o país. Os fabricantes de automóveis e outras empresas privadas também instalaram seus próprios carregadores em locais importantes nos Estados Unidos (MATULKA, 2014).

O investimento do departamento em pesquisa e desenvolvimento de baterias ajudou a

reduzir os custos das baterias de veículos elétricos em 50% entre 2000 e 2004, ao mesmo tempo em que melhorou seu desempenho. Os consumidores agora têm mais opções do que nunca quando se trata de comprar um veículo elétrico. Como os preços da gasolina continuam a subir e os preços dos veículos elétricos continuam a cair, os veículos elétricos estão ganhando popularidade (MATULKA, 2014).

Na linha do tempo de FGV ENERGIA (2017), pode-se visualizar com mais clareza os acontecimentos mais importantes:

### **1801-1850 | O começo**

Os primeiros modelos de carros elétricos são inventados.

### **1851-1900 | A primeira era**

Os carros elétricos entram no mercado com ampla aceitação.

### **1901-1950 | Boom e decadência**

Carros elétricos atingem o auge, mas são logo substituídos por veículos à combustão interna.

#### **Destaques do período:**

**1908:** O VCI Ford modelo T entra no mercado.

**1912:** A invenção da ignição elétrica elimina a necessidade da manivela, tornando mais fácil de dirigir carros a gasolina.

**1912:** Estoque global de VE atinge a marca histórica de 30 mil veículos.

**Década de 1930:** Por volta de 1935, os VE são quase extintos devido à predominância de veículos a combustão interna e gasolina barata.

**1947:** Racionamento de petróleo no Japão leva a fabricante de automóveis Tama a lançar um carro elétrico.

### **1951-2000 | A segunda era**

O alto preço do petróleo e os elevados níveis de poluição atmosférica renova o interesse nos VE.

#### **Destaques do período:**

**1966:** O Congresso dos EUA introduz legislação recomendando VE como medida para redução da poluição do ar.

**1973:** O embargo da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) leva à alta nos preços do petróleo e longas filas nos postos de gasolina, renovando o interesse pelos VE.

**1976:** O governo francês lança um programa, acelerando a P&D em VE.

**1996:** Para cumprir os requisitos de emissões-zero da Califórnia, a General Motors começa

a produzir e fazer *leasing* do carro elétrico EV1.

**1997:** No Japão, a Toyota começa as vendas do Prius, o primeiro carro híbrido comercial do mundo. 18.000 unidades são vendidos no primeiro ano de produção.

### 2001 | A terceira era

Setores público e privado voltam a se comprometer com a eletromobilidade.

#### Destaques do período:

**2003:** Lançamento da Tesla Motors.

**2008:** O preço do petróleo passa dos US\$145/barril.

**2010:** O VEB *Nissan Leaf* é lançado.

**2011:** O serviço de *car sharing* *Autolib* é lançado em Paris, com uma meta de estoque de 3 mil VE.

**2011:** Estoque global de VE atinge marca histórica de 50 mil veículos.

**2015:** Estoque global de VE atinge nova marca histórica de 1,26 milhão de veículos.

**2015:** A quantidade de eletro postos (públicos e privados, lentos e rápidos) atinge o número de 1,45 milhão no mundo (em 2014 e 2010 eram de 820 mil e 20 mil, respectivamente).

**2016:** Preço do banco das baterias fabricadas pela Tesla atinge baixa recorde de US\$190/kWh.

**2017:** Reservas do Tesla Model 3 alcançam 530 mil, 24 meses antes da entrega prevista dos veículos.

Enquanto isso, no Brasil, o primeiro carro elétrico estreou em 1974, feito pelo engenheiro paulista João Conrado do Amaral Gurgel (Figura 3).

Figura 3 – Gurgel Itaipu - o primeiro carro elétrico da América Latina.



Fonte: Pereira (2021).

O Gurgel Itaipu tinha a forma de um trapézio, e a carroceria era de fibra de vidro. Tinha apenas 2,65 metros de comprimento por 1,40 metros de largura. Dentro havia lugar para duas pessoas, com acesso dificultado pela falta de regulagem dos bancos. Atrás dos assentos, cerca de 1 metro de espaço, era reservado para bagagem. O painel simples contendo velocímetro ao centro, ladeado por amperímetro e voltímetro, que indicava a carga disponível na bateria, e entre os faróis de iodo, ficava a entrada para a recarga (PEREIRA, 2021).

## 2.2 Mobilidade pré e pós pandemia

No cenário pré-pandemia eram previstas quedas nas vendas de veículos, em geral, nos principais mercados do mundo, por causa do comportamento do consumidor que enxergava o uso de veículos como serviço e não mais como bem. Mas agora o boletim da LMC-Automotive (2021) mostra preferência pelo transporte individual ao coletivo pelo receio de infecção no pós-Covid (BECK, 2020).

É natural que no cenário pós-pandemia os desejos do consumidor mudem, agora a necessidade por transporte próprio voltou para lista de prioridades da população refém do transporte coletivo e de suas aglomerações. Outra preocupação que entrou na agenda das pessoas é a segurança quanto a circulação de ar limpo, que não é garantida atualmente em viagens compartilhadas (AUTODATA, 2021).

## 2.3 Perspectivas no Brasil

Um aumento do número de automóveis irá certamente demandar uma quantidade crescente de energia. O carro elétrico pode tornar-se uma alternativa importante, caso se adote, no curto prazo, políticas de incentivo à sua utilização. No entanto, o transporte individual não é uma forma tão eficaz de utilização de recursos quanto o transporte coletivo, principalmente no caso do Brasil, considerando-se o atual nível de desenvolvimento do país e sua infraestrutura (BARAN; LEGEY, 2011).

O carro elétrico traz a vantagem de concentrar as emissões nas fontes geradoras de energia, que são passíveis de serem reguladas, e não nos pontos de consumo, que são numerosos, dispersos e de difícil controle. Mas ainda há barreiras institucionais e políticas, além das mercadológicas, a serem vencidas para que o carro elétrico se consolide no mercado. No

entanto, o imperativo da exaustão dos recursos fósseis e as questões ambientais deixam os veículos elétricos em posição ímpar para se tornarem realidade (BARAN; LEGEY, 2011).

O projeto de lei 304/2017 de Nogueira (2017), prevê a proibição de comercialização e posterior circulação de veículos à gasolina e diesel, o que mostra um avanço do país e preocupação por parte do estado com políticas de ações ambientais.

## **2.4 Comentários gerais**

VE já são realidade em outros países. As perspectivas no Brasil são positivas em relação a adoção dessa tecnologia, ainda temos barreiras estruturais a vencer para que os veículos elétricos sejam acessíveis ao consumidor. O cenário pós pandemia ainda é um campo incerto para previsões. Mesmo assim, deve-se sempre buscar por desenvolvimento no campo de mobilidade no país.



## 3 OBJETIVOS

### 3.1 Objetivos geral e específicos

A frota majoritária de veículos que circulam no Brasil hoje é movida a combustíveis fósseis. Há ainda um agravante, pois embora o país seja rico em recursos naturais, não processamos todo petróleo que produzimos, sendo obrigados a vender parte da matéria bruta e comprar os subprodutos, nos tornando dependentes energeticamente de outros países. Esse foi o motivo pelo qual os EUA investiu em veículos elétricos. A dependência de países instáveis para fornecimento de combustível é uma ameaça a segurança energética de um país e deve ser mitigada.

Este trabalho delineará os sistemas existentes para veículos elétricos: sistemas de carregamento *on-board* e *off-board* e os sistemas de acionamento e *powertrain* do(s) motor(es). Será feita uma revisão das tecnologias dentro e no entorno dos veículos elétricos e as vantagens de se ter conversores matriciais em alguns pontos, destacando as topologias de conversores matriciais e a aplicação desta no contexto da tração elétrica.

#### 3.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral que se almeja alcançar ao final dessa pesquisa é o de analisar as principais tecnologias de conversores matriciais aplicadas a veículos elétricos.

#### 3.1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- I. Avaliar as características básicas dos conversores matriciais.
- II. Identificar as vantagens e desvantagens destas topologias aplicadas a veículos elétricos.

## 4 VEÍCULOS ELÉTRICOS

### 4.1 Tecnologias envolvidas nos veículos elétricos

O veículo tradicional movido por um motor de combustão interna utiliza combustível fóssil para funcionar e emite fumaça contendo gases do efeito estufa. Os motores a combustão interna (MCI) convencionais possuem várias peças e centenas de componentes móveis que se desgastam e precisam ser substituídos. MCI também são popularmente conhecidos como motores de explosão por causa do seu funcionamento ao transformar a energia armazenada na gasolina em força motriz. Eles ainda são extremamente ineficientes, menos de 30% do poder calorífico da gasolina é transformado em energia útil (LUZ, 2013).

Veículos Elétricos são definidos por serem aqueles que são acionados por pelo menos um motor elétrico (ME). Eles podem ser controlados com precisão e fornecer alto torque estacionário, ao contrário dos MCI, e não precisam de várias marchas para corresponder às curvas de potência. Isso elimina a necessidade de caixas de engrenagens e conversores de torque (MATHEW, 2017).

VE podem ser divididos em cinco categorias (INEE, 2019):

- Veículos elétricos a bateria (VEB) onde a energia usada pelo motor é fornecida por um banco de baterias, geralmente íon lítio;
- O veículo elétrico híbrido (VEH) que possui um gerador a bordo acionado por um MCI gerando energia elétrica. Estes veículos também usam sistemas de bateria e super capacitores para acumular energia elétrica, permitindo que o MCI só opere nas condições ótimas ou fique desligado.
- Veículo elétrico a células combustível (VECC). Esta tecnologia é objeto de muita pesquisa na atualidade e diversos fabricantes apostam nela como o futuro dos veículos.
- O veículo elétrico *Plug-in* ou Trólebus que recebe energia diretamente da rede elétrica. Entretanto, devido ao alto custo da infraestrutura envolvida, não há previsão de expansão.
- E o veículo elétrico solar (VES) que funciona com placas fotovoltaicas (FV). É pouco provável que o VES venha a se transformar em um veículo de uso prático, pelas sua

restrições de tamanho, que limitam a dimensão dos painéis e conseqüentemente sua potência.

No Quadro 1 as características principais que diferem as categorias de veículo elétrico estão dispostas para efeito de comparação:

Quadro 1 – Características dos diferentes tipos de VE.

	<b>VEB</b>	<b>VEH</b>	<b>Trólebus</b>	<b>VECC</b>
<b>Sistema de propulsão</b>	ME	ME e MCI	ME e MCI	ME
<b>Armazenamento de energia</b>	Bateria Ultra capacitor	Bateria Ultra capacitor Combustíveis fósseis	Bateria Ultra capacitor Combustíveis fósseis	Bateria Célula combustível
<b>Fonte de energia &amp; Infraestrutura</b>	Rede elétrica	Postos	Rede elétrica Postos	Hidrogênio
<b>Vantagens</b>	Zero emissões Independência de combustíveis fósseis	Menos emissões Viagens de longo alcance	Menos emissões Viagens de longo alcance	Zero emissões Alta eficiência
<b>Desvantagens</b>	Alto custo de Investimento Preocupação com a gestão das baterias	Alto custo Dependência de combustíveis fósseis	Alto custo Dependência de combustíveis fósseis	Alto custo do hidrogênio

Fonte – Traduzida e adaptada de Jyotheeswara Reddy e Natarajan (2018)

Nas vantagens e desvantagens de cada tipo, nem todas oferecem zero emissões de GEE por exemplo, e todas ainda possuem alto custo em alguma área da tecnologia. O tipo de veículo elétrico que este trabalho abordará é o VEB, pois especialistas acreditam que veículos totalmente elétricos com alta eficiência serão o objetivo final da tecnologia, enquanto os híbridos são apenas uma etapa transitória no processo de substituição dos veículos a combustão (BUENO, 2004).

## 4.2 Topologia de Veículos Elétricos a Bateria

Os quatro componentes básicos do veículo elétrico a bateria (Figura 4), entre outros que os ajudam a operar, são:

- Banco de baterias
- Sistemas de Carregamento
- Inversor de Potência
- Motor Elétrico (ME)

Figura 4 – Topologia básica de um veículo elétrico a bateria.



Fonte: Electrical e Roadmap (2017).

### 4.2.1 Funcionamento

Fundamentalmente, no VEB o motor elétrico recebe energia do banco de baterias através de um inversor de frequência que deve controlar a velocidade e a potência de saída. Por

norma, a média de relação de peso potência de um ME é muito maior que um MCI, provando sua eficiência e boa performance. Entretanto, a exigência de alto torque de tração, tempo de recarga relativamente grande e gerenciamento de bateria são alguns inconvenientes dos VE (HURST, 2019).

#### 4.2.2 Banco de baterias

O banco de baterias é uma simples associação de várias baterias que são gerenciadas pelo *Battery Management System* (BMS). A distribuição das baterias no piso do carro gera mais conforto ao dirigir quando comparado a baterias dispostas na frente ou atrás no veículo, além de mais estabilidade diminuindo riscos de acidentes. A alta tensão CC é uma parte perigosa do veículo, que requer um bom funcionamento e manutenção por equipe capacitada a fim de evitar acidentes (EVREPORTER, 2020).

VEB também podem conter super capacitores (SC) como elemento armazenador de energia. Pay e Baghzouz (2003) fizeram um estudo sobre a eficácia da associação de super capacitor e bateria em veículos elétricos concluindo que a combinação faz sentido e as vantagens superam em muito as desvantagens. Isso porque a bateria oferece resposta lenta enquanto o SC oferece resposta rápida em demandas de alto pico de potência. Logo, o SC supre a energia nos momentos de partida do motor, por exemplo, e a bateria supre a energia quando o sistema está em regime. Dessa maneira, primeiro o motor drena, no pico de potência, a energia do SC, enquanto a bateria cobre apenas o superavit, e depois a energia é drenada da bateria.

#### 4.2.3 Carregamento

Os sistemas de carregamentos dos VE podem ser do tipo *on-board* e *off-board*. O primeiro tipo é quando o carregamento é realizado através de uma conexão direta com a rede elétrica. A principal vantagem desta é a simplicidade de conexão, porém o peso e volume dos componentes influenciam diretamente na eficiência do veículo. Os do tipo *off-board* são externos aos veículos, o que permite rapidez e alta potência na hora do carregamento e mais tranquilidade quanto a sua topologia visto que não interfere na performance do veículo (GANZENMÜLLER, 2020).

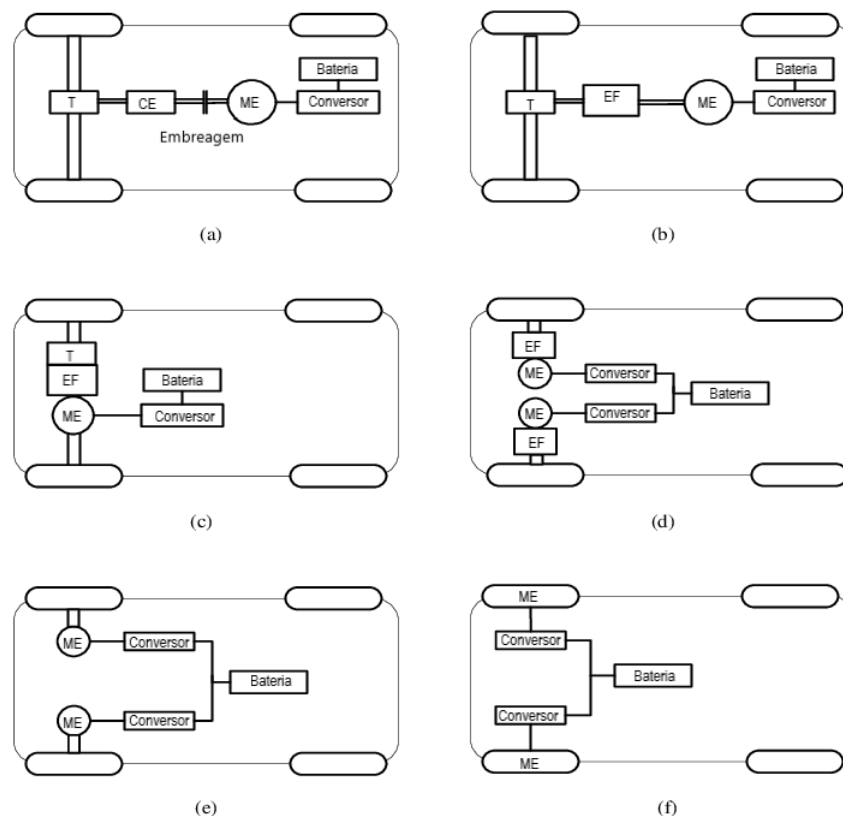
#### 4.2.4 Tração elétrica

Inicialmente, motores CC eram usados em sistemas de propulsão de veículos elétricos devido ao alto torque de partida e simples controle de velocidade, embora fossem volumosos e menos eficientes. Esses motores apresentavam desvantagens devido à manutenção frequente exigida por seus comutadores mecânicos e escovas, além das perdas causadas por vento e fricção na região do rotor que variam com a velocidade de rotação. Motores CC eram uma escolha natural para veículos elétricos no início, mas com o advento de motores mais eficientes e controladores eletrônicos de potência, os motores CA ganharam mais popularidade, especialmente em aplicações de alta potência (FRIESKE; KLOETZKE; MAUSER, 2013).

Uma tração elétrica otimizada se traduz em melhor economia de combustível e desempenho de direção. A assistência de energia e as operações do VE devem ser controladas com cuidado para evitar o esgotamento rápido da bateria pois durante o trânsito da cidade, partidas e paradas frequentes podem consumir uma quantidade significativa de energia da bateria (KUMAR; NEMA; GUPTA, 2020).

### 4.3 Sistemas de Acionamento e Tração elétrica

O sistema de *powertrain* inclui o projeto, a alocação dos componentes no veículo e a análise relacionada à transmissão e controle de energia. As arquiteturas do sistema de tração dos VEB não diferem muito em seu layout, existindo várias formas possíveis. (DITMANSEN, 2019). A Figura 5 mostra seis dessas possíveis configurações de *powertrain* nos VEB.

Figura 5 – Possíveis configurações de *powertrain*.

Fonte: Wangsupphaphol et al. (2013).

Considerando: Engrenagem fixa (EF); Caixa de engrenagem (CE); Transmissão (T);

Segundo Wangsupphaphol et al. (2013), na Figura 5.a uma fonte elétrica é conectada ao conversor de potência que abastece o ME. Neste sistema, a embreagem e a caixa de engrenagens são usadas para o sistema de engrenagens manual. Esta atua nas rodas operadas por meio da engrenagem diferencial e da transmissão. O esquema da Figura 5.b é análogo ao encontrado em (a) mas faz uso de engrenagem fixa em vez de embreagem e caixa de engrenagens. Isso reduz o tamanho e o peso dos componentes mecânicos, aumenta a eficiência geral do veículo e funciona para ampla região de potência constante.

No método da Figura 5.c Wangsupphaphol et al. (2013) mostra que o motor elétrico pode ser alimentado individualmente para cada roda motriz. O componente mecânico integrado do motor elétrico, engrenagem fixa e diferencial são associados em uma estrutura mais compacta e simples. Na disposição da Figura 5.d o motor elétrico pode ser alimentado individualmente para cada roda motriz. Com o fim de separar o controle, diminuir o peso e o tamanho.

No arranjo da Figura 5.e os motores elétricos são conectados a cada roda por meio de uma fina engrenagem planetária. Esta é ajustada para reduzir a velocidade do motor e permitir a configuração em linha do eixo de acionamento. A distribuição da Figura 5.f é um sistema de transmissão de engrenagem de redução totalmente do motor elétrico para a roda motriz. Alto torque de partida e aceleração podem ser alcançados pelo uso da característica especial do motor fora do rotor, a fim de controlar uma ampla faixa de velocidade e torque (WANGSUPPHAPHOL et al., 2013).

Das seis possíveis configurações, pode-se comprimir em três principais. Onde na primeira é em que o motor é central em frente ao eixo (a e b), na segunda é quando um ou dois motores são acoplados perto das rodas (c e d) e no terceiro é o motor de cubo de roda (e e f). A forma mais utilizada é a segunda, embora a estrutura de motor central ainda seja popular.

A escolha deste motor elétrico foi natural ao longo dos anos. Mas um estudo feito por Zeraoulia, Benbouzid e Diallo (2006), mostrou que a máquina de indução gaiola (MIG) atende bem aos VE mesmo quando comparada a máquina síncrona de ímã permanente sem escova. Isso explica o fato da maioria dos veículos elétricos utilizarem esse tipo frente às outras opções de ME.

O sistema de acionamento do VEB é simples pois a máquina de indução (MI) permite que o rotor seja acoplado diretamente na linha de transmissão do veículo através de uma redução de engrenagem. Isso o torna robusto, com poucas partes móveis, manutenção simples, mais eficiente que o MCI e silenciosa. Além de ser altamente confiável e relativamente barato, o destaque da MI está no seu controle de velocidade que depende apenas da frequência CA de alimentação. Recuperar a energia de frenagem nos momentos em que ela funciona como gerador pode ser uma estratégia que aumente o custo-benefício do sistema em geral. No entanto, deve-se observar que cargas e descargas frequentes podem causar o superaquecimento das baterias encurtando sua vida útil (MATHEW, 2019).

#### 4.4 Comentários gerais

Os veículos elétricos atuais, ao contrário de sua concepção inicial, possuem bastante eletrônica embarcada (tanto de potência, quanto de sinais), computador de bordo, sistema de monitoramento da bateria, etc. Em resumo, estão bem mais tecnologicamente avançados que seus antecessores.

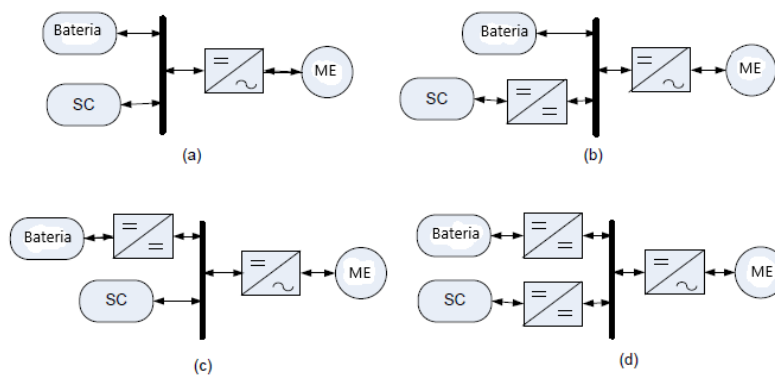


## 5 CONVERSOR EM MATRIZ E ALGUMAS APLICAÇÕES EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

### 5.1 Conversores envolvidos nos processos de veículos elétricos

Conversores estáticos de potência são dispositivos capazes de relacionar o fluxo de potência entre dois sistemas. Nos veículos elétricos os conversores são principalmente empregados nos sistemas de carregamento da bateria e no acionamento do(s) motor(es) de tração. Possíveis *layouts* do conversor no VEB estão dispostos na Figura 6:

Figura 6 – Possíveis alocações do conversor.



Fonte: Wangsupphaphol et al. (2013).

As disposições dos conversores, interferem no modo de operação do barramento. Conforme mostrado na Figura 6.a, não há implementação de conversor CC-CC. A resposta de potência no barramento CC é compartilhada de acordo com as características internas de cada fonte. Na Figura 6.b, um conversor CC-CC está conectado apenas ao SC enquanto a bateria está conectada direto ao barramento. Nesse caso, o conversor adapta a demanda de energia do SC enquanto a bateria supre o superavit de demanda de carga. No exemplo de conectar a bateria a um conversor CC-CC como mostrado na Figura 6.c, há fornecimento de quantidade constante de energia, para a carga, pela bateria. Enquanto o SC trabalha com alta variação da tensão de entrada. A conexão de ambas as fontes de energia ao conversor CC-CC próprio é mostrado na Figura 6.d. Nesse caso, a demanda de energia e sua dinâmica são absolutamente controladas individualmente (WANGSUPPHAPHOL et al., 2013).

Pesquisas mostram várias topologias de conversão de energia CC-CA e CC-CC sendo usadas em VE, e conclui que a eletrônica de potência com boa eficiência de conversão e controle preciso é um entre os principais critérios para escolha dessa tecnologia. A tecnologia embarcada no VE deve controlar, monitorar e detectar quaisquer falhas como de rolamento, problemas no rotor e estator no sistema de propulsão do veículo. No Quadro 2 há um resumo de tipos de conversores usados em VE e suas características.

Quadro 2 – Uma revisão comparativa sobre topologias de conversão de energia para veículos elétricos.

Conversor	Estratégia de Controle	Controlador usado	Descrição
Conversor bidirecional de duas entradas	Modo deslizante de controle (SMC) e Otimização de invasores (IWO)	Modo híbrido de controle	Os autores usaram superfícies deslizantes, para fontes de bateria, super capacitores e IWO para ajuste dos parâmetros do SMC e controlar as duas entradas bidirecionais do conversor.  O controlador SMC híbrido proposto que usa IWO é robusto para lidar com as incertezas do sistema sem atingir qualquer fase como no SMC convencional. O benefício é: operação em ampla faixa de carga com boa resposta transitória em uma faixa fina de regulação frequência
Transformador			A retificação síncrona controla a ativação e tempos de desligamento com base na diferença de fase entre a corrente ressonante e o pulso do gate.  Um sistema básico de malha fechada é projetado e discutido
Conversor dual (DIODO)	—	Controlador preditivo	Um controlador preditivo para corrente do indutor é usado com a lógica de seleção de modo de operação, que é estabelecido baseado na disponibilidade e segurança das fontes.  Um protótipo de laboratório foi construído para validar a eficácia do DIODO.
Conversor bidirecional CC-CC	<i>Duty cycle</i>	PWM	Uma nova combinação de um conversor multinível tipo T de cinco níveis acoplado a um inversor CC-CC bidirecional modificado multinível.  Além disso, tais configurações convencionais exigem a adição de circuitos de capacitância de tensão ou padrões especiais de comutação para proteger o equilíbrio de tensão do capacitor CC com <i>feedback</i> e <i>loops</i> controlados.
Conversor de múltiplas entradas (MIC)	Lógica <i>fuzzy</i>	PI	Os autores usaram controlador <i>fuzzy</i> e um limitador de taxa bidirecional nesse conversor não isolado.  Os benefícios adquiridos dessa topologia definem a vida útil da bateria, bem como a utilidade do sistema híbrido sobre a faixa de entrada do conversor.

Fonte – Traduzida e adaptada de Kumar, Nema e Gupta (2020)

Nos veículos elétricos, o Conversor Matricial (CM) pode ser empregado tanto nos sistemas de acionamento do(s) motor(es) de tração como nos sistemas de carregamento. Adicionando as vantagens características do CM, que em resumo, são correntes quase senoidais, baixo custo, alta confiabilidade, compacto, rendimento elevado e fator de potência quase unitário

(SOTA, 2013).

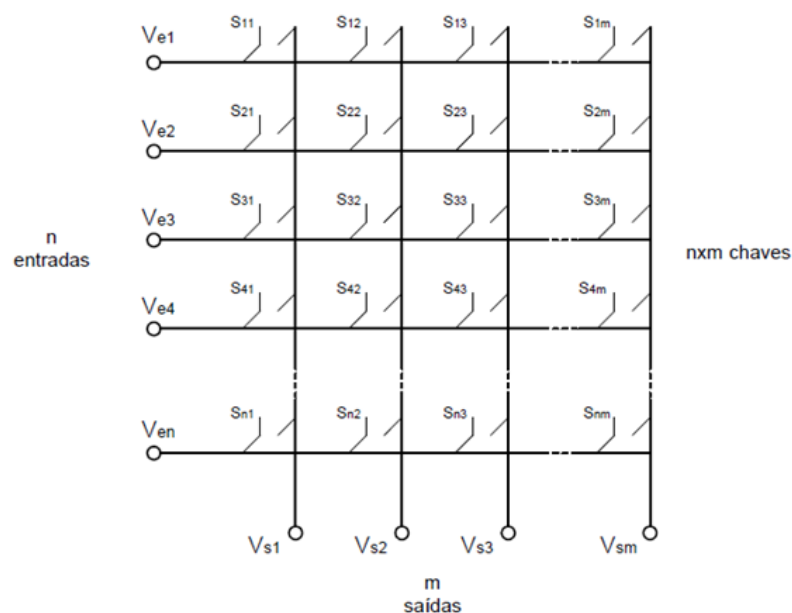
## 5.2 Princípio de Funcionamento do CM

Os conversores são a parte central dos veículos elétricos. Eles regulam a energia no carregamento das baterias e a potência de funcionamento do motor. A malha age para que nunca haja uma diferença de variação de tensão e corrente, sem desbalanço, logo sempre terá uma chave respondendo.

Os elementos armazenadores de energia que são usados comumente em conversores estáticos de potência, que o CM não possui, são os capacitores e indutores. Os capacitores servem para suavizar a tensão e a corrente em uma fonte de alimentação comutada, mas a operação em alta temperatura (acima de 105 °C) limita a densidade de energia. Os indutores servem para amortecer a corrente de saída, mas ele possui perdas de núcleo e cobre, crítico gerenciamento térmico e efeitos do envelhecimento (KUMAR; NEMA; GUPTA, 2020).

Uma das topologias propostas do CM é a disposta na Figura 7. Filho (2010) descreve um conversor matricial constituído por  $n \times m$  chaves ( $S_{ij}$ ) de potência dispostas em forma de matriz que opera nos quatro quadrantes (fluxo de energia bidirecional em tensão e corrente).

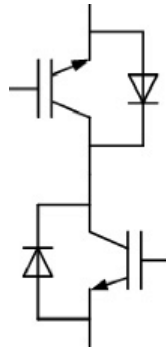
Figura 7 – Conversor em matriz com  $n$  entradas e  $m$  saídas.



Fonte: Filho (2010).

Essas chaves bidirecionais de potência podem ser implementadas com dois IGBTs e dois diodos de potência conectados como na Figura 8. Nessas chaves, a corrente pode fluir para os dois sentidos, o que permite a conexão de qualquer fonte das  $n$  entradas nas  $m$  saídas, e também são capazes de bloquear tensão direta e reversa, comutando, idealmente, sem nenhum atraso (FILHO, 2010).

Figura 8 – Chave bidirecional.



Fonte: Mogstad et al. (2008).

As principais técnicas de controle usadas até hoje nos CM são as que seguem. A técnica clássica foi a proposta por Alesina e Venturini (1989), o método de modulação PWM. Existe também a técnica de modulação vetorial que oferece baixo esforço computacional, embora seja mais complexa do que o método de Venturini (HUBER; BOROJEVIC; BURANY, 1989). A Técnica de Controle Preditivo (TCE), proposta por Correa et al. (2009), que usa o modelo no tempo discreto do sistema para prever valores futuros das variáveis de controle. E ainda, o método de compensação do desequilíbrio e da distorção das tensões trifásicas de entrada (FILHO; FILHO, 2006).

### 5.3 Aplicação dentro do Processo de Veículos Elétricos

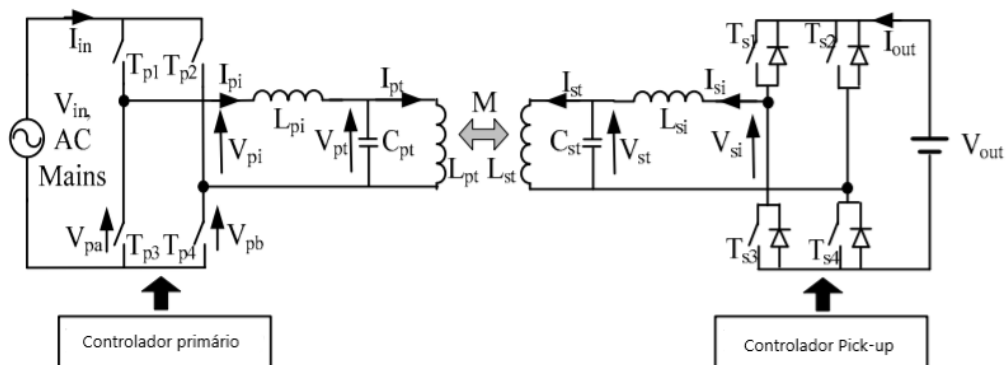
Dentro do processo de veículos elétricos, alguns dos estudos que pode-se citar como referencias são:

- Interface baseada em conversor em matriz de energia *Inductive Power Transfer* - IPT (transferência de energia indutiva) bidirecional para aplicações V2G (THIRIMAWITHANA; MADAWALA, 2010).
- Carregador Bidirecional para Veículos Elétricos Baseado em Andar de Conversão Matricial (VARAJÃO, 2012).

- Carregamento de bateria de veículo elétrico de alta potência e aplicação V2G (KRISHNAMOORTHY; GARG; ENJETI, 2012).
- Um sistema bidirecional trifásico para monofásico para carregar veículos elétricos (WEERASINGHE et al., 2013).
- Melhora da eficiência de veículos elétricos híbridos (DOBRUCKY et al., 2019).
- *Powertrain* para veículo elétrico híbrido com conversor em matriz e torque direto com controle em unidades de motorização assíncrona (DEACONU et al., 2019).
- Carregador trifásico isolado baseado em conversor em matriz com controle direto de energia (KUMAR; SINGH, 2020).
- Comparação e avaliação básicas de conceitos de conversor em matriz CA-CA de funcionalidade para VEH (DOBRUCKY et al., 2020a) e (DOBRUCKY et al., 2020b).

Baseada no CM, uma interface IPT bidirecional para aplicações em V2G é proposto por Thrimawithana e Madawala (2010). Esse sistema requer apenas um processo de conversão de energia de estágio único que facilite a transferência de energia bidirecional *wireless* entre os VE e a rede. O comportamento do sistema proposto mostrou que tanto o fluxo de energia quanto a direção podem ser controlados através de qualquer ângulo de fase relativo ou modulação de magnitude de tensões produzidas. A interface, baseada no CM, é de baixo custo e ideal para carregamento e descarregamento sem fio de um ou vários VE ou aplicações em V2G. O sistema proposto transfere energia através de acoplamento magnético, uma análise mostrou que a proposta é viável e requer uma estratégia de controle simples para controlar efetivamente a direção e a quantidade de fluxo de potência. Os resultados também mostraram confiabilidade, eficiência e baixo custo sem um estágio adicional de conversão de energia.

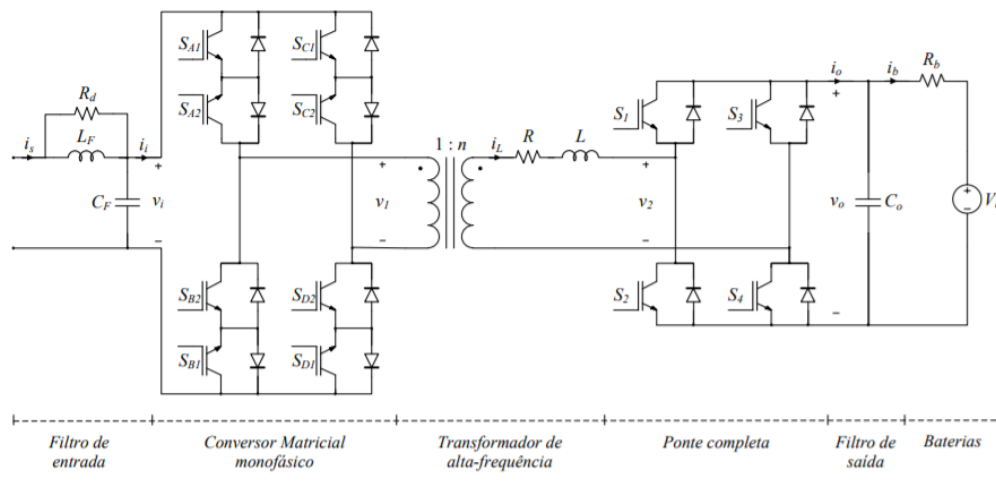
Figura 9 – Sistema ITP bidirecional, proposto, baseada em conversor em matriz.



Fonte: Thrimawithana e Madawala (2010).

Varajão (2012) propõe uma topologia de carregador bidirecional baseado em andar de conversão matricial para veículos elétricos. Conforme mostrado na Figura 10, este carregador fornece isolamento galvânico entre a rede elétrica e o veículo através de um transformador de alta frequência. O CM permite fazer a conversão CA-CA direta. Os testes comprovaram a bidirecionalidade do carregador, permitindo o uso de energia na rede no conceito de V2G. Esse controle de direção da potência também torna a topologia interessante para aplicações no campo de *smart grid*. O autor usou uma modulação que além de garantir o sincronismo com a rede, permite comutação com corrente nula, diminuindo as perdas associadas à comutação resultando no aumento da eficiência global.

Figura 10 – Topologia proposta para o carregador bidirecional baseada na *Dual Active Bridged CA-CC*.

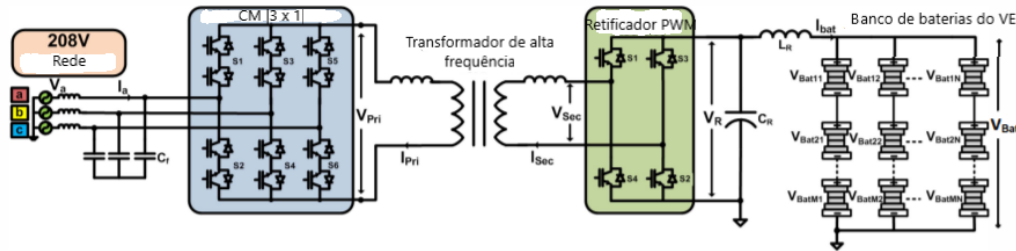


Fonte: Varajão (2012).

Krishnamoorthy, Garg e Enjeti (2012) propõem uma topologia de conversor trifásico baseado em um conversor em matriz (Figura 11). Na abordagem proposta, o CM converte diretamente baixa frequência (50/60 Hz, trifásico) de entrada para alta frequência de saída CA (6 kHz, monofásico) sem uma ligação CC. A saída do conversor em matriz é então processada por um retificador PWM através de um transformador isolador de alta frequência para fazer interface com o sistema de bateria do VE. O sistema retificador CM-PWM é feito para operar como uma ponte ativa dupla, facilitando o fluxo bidirecional de energia adequado para carregamento e aplicações *Vehicle-to-Grid* (V2G). Foi observada uma melhora do desempenho e eficiência de conversão de energia no carregamento de bateria de ônibus elétrico em alta potência e conversão de energia V2G. A topologia reduz o tamanho geral do sistema e aumenta a densidade de potência, tornando-o adequado para carregamento de bateria *on-board*. Isso é possível devido ao uso do transformador de alta frequência e eliminação de capacitores eletrolíticos da conversão de energia do lado primário. Além disso, a operação V2G pode ser realizada com a mesma facilidade que a

operação do CM, o que torna o conversor ainda mais atraente para infraestrutura de VE comerciais.

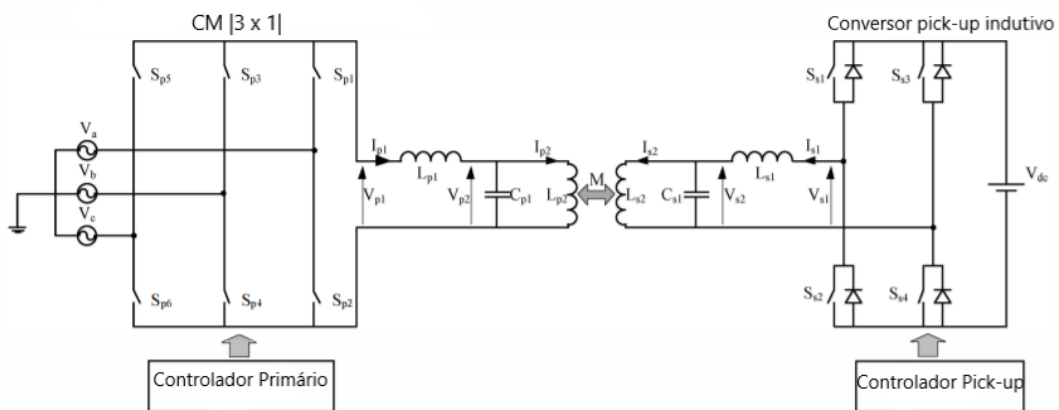
Figura 11 – Proposta de sistema de conversor de energia de carregamento de bateria VE trifásico usando ponte ativa dupla baseada em conversor em matriz.



Fonte: Krishnamoorthy, Garg e Enjeti (2012).

O artigo de Weerasinghe et al. (2013) apresenta um sistema de transferência de energia indutivo bidirecional baseado no conversor em matriz trifásico para monofásico (Figura 12). Esta estrutura requer apenas um processo de conversão de estágio único para facilitar a transferência de energia bidirecional entre veículos elétricos e a rede elétrica trifásica de alimentação. A viabilidade da topologia apresentada foi verificada por análise matemática junto com resultados de simulação e de um modelo. O sistema proposto é confiável, eficiente e ideal para aplicações de alta potência, como V2G sistemas que requerem carregamento e descarregamento rápidos.

Figura 12 – Sistema de transferência de energia indutivo bidirecional baseado no CM.

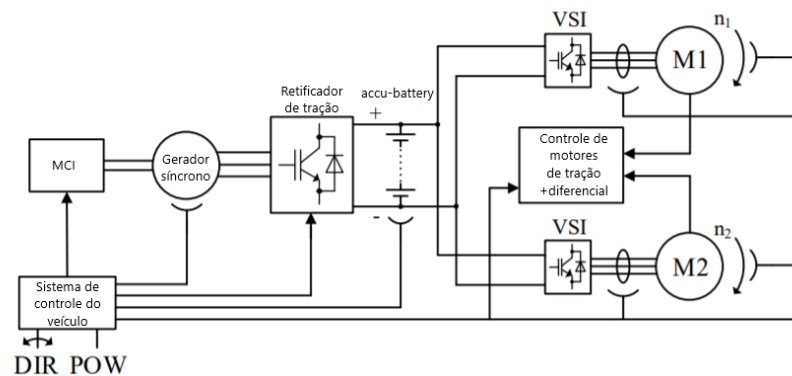


Fonte: Weerasinghe et al. (2013).

O artigo de Dobrucky et al. (2019) trata de uma nova conexão aprimorada do *powertrain* CA-CA para veículos elétricos híbridos (Figura 13). A contribuição substancial de tal conexão é a ausência do conversor auxiliar necessário para modos operacionais autônomo e híbrido.

As principais vantagens de uma conexão simplificada vai além de menor dimensionamento do conversor e possível melhor eficiência do *powertrain* do VEH. A operação do *powertrain* em modo de tração autônoma *accu-battery* usa configuração  $[0 \times 5]$  direta de tração CM  $[3 \times 5]$  e em modo híbrido o MCI e a *accu-battery*, além do CM de tração  $[3 \times 5]$ , e o CM auxiliar  $[0 \times 5]$ . Comparando os resultados calculados, conclui-se que a eficiência energética do CM  $[3 \times 3]$  e do CM  $[3 \times 5]$  é quase a mesma sob as mesmas tensões de fase de saída e fase de corrente correspondente. A eficiência calculada do *Voltage Source Inverter* (VSI) de cinco fases é ligeiramente melhor (aproximadamente 0,15%). Supondo a mesma voltagem e circunstâncias atuais, a eficiência semelhante é alcançada.

Figura 13 – VEH série CA-CA direto com um conversor CM e um conversor de bateria CM auxiliar  $[0 \times 5]$ .

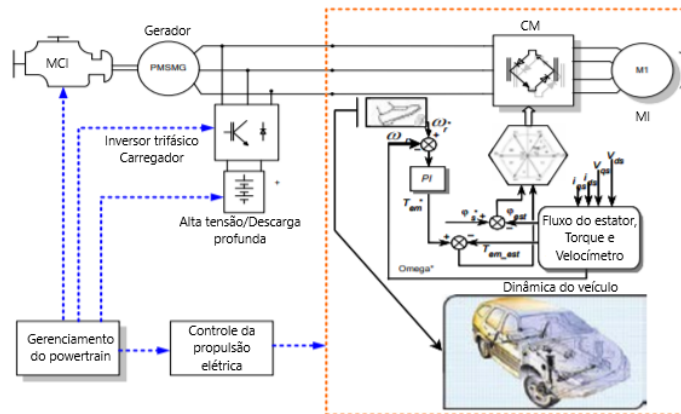


Fonte: Dobrucky et al. (2019).

Um *powertrain* de veículo elétrico para propulsão com um MI e um CM é proposto no artigo do Deaconu et al. (2019). O motor de indução é controlado usando um algoritmo de fluxo de torque direto. A solução proposta incorpora um conversor em matriz, CA-CA direto simples e compacto, para controlar a propulsão (Figura 14). Usando um CM, o acionamento elétrico irá fornecer corrente de entrada e tensão de saída senoidal. A integração do controle de torque direto irá garantir a otimização da condução e perdas de comutação com operação de alto desempenho do conversor e da máquina. O conversor em matriz tem vantagens como: a possibilidade de reduzir o número de interruptores, reduzindo assim o número de semicondutores e, posteriormente, perdas. As dificuldades em relação à comutação são reduzidas, interruptores do estágio de entrada (retificador) são reduzidos e o segundo estágio do conversor muda como um inversor padrão.



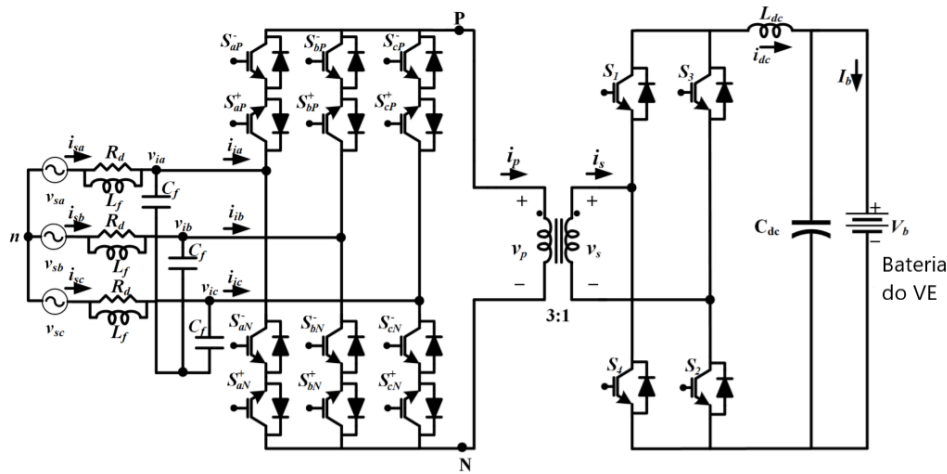
Figura 14 – conversor em matriz de integração de VEH e torque direto.



Fonte: Deaconu et al. (2019).

O artigo de Kumar e Singh (2020) apresenta um carregador trifásico isolado baseado no conversor em matriz com controle direto de energia (Figura 15). A isolação é feita utilizando um transformador de alta frequência. O CM aumenta a frequência de alimentação monofásica no lado primário do transformador, enquanto um retificador PWM é usado no secundário do transformador para permitir o fluxo de energia bidirecional e conversão de alta frequência CA em CC. Uma técnica bipolar de vetor espacial é usada para modular fonte trifásica para alta frequência monofásica. No lado da rede, fator de potência unitário e baixa inserção de harmônicas é alcançado nessa topologia, tanto no modo de carregamento quanto descarregamento. Essa topologia é considerada do tipo abaixadora durante o fluxo de energia do lado CA para CC, e elevadora quando a energia flui do lado CC para o lado CA. O esquema de controle direto de energia é usado para regular a corrente de carga ou saída de tensão CC simplesmente controlando o índice de modulação do CM usando modulação vetorial espacial bipolar. A isolação provida pelo transformador de alta frequência melhora a densidade de potência do sistema global além de adicionar mais segurança ao usuário. O CM permite conversão direta de alta frequência CA, sem precisar de um estágio intermediário CC. Embora o conversor em matriz possua muitos interruptores para realizar a conversão de estágio único, a exigência de um capacitor de *link* CC volumoso é eliminado, e a Distorção Harmônica Total (THD) da corrente de entrada ficou abaixo de 4%.

Figura 15 – Conversor CA-CC isolado trifásico para monofásico.



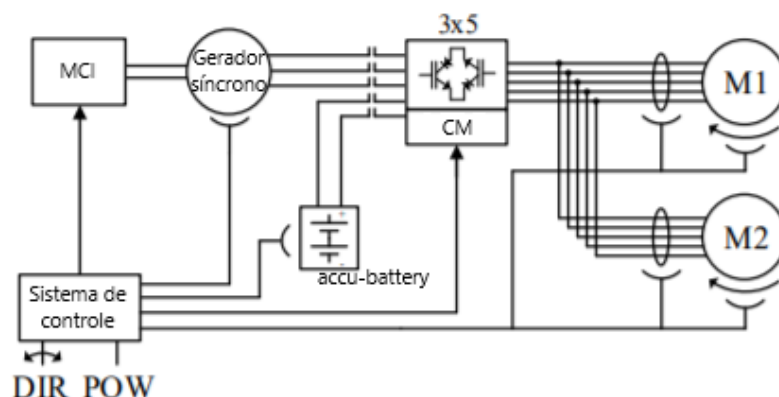
Fonte: Kumar e Singh (2020).

Dois artigos tratam do sistema de propulsão direta CA-CA e comparam dois conceitos de conversor em matriz com motores de indução de cinco fases para o veículo elétrico híbrido incluindo diferencial eletrônico (Figura 16). O primeiro conceito consiste em um CM  $[3 \times 5]$  e um retificador PWM ativo  $[3 \times 1]$  (conversor 4Q) para desempenho de potência total. Já o segundo conceito compreende um CM  $[3 \times 5]$  para potência total e um CM auxiliar  $[0 \times 5]$  para potência de saída parcial. A vantagem da conexão proposta está na maior eficiência do conversor em matriz do que o clássico VSI. Basicamente, no primeiro artigo, em Dobrucky et al. (2020a), trata-se de um estudo teórico dos conceitos. Com base nos resultados da simulação, a comparação e avaliação da propriedade e qualidade das quantidades dos diferentes tipos de *powertrain* da matriz são discutidas no segundo artigo, em Dobrucky et al. (2020b). Chegando na conclusão que o uso de um CM  $[3 \times 5]$  com motores de 5 fases traz:

- Maior eficiência comparado ao sistema de conversor de *front-end* VSI.
- Possibilidade de controle independente de motores de 5 fases.
- Tração autônoma de bateria e um regime de frenagem em que 4QC deve ser concluído pelo CM  $[3 \times 5]$ .
- Modo de carga da unidade MCI/GS com 4QC precisa de controle pelo motor MCI ou outro conversor CC-CC já que o CM auxiliar  $[0 \times 5]$  não precisa.

Em relação à comparação do sistema CM  $[3 \times 5]$  com 4QC auxiliar e CM auxiliar  $[0 \times 5]$ , o segundo é claramente melhor.

Figura 16 – VEH série/paralelo CA-CA com um conversor CM e dois motores de tração M1, M2 com controle independente.



Fonte: Dobrucky et al. (2020b).

Nos Quadros 3 e 4, um resumo das vantagens e desvantagens encontrada pelos autores dos estudos acima nas aplicações do CM em VE.

Quadro 3 – Resumo dos prós e contras do CM.

Estudo	Vantagens	Desvantagens
Interface baseada em conversor em matriz de energia IPT bidirecional	Conversão de energia em estágio único; Bidirecional; Confiabilidade; Eficiência; Baixo custo;	Ruído de alta frequência derivada das comutações; Poucos estudos de aplicações em IPT;
Carregador Bidirecional para Veículos Elétricos Baseado em Andar de Conversão Matricial	Conversão CA-CA direta; Bidirecional; Sincronismo com a rede; Comutação com corrente nula; Eficiência;	Atrasos na comutação; Necessidade de filtro passa-baixa;
Carregamento de bateria de veículo elétrico de alta potência	Conversão direta de baixa frequência trifásica para alta frequência monofásica; Bidirecional; Alto desempenho; Tamanho reduzido; Oferece maior densidade de potência;	Injeção de harmônicas para aumentar o ganho; Picos de tensão; Necessidade de filtro para limitar o THD;

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 4 – Continuação do resumo dos prós e contras do CM.

<b>Estudo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Um sistema bidirecional trifásico para monofásico para carregar veículos elétricos	Conversão de energia em estágio único; Bidirecional; Confiável; Eficiente; Ideal para aplicações de alta potência;	Algoritmo de controle complexo; Ressonância de alta frequência; Necessidade de filtro <i>notch</i> ;
Melhora da eficiência de veículos elétricos híbrido	Tamanho reduzido; Melhor eficiência;	Tensão de saída limitada;
<i>Powertrain</i> para veículo elétrico híbrido com conversor em matriz e torque direto	Topologia simples e compacta; Corrente de entrada e tensão de saída senoidais; Redução de perdas;	Controle difícil;
Carregador trifásico isolado baseado em conversor em matriz com controle direto de energia	Fator de potência unitário; Baixa inserção de harmônicas na rede; Conversão direta de alta frequência CA; Ausência de capacitor;	Estratégia de controle complexa;  Maiores perdas de comutação em altas frequências;
Comparação e avaliação básicas de conceitos de conversor em matriz CA-CA de funcionalidade para VEH	Maior eficiência; Controle independente e preciso;	Necessidade de filtros e circuitos de proteção; Maiores perdas em altas frequências de comutação; Problemas de ressonância em altas frequências;

Fonte: Produção do próprio autor.

#### 5.4 Comentários gerais

Esses são alguns exemplos dos diversos estudos de CM em VE existentes. As características da sua topologia sempre convergem para as mesmas vantagens. Portanto, com o crescimento dos VE, espera-se avanços tecnológicos relacionados e a consequente adoção de conversores mais avançados.

## 6 CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS

### 6.1 Comentários finais

Motivado pelo processo natural, que já se vê em outros países, da evolução tecnológica no meio de transporte. O objetivo principal deste trabalho foi revisar as consequências do uso de conversores matriciais em veículos elétricos.

As principais vantagens do CM estão listadas abaixo:

- Tamanho diminuto.
- Melhor monitoramento dos recursos energéticos.
- Funcionamento nos quatro quadrantes.
- Baixo custo.
- Alta confiabilidade.
- Alto rendimento.
- Bidirecional.
- Fator de potência quase unitário.
- Conversão de energia em estágio único.

A partir das análises dos veículos elétricos hoje e o potencial de melhora para o futuro, levando em consideração itens como a densidade de potência, custo e a confiabilidade dos equipamentos, concluí-se que esses fatores podem ser superior com a adoção do conversor matricial.

A densidade de potência do VEB pode ser melhorada ao diminuir seu peso, logo o conversor matricial é capaz de contribuir nesse aspecto. A confiabilidade dessa topologia é uma de suas característica mais significantes adicionando ainda mais bônus na sua escolha como dispositivo preferido.

O alto número de chaves dessa topologia é compensado pela diminuição do seu tamanho e peso em relação aos conversores tradicionais. Além disso, todas bibliografias administraram

os problemas do CM, como controle complexo, chegando à conclusão que mesmo assim essa solução é melhor frente as outras.

## **6.2 Propostas de trabalhos futuros**

Como propostas de trabalhos futuros, sugere-se uma análise da melhor solução para aplicações em veículos elétricos e o estudo da técnica de controle que é mais compatível, com modelagem matemáticas, simulações e construção de protótipos, e também, a aplicação e comportamento do CM em veículos elétricos pesados.

## REFERÊNCIAS

- ALESINA, A.; VENTURINI, M. G. B. Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct ac-ac converters. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 4, n. 1, p. 101–112, 1989. Citado na página 35.
- AUTODATA. Consumidor buscará carro no pós pandemia, diz estudo. Ago. 2021. Disponível em: <<https://www.autodata.com.br/noticias/2020/06/19/consumidor-buscar-carro-no-pos-pandemia-diz-estudo/31400/>>. Citado na página 22.
- BARAKATI, S.; KAZERANI, M.; CHEN, X. A new wind turbine generation system based on matrix converter. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. [S.l.: s.n.], 2005. p. 2083–2089 Vol. 3. Citado na página 16.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no brasil. In: . Produção BNDES - Artigos, Rio de Janeiro, 2011. p. 207–224. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1489>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- BECK, R. Expectativas da Mobilidade Elétrica para o novo normal. In: . [S.l.: s.n.], 2020. Citado na página 22.
- BUENO, A. G. A tração elétrica como alternativa para o transporte urbano. Tese (Doutorado) — UFRGS, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/5689>>. Acesso em: 10 ago. 2021. Citado na página 26.
- CORREA, P.; RODRIGUEZ, J.; RIVERA, M.; ESPINOZA, J. R.; KOLAR, J. W. Predictive control of an indirect matrix converter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 6, p. 1847–1853, 2009. Citado na página 35.
- DEACONU, S. I.; TOPOR, M.; POPA, G. N.; BU, F. Hybrid electric vehicle with matrix converter and direct torque control in powertrains asynchronous motor drives. MATEC Web Conf., v. 292, p. 01066, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/mateconf/201929201066>>. Citado 3 vezes nas páginas 36, 39 e 40.
- DITMANSEN, S. EV Powertrain Components - Basics. EVreporter, 2019. Disponível em: <<https://evreporter.com/ev-powertrain-components/>>. Acesso em: 31 ago. 2021. Citado na página 29.
- DOBRUCKY, B.; KASCAK, S.; PRAZENICA, M.; JARABICOVA, M. Improving efficiency of hybrid electric vehicle using matrix converters. Elektronika ir Elektrotechnika, v. 25, n. 4, p. 29–35, Aug. 2019. Disponível em: <<https://eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/23967>>. Citado 3 vezes nas páginas 36, 38 e 39.
- DOBRUCKY, B.; KASCAK, S.; PRAZENICA, M.; KONARIK, R. Basic comparison and evaluation of functionality ac-ac matrix converter concepts for hev vehicle - part i. Communications - Scientific letters of the University of Zilina, v. 22, n. 1, p. 77–83, Jan.

2020. Disponível em: <<http://komunikacie.uniza.sk/index.php/communications/article/view/1536>>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 41.

DOBRUCKY, B.; KASCAK, S.; PRAZENICA, M.; KONARIK, R. Basic comparison and evaluation of functionality ac-ac matrix converter concepts for hev vehicle - part ii. Communications - Scientific letters of the University of Zilina, v. 22, n. 2, p. 73–78, Apr. 2020. Disponível em: <<http://komunikacie.uniza.sk/index.php/communications/article/view/1551>>. Citado 3 vezes nas páginas 36, 41 e 42.

ELECTRICAL; ROADMAP, E. T. T. Electrical and Electronics Technical Team Roadmap. [S.l.]: Electrical and Electronics Tech Team Roadmap, 2017. Acesso em: 7 ago. 2021. Citado na página 27.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA: Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis>>. Citado na página 15.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Eletromobilidade e Biocombustíveis: Documento de Apoio ao PNE 2050. [S.l.]: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018. Citado na página 15.

EVREPORTER. Why is a Battery Management System needed in Electric Vehicles? EVreporter, 2020. Disponível em: <<https://evreporter.com/battery-management-system-for-electric-vehicles/>>. Acesso em: 27 jul. 2021. Citado na página 28.

FGV ENERGIA. Timeline da mobilidade elétrica no mundo. In: \_\_\_\_\_. CARROS ELÉTRICOS. [S.l.]: accenture, 2017. Citado na página 20.

FILHO, E. R.; FILHO, M. E. de O. MÉTODO DE COMPENSAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO E DA DISTORÇÃO DAS TENSÕES TRIFÁSICAS DE ENTRADA DE UM CONVERSOR TRIFÁSICO-TRIFÁSICO EM MATRIZ. [S.l.]: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2006. Citado na página 35.

FILHO, M. E. de O. Estudo e implementação de um controle de corrente para conversores em matriz e inversores fonte de tensão sem capacitor no elo de corrente contínua. 111 p. Tese (Doutorado) — UNICAMP, 2010. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/260741>>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

FOOTE, A.; ONAR, O. C. A review of high-power wireless power transfer. In: 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). [S.l.: s.n.], 2017. p. 234–240. Citado na página 16.

FRIESKE, B.; KLOETZKE, M.; MAUSER, F. Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles. In: 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–12. Citado na página 29.

GANZENMÜLLER, W. H. Conversor de energia para estação de carregamento de veículos elétricos puros por meio de transmissão de energia elétrica sem fio. Tese (Doutorado) —



UNESP, 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/202172>>. Acesso em: 10 ago. 2021. Citado na página 28.

GARCIA-GIL, R.; ESPI, J.; DEDE, E.; SANCHIS-KILDERS, E. A bidirectional and isolated three-phase rectifier with soft-switching operation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 52, n. 3, p. 765–773, 2005. Citado na página 15.

HUBER, L.; BOROJEVIC, D.; BURANY, N. Voltage space vector based pwm control of forced commutated cycloconverters. In: 15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.: s.n.], 1989. p. 106–111 vol.1. Citado na página 35.

HURST, Z. What's in a BEV? EV-resource, 2019. Disponível em: <<https://www.ev-resource.com/bev-system-components.html>>. Acesso em: 31 ago. 2021. Citado na página 28.

INEE. SOBRE VEÍCULOS ELÉTRICOS. INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGETICA, 2019. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/veh\\_sobre.asp?Cat=veh](http://www.inee.org.br/veh_sobre.asp?Cat=veh)>. Citado na página 25.

IRANAQ, A. R. M.; HAQUE, M. T.; BABAEI, E. A upfc based on matrix converter. In: 2010 1st Power Electronic Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC). [S.l.: s.n.], 2010. p. 95–100. Citado na página 16.

Jyotheeswara Reddy, K.; NATARAJAN, S. Energy sources and multi-input dc-dc converters used in hybrid electric vehicle applications – a review. International Journal of Hydrogen Energy, v. 43, n. 36, p. 17387–17408, 2018. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918322304>>. Citado na página 26.

KLUMPNER, C.; NIELSEN, P.; BOLDEA, I.; BLAABJERG, F. A new matrix converter-motor (mcm) for industry applications. In: Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129). [S.l.: s.n.], 2000. v. 3, p. 1394–1402 vol.3. Citado na página 16.

KRISHNAMOORTHY, H. S.; GARG, P.; ENJETI, P. N. A matrix converter-based topology for high power electric vehicle battery charging and v2g application. In: IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2866–2871. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 38.

KUMAR, D.; NEMA, R. K.; GUPTA, S. A comparative review on power conversion topologies and energy storage system for electric vehicles. International Journal of Energy Research, v. 44, n. 10, p. 7863–7885, 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.5353>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 33 e 34.

KUMAR, R.; SINGH, B. Matrix converter based three phase isolated ev charger with direct power control. In: 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 36, 40 e 41.

LMC-AUTOMOTIVE. Sales forecast. Ago. 2021. Disponível em: <<https://lmc-auto.com/news-and-insights/public-data/>>. Citado na página 22.

- LUZ, M. L. G. S. da. Motores a combustão interna. Universidade Federal de Pelotas, 2013. Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/mlaura/files/2013/01/Apostila-de-Motores-a-Combust~ao-Interna.pdf>>. Citado na página 25.
- MATHEW, S. How does an Electric Car work? LESICS, 2017. Disponível em: <<https://www.lesics.com/how-does-an-electric-car-work.html>>. Citado na página 25.
- MATHEW, S. How does an Induction Motor work ? LESICS, 2019. Disponível em: <<https://www.lesics.com/how-does-an-induction-motor-work.html>>. Citado na página 31.
- MATULKA, R. The history of the electric car. Department of Energy, Set. 2014. Disponível em: <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>>. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 19 e 20.
- METIDJI, R.; METIDJI, B.; MENDIL, B. Design and implementation of a unity power factor fuzzy battery charger using an ultrasparse matrix rectifier. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, n. 5, p. 2269–2276, 2013. Citado na página 16.
- MOGSTAD, A.; MOLINAS, M.; OLSEN, P.; NILSEN, R. A power conversion system for offshore wind parks. In: . [S.l.: s.n.], 2008. p. 2106 – 2112. Citado na página 35.
- MURGOVSKI, N. Optimal Powertrain Dimensioning and Potential Assessment of Hybrid Electric Vehicles. Tese (Doutorado) — Chalmers University of Technology Goteborg, 01 2012. Citado na página 17.
- NOGUEIRA, S. C. Projeto de Lei do Senado nº 304, de 2017. 2017. Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/130612>>. Citado na página 23.
- PAY, S.; BAGHZOUZ, Y. Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles. In: 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. [S.l.: s.n.], 2003. v. 3, p. 6 pp. Vol.3-. Citado na página 28.
- PEREIRA, F. Gurgel Itaipu: há 46 anos, um brasileiro elétrico desafiava a gasolina. QUATRO RODAS, 2021. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/carros-classicos/gurgel-itaipu-ha-46-anos-um-brasileiro-eletrico-desafiava-a-gasolina/>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- Rick Rowen, R. General Motors EV1. 2002. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/rightbrainphotography/2224079684/in/set-72157603803274612/>>. Citado na página 19.
- SOTA, A. A. do R. Protótipo de conversor matricial, com opção de quatro braços. 92 p. Tese (Doutorado) — Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, 2013. Citado na página 34.
- THRIMAWITHANA, D. J.; MADAWALA, U. K. A novel matrix converter based bi-directional ipt power interface for v2g applications. In: 2010 IEEE International Energy Conference. [S.l.: s.n.], 2010. p. 495–500. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- VARAJÃO, D. Carregador Bidirecional para Veículos Elétricos Baseado em Andar de Conversão Matricial. Tese (Doutorado) — Faculty of Engineering of the University of Porto, 07 2012. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 37.

- WANGSUPPHAPHOL, A.; IDRIS, N. R. N.; JUSOH, A.; MUHAMAD, N. D. Power converter design for electric vehicle applications. Jurnal Teknologi, v. 67, 03 2013. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.
- WEERASINGHE, D.; MADAWALA, U.; THRIMAWITHANA, D.; VILATHGAMUWA, D. A three-phase to single-phase matrix converter based bi-directional ipt system for charging electric vehicles. In: 2013 IEEE ECCE Asia Downunder. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1240–1245. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.
- YAN, Z.; ZHANG, K.; LI, J.; WU, W. A novel absolute value logic spwm control strategy based on de-re-coupling idea for high frequency link matrix rectifier. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 9, n. 2, p. 1188–1198, 2013. Citado na página 16.
- YOU, K.; XIAO, D.; RAHMAN, M. F.; UDDIN, M. N. Applying reduced general direct space vector modulation approach of ac–ac matrix converter theory to achieve direct power factor controlled three-phase ac–dc matrix rectifier. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 50, n. 3, p. 2243–2257, 2014. Citado na página 16.
- ZERAOULIA, M.; BENBOUZID, M.; DIALLO, D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 55, n. 6, p. 1756–1764, Nov 2006. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00523504>>. Citado na página 31.