

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

MATHEUS BIRKHAN DIAS

PROJETO DE UM CONVERSOR CHAVEADO-LINEAR COM MÓDULOS
CONVERSORES EM PARALELO

Joinville

2024

MATHEUS BIRKHAN DIAS

PROJETO DE UM CONVERSOR CHAVEADO-LINEAR COM MÓDULOS
CONVERSORES EM PARALELO

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica, no Curso de Engenharia Mecatrônica, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr. Dalton Luiz Rech Vidor

Joinville

2024

Dedico este trabalho, a minha primeira professora, minha mãe, pelo incentivo e inspiração à vida. Além disso, dedico também a Gabriely Lorenzoni Rodrigues por estar junto comigo em todos esses anos árduos de estudo, além de sempre me alavancar em qualquer situação adversa.

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta jornada acadêmica, foi possível definir o verdadeiro significado de riqueza. Passamos por pandemia, greve, e desafios pessoais, e no final do dia, quem está ao seu lado, é quem verdadeiramente importa.

Agradeço a minha família, pelo suporte e incentivo aos estudos.

Agradeço a Gabriely Lorenzoni Rodrigues, a qual é minha base e inspiração para meu dia a dia.

Além disso, meus sinceros agradecimentos ao Professor Dalton Vidor. Se houve algum docente ao longo desta jornada que me incentivou e me inspirou a ser um estudante melhor, foi você.

“Não existem atalhos – tudo é repetição, repetição, repetição.”
(Arnold Schwarzenegger).

RESUMO

A demanda por fontes de tensão que sejam capazes de se adequar dinamicamente a demanda de potência e que podem ser adaptadas para diferentes necessidades tem crescido significativamente, especialmente em ambientes de alta competitividade e inovação. As equipes estudantis que utilizam motores elétricos frequentemente necessitam de fontes de tensão específicas para sua demanda energética, geralmente tendo que desenvolverem associações personalizadas de células de baterias para atender às suas exigências específicas. No entanto, as soluções comerciais disponíveis muitas vezes não oferecem a flexibilidade necessária para ajustar a capacidade de potência conforme as demandas energéticas variem, em casos de *upgrades* ou *downgrades* de seus sistemas de tração, resultando em limitações significativas na eficiência e na aplicabilidade dos conversores utilizados por essas equipes. Para superar essas limitações, propõe-se um conversor chaveado-linear com módulos em paralelo, como fonte de tensão, permitindo ajustes dinâmicos na capacidade de potência conforme as necessidades variam. Esta abordagem não apenas integra as vantagens das topologias chaveadas e lineares, mas também oferece a flexibilidade de escalar o sistema conforme as exigências específicas de cada aplicação. A metodologia envolve uma revisão bibliográfica, análise de requisitos específicos das equipes de competição UFSC-Joinville, desenvolvimento de projeto, e exposição de simulações, bem como seus respectivos resultados.

Palavras-chave: conversor chaveado-linear; paralelo; conversor híbrido.

ABSTRACT

The demand for voltage sources that are capable of dynamically adapting to power demands and that can be adjusted for different needs has grown significantly, especially in environments of high competitiveness and innovation. Student teams that use electric motors frequently require specific voltage sources for their energy demands, generally needing to develop customized arrangements of battery cells to meet their specific requirements. However, the commercially available solutions often do not offer the necessary flexibility to adjust power capacity as energy demands vary, in cases of upgrades or downgrades of their traction systems, resulting in significant limitations in the efficiency and applicability of the converters used by these teams. To overcome these limitations, a switched-linear converter with parallel modules is proposed as a voltage source, allowing dynamic adjustments in power capacity as needs vary. This approach not only integrates the advantages of switched and linear topologies but also offers the flexibility to scale the system according to the specific requirements of each application. The methodology involves a bibliographic review, analysis of specific requirements from the UFSC-Joinville competition team, project development, and presentation of simulations as well as their respective results.

Keywords: switched-linear converter; parallel; hybrid converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Protótipo elétrico da equipe Fórmula Cem	20
Figura 2 - Motor de indução da Equipe Fórmula Cem.....	21
Figura 3 - Banco de bateria da equipe Fórmula Cem.....	22
Figura 4 - Inversor utilizado pela equipe Fórmula Cem.....	22
Figura 5 - Amplificador classe AB	25
Figura 6 - Inversor meia-ponte com estrutura em paralelo.....	28
Figura 7 - Estrutura conversor híbrido	30
Figura 8 - Associação do conversor Buck a um amplificador linear em paralelo.....	31
Figura 9 - Associação de inversores meia-ponte com amplificador linear em paralelo	33
Figura 10 - Amarração de Bootstrap	35
Figura 11 - Conversor híbrido proposto por Vidor <i>et. al</i> (2019)	37
Figura 12 - Corrente em cada módulo conversor em paralelo	37
Figura 13 - Diagrama de blocos de um conversor híbrido.....	38
Figura 14 - Aplicação do conversor CC-CC proposto como fonte.....	40
Figura 15 - Conversor proposto como fonte para a equipe Fórmula Cem	41
Figura 16 - Especificações motor WEG	42
Figura 17 - Bloco de controle	51
Figura 18 - Módulo conversor de Baixa Frequência para a equipe Fórmula Cem	52
Figura 19 - Conversor com apenas um braço conversor de baixa frequência	53
Figura 20 - Braço conversor de baixa frequência e bloco de controle.....	54
Figura 21 - Módulo de controle de tensão	56
Figura 22 - Corrente em cada módulo conversor	57
Figura 23 - Tensão e Corrente de saída	58
Figura 24 - Saída dos módulos conversores.....	58
Figura 25 – Valores de saída e corrente sobre cada módulo conversor	59
Figura 26 - Conversor da equipe Babitonga.....	60
Figura 27 - Valores de corrente e tensão do conversor da equipe Babitonga.....	61
Figura 28 - Conversor da equipe Draconis.....	62
Figura 29 - Valores de corrente e tensão do conversor da equipe Draconis.....	62
Figura 30 - Conversor da equipe Eficem.....	63

Figura 31 - Valores de corrente e tensão do conversor da equipe Eficem.....	63
Figura 32 - Valores de tensão e corrente em caso de falha.....	64
Figura 33 - Módulos conversores em estado de curto	65
Figura 34 – Circuito de acionamento <i>Gate driver</i> com amarração de <i>Bootstrap</i>	68
Figura 35 – Módulo conversor genérico	69
Figura 36 - PCI de um módulo conversor.....	70
Figura 37 - Layout do esquemático de um módulo conversor.....	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Equipes de competição da UFSC - Joinville	14
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equipes de competição da UFSC - Joinville e suas necessidades de potência.....	19
Tabela 2 – Características do sistema de potência equipe Fórmula Cem	20
Tabela 3 - Sistema de tração equipe Fórmula Cem	41
Tabela 4 - Equipe de competição x Valores de indutância de cada braço	47
Tabela 5 - Dispositivo chaveadores escolhidos.....	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral.....	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. EQUIPES DE COMPETIÇÃO DA UFSC – JOINVILLE	18
2.1.1. Equipe Fórmula Cem.....	19
<u>2.1.1.1 Motor de indução.....</u>	<u>21</u>
<u>2.1.1.2 Banco de baterias</u>	<u>21</u>
2.2 TOPOLOGIA DE CONVERSORES	23
2.2.1 Conversores CC-CC	23
<u>2.2.1.1 Amplificadores lineares</u>	<u>24</u>
<u>2.2.1.2 Conversores chaveados CC-CC</u>	<u>25</u>
<u>2.2.1.3 Conversores em paralelo</u>	<u>27</u>
2.3 ASSOCIAÇÃO DE FONTES	29
2.4 ASSOCIAÇÃO DE FONTES COM MÓDULOS CONVERSORES EM PARALELO	32
2.5 GATE-DRIVES	33
2.6 CONTROLE DE CONVERSORES HÍBRIDOS PARALELO COMO FONTES	36
3. DESENVOLVIMENTO	40
3.1 REQUISITOS DE PROJETO	41
3.2 MÓDULOS CONVERSORES CHAVEADOS	42
3.2.1 Módulos conversores chaveados de baixa frequência.....	43
3.2.2 Módulos conversores chaveados de Média e Alta frequência.....	44
3.3 DIMENSIONAMENTO.....	44
3.3.1 Equipe Fórmula Cem.....	44
3.3.2 Demais equipes	47
3.4 CONTROLE	47
3.4.1 Controle de tensão na saída.....	48
<u>3.4.1.1 Controlador PI</u>	<u>48</u>
3.4.2 Controle de corrente dos conversores chaveados	49

4. SIMULAÇÃO.....	52
4.1 ESQUEMÁTICO.....	52
4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	56
4.2.1 Equipe Fórmula Cem.....	57
4.2.2 Demais equipes	60
<u>4.2.2.1 Babitonga</u>	<u>60</u>
<u>4.2.2.2 CTJ Baja.....</u>	<u>61</u>
<u>4.2.2.3 Draconis</u>	<u>61</u>
<u>4.2.2.4 Eficem</u>	<u>62</u>
4.2.3 Configuração de sobrecorrente ou falha	64
5. DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR.....	66
5.1 MÓDULOS CONVERSORES X DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO	66
5.2 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	67
5.2.1 Cálculo do capacitor de bootstrap.....	67
5.2.2 Acionamento do IR2110.....	69
5.2.3 Desenvolvimento.....	69
6. CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS.....	73

1. INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias relacionadas a eletrônica de potência está diretamente impulsionado pelo aumento da capacidade de prover demanda energética aos dispositivos eletrônicos, especialmente por meios conversores de tensão. Neste contexto, o conceito de modularidade energética tem ganhado destaque, refletindo a necessidade crescente de sistemas que possam se adaptar dinamicamente a diferentes condições de operação e requisitos de potência. Paralelamente, em ambientes altamente competitivos e inovadores, como indústrias automotivas, aeroespaciais e de telecomunicações, a demanda por conversores de potência versáteis tem crescido significativamente. Esses setores exigem soluções robustas e flexíveis que possam ajustar eficientemente a capacidade de potência para otimizar o desempenho dos sistemas elétricos, reduzir custos operacionais e melhorar a eficiência energética.

Visando introduzir esse ambiente inovador e competitivo, a SAE (*Society of Automotive Engineers*), *Shell Eco-Marathon*, IMAV (*International Micro Air Vehicles, Conferences and Competitions*), entre outras instituições, promovem anualmente competições, entre equipes estudantis no mundo todo.

A universidade Federal de Santa Catarina, Câmpus Joinville, compreende uma diversidade de equipe estudantis, desde equipes de desenvolvimento de barcos movidos a energia solar a equipes de desenvolvimento de protótipos veiculares no estilo Fórmula. De acordo com o site institucional da UFSC, Câmpus Joinville abriga um total de quatorze equipe estudantis. Abaixo é apresentado as equipes de competições da UFSC Câmpus Joinville.

Quadro 1 - Equipes de competição da UFSC - Joinville

Equipe de competição	Área de aplicação
Barco Solar Babitonga	Desenvolvimento de um barco movido a energia solar
BOTCEM	Desenvolvimento de robôs
CTJ Baja	Desenvolvimento de um veículo off-road
Draconis Drone Designs	Desenvolvimento de Drones

Duna (Desafio Universitário de Nautidesign)	Desenvolvimento de uma embarcação do tipo rebocador
Eficem	Equipe de eficiência energética
Fórmula Cem – Combustion and Electric Motorsport	Desenvolvimento de um protótipo veicular no estilo fórmula a combustão e elétrico
Hydra Nautidesign – HYN	Desenvolvimento de uma embarcação do tipo rebocador
Seven Seas	Equipe de nautimodelismo
Holandês Voador	Equipe de nautimodelismo
InfraTEC	Desenvolvimento de projetos de protótipos de áreas da infraestrutura
Kosmos Foguetemodelismo	Desenvolvimento de protótipos de foguetes
Nisus	Desenvolvimento de uma aeronave de pequeno porte
Terra Team Competition	Desenvolvimento de um Veículo autônomo subaquático (AUV)

Fonte: O autor (2024).

Dentre as equipes apresentadas acima, as equipes Barco Solar Babitonga, CTJ Baja, Draconis Drone Designs, Fórmula Cem – Combustion and Electric Motorsport, e Eficem fazem uso de sistemas motrizes trifásicos. Desse modo, ditas equipes fazem uso de baterias e inversores para promover o funcionamento eficiente e otimizado de seus respectivos sistemas de propulsão.

Os sistemas elétricos que compõem os protótipos de todas as equipes supracitadas são desenvolvidos internamente pelos seus respectivos membros. Atualmente, cada equipe utiliza um motor e um inversor, cada um com uma potência específica para atender às suas necessidades. Contudo, todas essas equipes buscam constantemente melhorar o desempenho de seus sistemas elétricos. Isso inclui aumentar a potência do motor, seja através da substituição por um modelo superior ou por modificações físicas.

No entanto, esse objetivo de melhoria contínua apresenta o desafio de fornecer a potência necessária aos sistemas motrizes. Os sistemas atuais foram projetados previamente para operar com especificações específicas de tensão e

corrente, o que limita a capacidade de suportar *upgrades* significativos de potência sem comprometer sua funcionalidade. Assim, as equipes precisam considerar cuidadosamente as restrições de seus sistemas elétricos ao implementar melhorias para garantir que os *upgrades* não afetem negativamente a operação e a eficiência dos protótipos.

É nesse contexto que se dá o objetivo do presente trabalho, o qual é projetar um conversor, que atue como uma fonte de tensão, para atender as demandas de potências de todas as equipes da UFSC - Joinville, que compreenda a capacidade de se adaptar as demandas energéticas necessárias, e que ainda, por meio de uma característica modular, possibilite aumentar a entrega de potência, bem como reduzir, se desejado.

1.1. OBJETIVOS

Considerando a problemática de que as equipes de competição da UFSC – Joinville não compreendem a flexibilidade de prover a potência que será provida a seus sistemas motrizes, propõe-se nesse trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Projetar um conversor que compreenda a capacidade de se adequar dinamicamente a entrega de potência, com baixo ruído e com rápida resposta dinâmica, por meio do acréscimo ou retirada de módulos conversores em paralelo, de modo atender as demandas energéticas de todas as equipes de competição da UFSC – Joinville.

1.1.2. Objetivos Específicos

As etapas necessárias para projetar o conversor proposto consistem em:

- a) Identificar na literatura topologias de conversores que compreendam resposta dinâmica quando sujeitos a cargas variáveis;
- b) Desenvolver em ambiente de simulação um circuito conversor que atenda a demanda energética de cada equipe de competição;

- c) Estabelecer um controle de corrente e tensão entre os módulos conversores em paralelo;
- d) Elaborar um esquemático e *layout* de um ou mais módulos conversores para atender a maior potência necessitada dentre as equipes de competição da UFSC – Joinville.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão teórica sobre os conceitos mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho proposto. Desse modo, é introduzido uma contextualização sobre as equipes de competição da UFSC - Joinville, topologias de conversores, métodos de modulação e controle de conversores.

2.1. EQUIPES DE COMPETIÇÃO DA UFSC – JOINVILLE

A Universidade Federal de Santa Catarina, Câmpus Joinville, abriga um total de quatorze equipes de competição, que participam de eventos nacionais e internacionais. Ditos eventos apresentam desafios de engenharia, e as equipes, por meio de seus protótipos desenvolvidos, precisam superá-los.

Cada equipe foca em um campo específico de aplicação, desde o desenvolvimento de barcos movidos a energia solar até protótipos de veículos no estilo Fórmula. A diversidade das áreas de atuação das equipes permite uma ampla gama de experimentação e inovação tecnológica. As competições não só testam as habilidades técnicas e teóricas dos estudantes, mas também fomentam o trabalho em equipe, a gestão de projetos e a capacidade de resolver problemas sob pressão.

Dentre as quatorze equipes de competição estudantis, as equipes Babitonga, CTJ Baja, Draconis, Fórmula Cem – Electric Motorsport e Eficem empregam o uso de sistemas motrizes trifásicos. Desse modo, todas estas equipes fazem uso de baterias e inversores para promover o funcionamento eficiente e otimizado de seus respectivos sistemas de propulsão.

Cada equipe compreende um sistema motriz próprio, com fornecimento de potência específico para cada respectivo sistema. Isso significa que os motores e inversores são selecionados para atender às necessidades únicas de cada protótipo, garantindo a máxima eficiência e desempenho. Por exemplo, os motores e inversores utilizados pela equipe de Fórmula Cem são escolhidos para fornecer a potência e a velocidade necessárias para competições de alta performance. Já a equipe Barco Solar Babitonga seleciona seus componentes com foco na eficiência energética e na autonomia, essenciais para competições de barcos movidos a energia solar.

Abaixo é apresentado a potência demandada por cada sistema motriz de cada equipe.

Tabela 1 - Equipes de competição da UFSC - Joinville e suas necessidades de potência

Equipe de competição	Potência Nominal (kW)	Tensão Nominal (V)	Corrente Nominal (A)
Barco Solar Babitonga	3	48	72
CTJ Baja	6	51	118
Draconis Drone Designs	1,5	15	50
Eficem	0,5	36	14
Fórmula Cem – Electric Motorsport	6	51	118

Fonte: O autor (2024).

Com base na Tabela 1 apresentada, nota-se que os sistemas motrizes da equipe Fórmula Cem e da equipe CTJ Baja são os que mais demandam potência para funcionarem em regime de trabalho. A similaridade na potência demandada pelas duas equipes é explicada pelo fato de que o *powertrain* da equipe Fórmula Cem e da equipe CTJ Baja é o mesmo.

Considerando as diferentes demandas de potência das equipes, é possível concluir que um conversor projetado para atender aos requisitos energéticos dos sistemas motrizes das equipes Fórmula Cem e CTJ Baja também será capaz de suprir as necessidades das demais equipes, uma vez que estas utilizam sistemas com menores exigências de potência. Essa abordagem evidencia a viabilidade de otimizar o desenvolvimento de conversores, priorizando soluções mais robustas que atendam às maiores demandas, sem comprometer a eficiência ou a funcionalidade dos protótipos das outras equipes. Diante disso, os parâmetros de potência da equipe Fórmula Cem serão adotados como referência para o desenvolvimento deste trabalho

2.1.1. Equipe Fórmula Cem

A equipe de competição Fórmula Cem da UFSC Joinville, de acordo com as normas da SAE (*Society of Automotive Engineers*), participa da competição Fórmula SAE. De acordo com o site da SAE Brasil (2024), a Fórmula SAE Brasil é um programa estudantil que tem como objetivo proporcionar aos estudantes de engenharia a chance de colocar em prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, por meio do desenvolvimento de um projeto completo, um veículo do tipo Fórmula.

A equipe de competição Fórmula Cem desenvolveu um protótipo 100% elétrico, não fazendo uso de qualquer tecnologia híbrida com um motor de combustão interna. O protótipo veicular é impulsionado por um motor da WEG, controlado pelo inversor CVW 300, também da empresa WEG, e possui um banco de baterias com 120 células (20s6p), totalizando 4,4 kWh de energia total disponível e 74 V de voltagem nominal do sistema.

Tabela 2 – Características do sistema de potência equipe Fórmula Cem

Máxima tensão do sistema de tração	84 Vcc
Tensão nominal do <i>pack</i> de baterias	74 Vcc
Capacidade dos <i>packs</i> de baterias	4,4 kWh
Potência do motor	6 kW

Fonte: O autor (2024).

Na figura 1 é apresentado o protótipo veicular desenvolvido pela equipe Fórmula Cem.

Figura 1 - Protótipo elétrico da equipe Fórmula Cem



Fonte: Fórmula Cem (2022)

2.1.1.1 Motor de indução

O motor de indução é um tipo de máquina de corrente alternada (CA). Nesse motor, a corrente alternada é aplicada diretamente aos enrolamentos do estator, e a corrente no rotor é produzida por indução, assim, os enrolamentos no rotor são curtos circuitados e, em sua maioria, não apresentam conexões externas (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003).

Abaixo é apresentado as especificações técnicas do motor de indução utilizado pela equipe Fórmula Cem, atualmente.

Figura 2 - Motor de indução da Equipe Fórmula Cem



WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A.

MOTOR ELÉTRICO PARA TRACÇÃO VEÍCULAR

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Carcaça	: 112	Regime de serviço	: -
Potência nominal	: 6 kW	Fator de serviço	: 1,00
Potência máxima	: 20 kW	Categoria	: N
Rotação nominal	: 4400 rpm	Grau de proteção	: IP55
Rotação máxima	: 9000 rpm	Torque nominal	: 13 Nm
Tensão nominal	: 51 Vca	Torque máximo	: 42,4 Nm
Corrente nominal	: 118 A	Resfriamento	: ar
Ip/In	: -	Massa	: 17 kg

Fonte: Fórmula Cem (2017)

2.1.1.2 Banco de baterias

Para atender a demanda de potência de seu motor elétrico, apontado por Beber (2020), o conjunto de baterias do veículo Fórmula Cem é composta por células de Lítio-Polímero de formato prismático. São cinco *packs* ligados em série, compostos por 4 conjuntos ligados em série, contendo 6 células ligadas em paralelo. Cada célula possui uma tensão máxima de 4,2 V e capacidade de 10 A.h, dessa forma cada *pack* possui uma tensão máxima de 16,4 V e capacidade de 60 A.h.

Assim, em uma configuração de 20s6p é possível fornecer uma tensão máxima de 82V, e ainda, conforme Beber (2020), é alcançado uma corrente de descarga máxima de até 300 A, atingindo 24,6 kW.

Figura 3 - Banco de bateria da equipe Fórmula Cem



Fonte: Fórmula Cem (2019).

2.1.3 Inversor trifásico

Os inversores são circuitos eletrônicos que possibilitam a conversão de potência de uma fonte de corrente contínua (CC) para uma carga de corrente alternada (CA), com amplitude e frequência controladas (Hart, 2011). O inversor utilizado para controlar o motor da equipe é o CVW300.

Figura 4 - Inversor utilizado pela equipe Fórmula Cem



Fonte: Manual CVW300.

De acordo com o site comercial da WEG, os inversores de frequência para tração elétrica CVW300 são direcionados para o mercado de veículos elétricos, sendo específicos para o controle de motores de indução trifásicos de baixa tensão.

Permitindo aplicações com tensões de baterias de 24 a 72V. Contudo, ao longo da descrição do inversor CVW300, é especificado as aplicações do respectivo inversor, as quais são aplicações de transporte interno, empilhadeiras e microtratores. Desse modo, nota-se que a aplicação deste inversor não visa o desempenho veicular elétrico, e sim o desempenho funcional e operacional para transporte de pessoas ou cargas. Dessa maneira, a equipe busca alavancar seu desempenho competitivo através de um sistema motriz que seja desenvolvido para o ambiente o qual será exposto.

2.2 TOPOLOGIA DE CONVERSORES

Desde os anos 60, várias topologias de conversores foram propostas, diversas configurações foram avaliadas e modelos foram apresentados. Cada uma destas topologias apresenta seus méritos e limitações para uma dada aplicação (VIDOR et al., 2017a).

2.2.1 Conversores CC-CC

Conversores CC-CC, ou conversores de corrente contínua, são dispositivos eletrônicos essenciais em diversas aplicações que requerem a conversão de uma tensão CC para outro nível de tensão CC. Eles desempenham um papel crucial em sistemas de energia elétrica e eletrônica, incluindo fontes de alimentação, sistemas de potência em veículos elétricos e circuitos de telecomunicações.

O principal objetivo dos conversores CC-CC é ajustar a tensão de saída para que ela atenda às necessidades específicas de um sistema ou dispositivo. Para isso, os conversores CC-CC podem aumentar (elevadores) ou diminuir (abaixadores) a tensão de entrada, dependendo da configuração e do tipo de conversor. O processo de conversão é realizado por meio de circuitos eletrônicos que utilizam componentes como indutores, capacitores, diodos e dispositivos chaveadores, como Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFETS), Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBTs) e/ou Transistores.

Para realizar a conversão de um nível CC, para um outro nível CC, Hart (2011) apresenta dois grupos de conversores. O primeiro grupo está relacionado a reguladores lineares (amplificadores), e o segundo grupo está relacionado a

conversores chaveados, os quais serão apresentados na sequência, respectivamente.

2.2.1.1 Amplificadores lineares

Um amplificador linear é um dispositivo eletrônico projetado para amplificar um sinal de entrada de forma proporcional e linear em relação ao sinal de saída, garantindo alta fidelidade e mínima distorção. Caracteriza-se por apresentar um elevado ganho diferencial, que relaciona a tensão de saída à tensão de entrada, e utiliza um sistema de realimentação negativa proporcional para assegurar a precisão do sinal amplificado. Esse mecanismo de realimentação permite a reprodução fiel dos sinais de referência na saída, minimizando erros e atenuando perturbações externas. Além disso, tal configuração compensa variações paramétricas decorrentes de fatores ambientais, como flutuações de temperatura e umidade, assegurando estabilidade e robustez na resposta do circuito.

A alta taxa de fidelidade na amplificação de sinais, característica dos amplificadores lineares, é amplamente valorizada em aplicações que demandam precisão, como instrumentação, sistemas de áudio de alta qualidade e equipamentos médicos. Essa fidelidade se deve à capacidade desses dispositivos de amplificar sinais com mínima distorção, reproduzindo fielmente a forma de onda de entrada na saída. Contudo, essa vantagem vem acompanhada de uma limitação significativa: a eficiência energética.

Os amplificadores lineares operam de forma contínua, dissipando uma parcela considerável de energia como calor, independentemente da potência real entregue à carga. Essa característica resulta de sua arquitetura, na qual os dispositivos ativos, como transistores, operam em uma faixa linear, onde a corrente conduzida não é interrompida e varia continuamente com o sinal de entrada.

Em contrapartida, os conversores chaveados, apresentam uma eficiência muito maior. Isso ocorre porque os dispositivos semicondutores nesses sistemas alternam entre os estados de condução (ligado) e bloqueio (desligado), minimizando as perdas de potência.

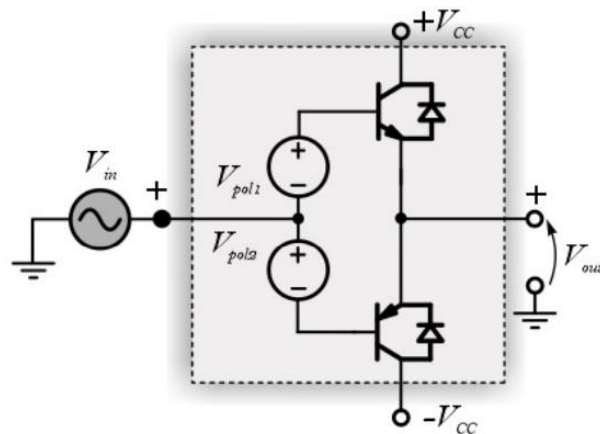
Como discutido por Rigo (2020), essa diferença torna os conversores chaveados preferíveis em aplicações onde a eficiência energética é uma prioridade, especialmente em sistemas de alta potência. Por outro lado, a eficiência relativamente

baixa dos amplificadores lineares os torna menos adequados para essas aplicações, apesar de sua superioridade em fidelidade e baixa distorção do sinal.

Os amplificadores clássicos mais utilizados, como o Classe A e Classe AB, apresentam eficiências entre 25% e 78,6%, mas estes valores teóricos são reduzidos quando se consideram as polarizações e perdas de todo o circuito amplificador. É comum encontrar eficiências entre 50% e 70% nos amplificadores Classe AB de mercado.

Desse modo, de maneira isolada, amplificadores lineares não são utilizados como conversores, e sim, incorporados junto a estruturas de conversores chaveados, visando unir a alta taxa de fidelidade do sinal sintetizado, as vantagens que os conversores chaveados já compreendem. O esquemático de um amplificador linear classe AB é apresentado na figura 5.

Figura 5 - Amplificador classe AB



Fonte: Adaptador de Vidor et al. (2017b).

2.2.1.2 Conversores chaveados CC-CC

Um conversor CC-CC converte diretamente CC em CC, e é chamado apenas de “conversor CC”. Um conversor CC pode ser considerado o equivalente CC de um transformador CA com uma relação de espiras continuamente variável. Assim como o transformador, ele pode ser usado para baixar ou elevar uma fonte de tensão CC. Eles propiciam um controle uniforme da tensão de saída, alta eficiência e uma resposta dinâmica rápida. Os conversores CC são utilizados em reguladores de tensão CC, e também em conjunto com um indutor para gerar uma fonte de corrente CC, em especial para os inversores de fonte de corrente (RASHID, 2011).

O princípio de um conversor chaveado, consiste na comutação dos estados abertos e fechados de uma chave. A região de operação do dispositivo quando este atua como uma chave fechada do coletor para o emissor é chamada de região de saturação, já quando atua em sua região de corte, atua como uma chave aberta, impedindo a passagem de corrente entre o coletor e o emissor (Hart, 2011).

A forma de onda da tensão de saída aplicada à carga em conversores chaveados é, tipicamente, quadrada. No entanto, esse formato não é adequado para a maioria das aplicações, exigindo o uso de filtros, geralmente do tipo LC, para suavizar as transições entre os estados on e off do dispositivo de chaveamento. Esses filtros têm como objetivo reduzir as componentes de alta frequência e aproximar a tensão de saída de uma forma de onda contínua e estável.

Para minimizar as ondulações na tensão de saída, é comum aumentar os valores de indutância e capacitância do filtro. No entanto, essa abordagem apresenta consequências indesejáveis, como a redução da resposta dinâmica do sistema. Um aumento excessivo dos valores dos componentes do filtro pode tornar o sistema mais lento na resposta a mudanças rápidas de carga ou de condições operacionais, prejudicando o desempenho geral.

Essas limitações impõem desafios significativos aos projetistas, que precisam equilibrar a atenuação das ondulações e o tempo de resposta do sistema. Desse modo, torna-se essencial adotar soluções que mitiguem os impactos desses filtros na dinâmica do sistema, como o desenvolvimento de topologias avançadas, técnicas de controle robustas e estratégias para redução de ruídos eletromagnéticos. Conforme observado por Rigo (2020), a complexidade associada a esses fatores demanda um cuidado criterioso no projeto de filtros e na modelagem de conversores, destacando-se como uma das principais dificuldades no design de sistemas chaveados.

Diante desses desafios, estratégias inovadoras têm sido desenvolvidas para otimizar o desempenho de conversores chaveados, especialmente em aplicações que demandam maior potência e eficiência. Uma dessas abordagens é a utilização de configurações com múltiplos conversores operando em paralelo. Essa técnica permite não apenas a mitigação de ondulações e ruídos no sinal de saída, mas também oferece uma solução robusta para ampliar a capacidade de potência do sistema, distribuindo as demandas entre diferentes módulos.

2.2.1.3 Conversores em paralelo

Conforme apresentado por Rigo (2020), a utilização de conversores em paralelo é abordada geralmente em aplicações onde ocorre a necessidade de aumentar a potência de carga.

A associação de conversores em paralelo proporciona várias vantagens, como a flexibilização na operação dos braços inversores de forma independente, aumenta a confiabilidade do sistema, reduz os estresses de corrente sobre cada conjunto conversor, permite a adição de novos braços conversores para aumentar a potência total do sistema, aumenta eficiência e reduz a ondulação no sinal de saída (WU *et al.*, 2000).

No entanto, alguns desafios precisam ser superados para a implementação eficaz do paralelismo, como garantir a distribuição adequada das correntes, regular a tensão de saída, atender à dinâmica exigida para a tensão sob diferentes cargas e evitar a corrente circulante entre os braços inversores para maximizar a eficiência (TALEBI *et al.*, 2009).

Devido a característica modular, existe a possibilidade de em cada módulo conversor em paralelo, utilizar uma tecnologia de chaveamento diferente, como MOSFETS, IGBT, GAN, etc., contudo, a literatura apresenta pouco avanço quanto ao uso de diferentes tecnologias de chaveamento pois, as associações paralelas são realizadas com módulos idênticos que satisfazem requisitos da indústria na redução dos custos em razão do volume produzido e configuração da linha de produção.

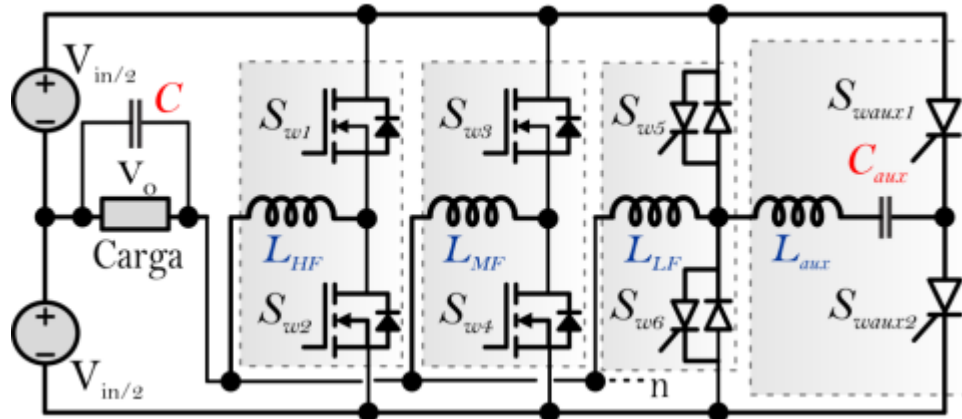
Desse modo, apesar dessa vantagem, a modularidade ou padronização traz desvantagens no que se refere a perdas, dinâmica de saída ou potências atendidas, pois os dispositivos semicondutores que suportam altas potências operam em baixas frequências e dispositivos que operam em altas frequências não suportam potências elevadas. Assim, a dinâmica de tensão de saída apresentada por dispositivos que operam em baixas frequências é penalizada ou a potência manipulada por dispositivos de altas frequências é baixa quando comparadas a módulos de alta potência (MANJREKAR *et al.*, 2000).

Desse modo, associar conversores com diferentes tecnologias de semicondutores de potência apresentam flexibilidades a fim de atender e vencer os desafios dessas associações, em especial no que se refere à dinâmica exigida na saída e a regulação de tensão (RIGO, 2020). Nesse caso, é comum haver um

conversor principal que processa quase toda a energia e outro auxiliar cujo objetivo é minimizar ondulações e melhorar a qualidade do sinal de saída (SILVA *et al.*, 2015).

Uma associação de inversores meia-ponte em paralelo que faz uso de diferentes dispositivos de chaveamento é apresentado na figura 6.

Figura 6 - Inversor meia-ponte com estrutura em paralelo



Fonte: Adaptado de Rigo (2020).

A figura acima trata da associação de inversores meia-ponte em paralelo, utilizando diferentes dispositivos de chaveamento. Nessa topologia, os conversores são classificados de acordo com as frequências de operação (baixa, média e alta frequência) e associados de forma a otimizar o processamento de potência. Seguindo os princípios de SILVA *et al.* (2015), Rigo (2020) propôs um conversor principal (de baixa frequência) que é responsável por processar a maior parte da energia, enquanto os módulos de média e alta frequência desempenham papéis auxiliares, como a redução de ondulações de corrente e a melhoria da qualidade do sinal de saída.

Os conversores associados em paralelo com diferentes tipos de dispositivos semicondutores têm como objetivo atingir potências elevadas em diferentes tipos de cargas. Porém, conversores chaveados possuem filtro de saída de 2º ordem e a resposta transitória não é rápida devido a grandes filtros de saída para reduzir as ondulações.

Percebe-se que quanto mais braços conversores, mais desafiador torna-se o controle de chaveamento de cada dispositivo semicondutor, desse modo, segundo Talebi *et al.* (2009), para que a operação de inversores conectados em paralelo seja adequada, é necessário um laço de controle de tensão e um laço de controle de corrente. O laço de controle e distribuição de corrente é para evitar correntes

desbalanceadas na saída dos conversores. Geralmente, o projeto de controle de um conversor modular como esse deve garantir a distribuição adequada e igual de corrente entre os módulos conversores, regulação adequada da tensão de saída e compatibilidade com vários tipos de cargas.

Uma abordagem eficaz para mitigar esse desafio consiste no desenvolvimento de estruturas híbridas, integrando a topologia de um conversor chaveado com um amplificador linear. Essa configuração visa aprimorar a resposta transitória do sistema, proporcionando maior precisão no controle de tensão e corrente aplicados à carga, além de otimizar o desempenho dinâmico do conjunto.

Dessa forma, ao buscar soluções que combinem alta eficiência com fidelidade no controle de tensão e corrente, destacam-se as abordagens híbridas, que integram as vantagens de conversores chaveados e amplificadores lineares. Essa configuração híbrida, explorada em no próximo capítulo, apresenta-se como uma estratégia promissora para mitigar os desafios associados ao controle e operação de sistemas de potência avançados, oferecendo uma alternativa eficaz para atender às demandas de precisão e desempenho em diversas aplicações.

2.3 ASSOCIAÇÃO DE FONTES

Denominado nos estudos de Rigo (2020), conversores híbridos são dispositivos eletrônicos que compreendem a topologia de um amplificador linear e de um conversor chaveado, de modo que, o amplificador linear atua como uma fonte de tensão e o conversor chaveado atua como uma fonte de corrente.

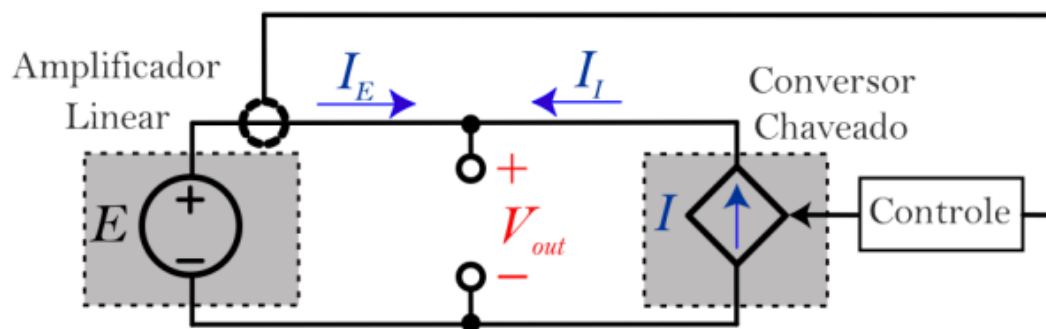
Os conversores híbridos, também denominados de conversores Chaveado-Linear, têm por objetivo alcançar a alta fidelidade do sinal sintetizado sobre o amplificador linear, resposta dinâmica rápida, interferências eletromagnéticas baixas e alta eficiência. Nas estruturas híbridas, o conversor linear é colocado em uma configuração que cancela o ruído na conexão com a carga, enquanto os conversores chaveados gerenciam a potência dissipada sobre o conversor linear, controlando a tensão ou a corrente sobre ele (VIDOR *et al.*, 2017b).

Rosa (2020), apresentou que, os conversores e amplificadores, pelo fato de processarem energia, podem ser definidos como fontes de tensão ou corrente. As associações de conversores (Chaveado-Linear) são similares a associação de fontes de tensão e corrente, sendo assim, podem ser analisados desta forma, modelando-os

como fontes. Desse modo, modelar um conversor chaveado-linear, de modo a empregá-lo como uma fonte de tensão e corrente, permite aumentar a capacidade de fornecimento de energia ou potência, melhorar a qualidade do sinal fornecido ou ainda, limitar sinais indesejados, como visto anteriormente na evolução dos conversores.

Um conversor híbrido que pode ser modelado como uma fonte de tensão e corrente é apresentado na figura 7.

Figura 7 - Estrutura conversor híbrido



Fonte: Adaptado de Rigo (2020).

A configuração apresentada na figura 7 demonstra a associação entre um conversor chaveado e um amplificador linear, ressaltando a complementaridade dessas duas tecnologias. Na figura, o conversor chaveado opera como a principal fonte de potência, enquanto o amplificador linear assume a função de corrigir erros de tensão e garantir uma resposta precisa às dinâmicas do sistema. Essa abordagem permite modelar o circuito como uma associação de fontes, facilitando sua análise e projeto de forma integrada, com ênfase na qualidade do sinal de saída e na distribuição otimizada das correntes entre os componentes.

Geralmente, os conversores lineares e os chaveados, são semelhantes em seu desenvolvimento e são capazes de gerenciar e/ou produzir os mesmos sinais (contínuos ou alternados em baixas ou médias frequências), sendo que para os conversores lineares ocorre de forma dissipativa (desvantagem no caso de conversores de alta potência), enquanto os conversores chaveados com baixa dissipação, mas com resposta dinâmica limitada (desvantagem nos casos de alta dinâmica de carga).

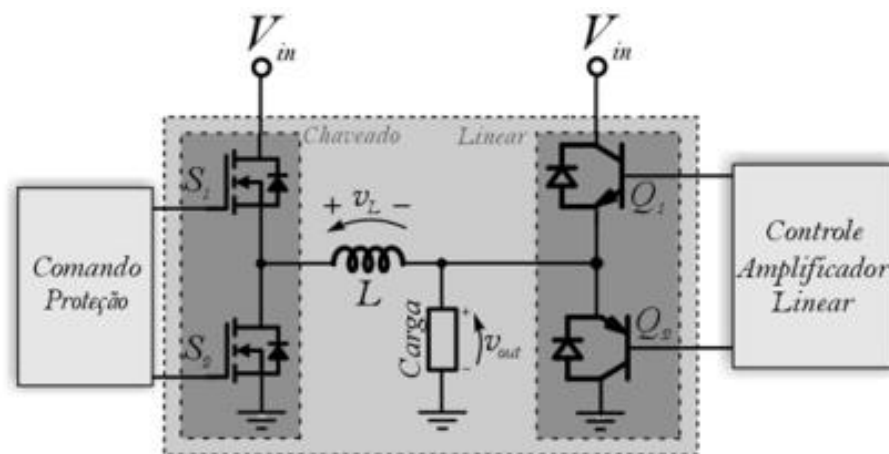
Outro ponto importante em relação ao emprego de conversores híbridos quanto empregados como fontes, fora apontado por Vidor *et al.* (2017b), onde um aspecto a ser salientado em algumas dessas associações, é a possibilidade de reduzir os filtros de saída com o aumento da frequência, especialmente nas associações em paralelo, tendo a possibilidade de o capacitor de filtro ser suprimido. Em sua publicação sobre conversores CC-CA híbridos em série e paralelo, foi observado excelentes respostas dinâmicas quando a carga reduz sua demanda de corrente, pois há um regulador linear que pode desviar o excesso de corrente do conversor chaveado durante o transitório.

Desse modo, a associação de um amplificador linear (classe AB), permite que este imponha correntes positivas e negativas em sua saída. Desta forma, tanto nos transitórios de aumento da corrente de carga quanto em redução da demanda de corrente de carga, existem recursos nos circuitos dos amplificadores lineares para suprir as diferenças de corrente entre carga e conversor chaveado, mantendo a tensão de saída no valor desejado. Portanto, estes circuitos amplificadores permitem substituir a função do capacitor de filtro de saída dos conversores.

Rosa (2019), apresentou um conversor Buck em paralelo com um amplificador linear classe AB. O conversor Buck está com um filtro de primeira ordem na saída, ou seja, sem o capacitor, e o amplificador linear é alimentado com toda tensão da fonte de entrada, mas processa apenas a corrente de ondulação, dissipando pouca energia.

Na Figura 8 é apresentado a associação de um conversor Buck com um amplificador linear classe AB em paralelo, tal como proposto por Rosa (2019).

Figura 8 - Associação do conversor Buck a um amplificador linear em paralelo



Fonte: Adaptado de Rosa (2019).

Nessa configuração, o amplificador linear, alimentado diretamente pela fonte de entrada, é capaz de impor correntes positivas e negativas em sua saída, permitindo a compensação de diferenças entre a demanda de corrente da carga e o fornecimento do conversor chaveado. Essa característica possibilita a manutenção da tensão de saída no valor desejado durante os transitórios, eliminando a necessidade de um capacitor de filtro convencional na saída do conversor. O conversor Buck, por sua vez, opera com um filtro de primeira ordem, processando a maior parte da energia, enquanto o amplificador linear se responsabiliza pela corrente de ondulação, reduzindo perdas e melhorando a resposta dinâmica do sistema.

2.4 ASSOCIAÇÃO DE FONTES COM MÓDULOS CONVERSORES EM PARALELO

Apresentado que a combinação de um conversor chaveado com um amplificador linear pode ser configurado por uma fonte de tensão, Rosa (2019), em seus estudos, apresentou um conversor híbrido compreendido por um braço conversor composto por um conversor Buck em paralelo com um amplificador linear classe AB.

Contudo, em aplicações de maiores potências, o modelo proposto por Rosa (2019) não é aplicável, visto que compreende apenas um módulo conversor chaveado, o qual é responsável por praticamente toda a energia do sistema. Assim, visando aumentar o fornecimento de potência e reduzir as ondulações sobre uma carga, foram apresentadas configurações construtivas de conversores híbridos, como de modo que possibilitar a inserção de braços de conversores chaveados em paralelo, aumentando a capacidade de prover corrente a uma carga.

Desse modo, os conversores chaveados-lineares em paralelo apresentam diversas outras vantagens, sendo possível destacar que eles possibilitam a implementação de múltiplos braços conversores de maneira independente, tornando o sistema mais flexível, sendo possível adicionar novos braços para aumentar a potência do sistema (RIGO, 2020).

A associação de múltiplos módulos conversores em paralelo com a associação de um amplificador linear foi apresentada por Vidor *et al* (2019), onde fora modelado um conversor híbrido, com três inversores meia-ponte em paralelo com um amplificador linear AB. Essa configuração permitiu eliminar o capacitor de saída, melhorando a eficiência e reduzindo o espaço necessário. Além disso, esse sistema

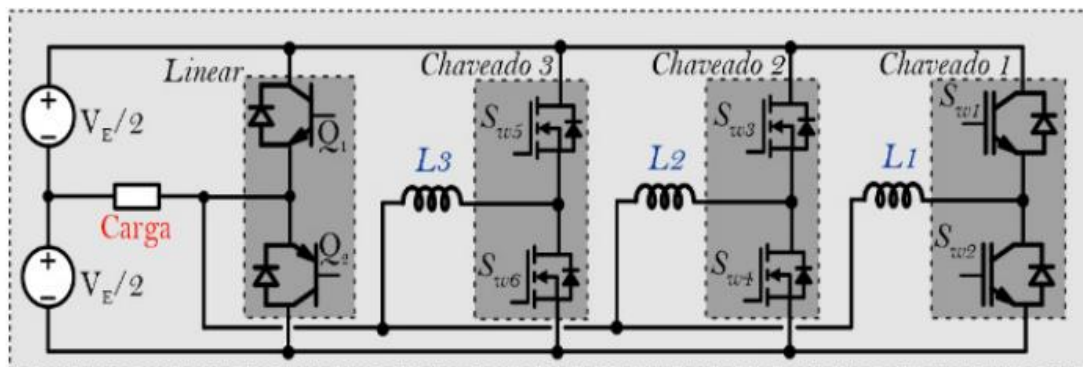
híbrido pode ser adaptado para combinar diferentes tecnologias, operar em diversas frequências e potências variadas.

No contexto do estudo apresentado por Vidor *et al* (2019), determinou-se que o primeiro inversor meia-ponte operaria na menor frequência e seria responsável por prover a maior parte da corrente de saída. Os outros conversores foram dimensionados para operar em frequências média e altas de chaveamento, o que reduziu significativamente a ondulação da tensão de saída ao injetar corrente em fase oposta ao primeiro conversor.

O amplificador linear desempenha um papel fundamental na geração da forma de onda e opera com baixa corrente para minimizar perdas. Além de atuar na eliminação da ondulação da tensão de saída, ele melhora significativamente a resposta dinâmica do sistema, especialmente durante transitórios de carga.

A associação de inversores meia-pontes com um amplificador linear em paralelo é apresentada na figura 9, visando distribuir a corrente entre os módulos conversores em paralelo, e sintetizar o sinal de saída através do amplificador linear.

Figura 9 - Associação de inversores meia-ponte com amplificador linear em paralelo



Fonte: Adaptado de Vidor *et al.* (2019)

2.5 GATE-DRIVES

Os circuitos de acionamento das chaves de potência, comumente chamados de *gate drivers*, operam como uma interface entre o circuito de comando e o circuito de potência do conversor, amplificando os sinais gerados pelo processador para acionamento das chaves. Assim, apresentam a função primária de comutar as chaves entre os estados ligado e desligado (MOHAN, 2012). Desse modo, para acionar cada

módulo chaveado de um conversor híbrido, é necessário um gate-driver para realizar o controle de comutação das chaves.

No estado ligado, o *gate driver* deve ser capaz de fornecer a tensão adequada ao dispositivo chaveador de modo a mantê-lo na região de operação onde as perdas em condução são minimizadas, enquanto no estado deligado, deve ser capaz de garantir que as capacitâncias parasitas e eventuais ruídos no circuito não provoquem o acionamento equivocado da mesma (MOHAN, 2012).

Apresentado na figura 10, um conversor com estrutura híbrida, para cada braço em paralelo, compreende um dispositivo chaveador que está em contato com a tensão positiva e o outro que está em contato com a tensão de referência zero, ou terra, ou tensão negativa, conforme o caso.

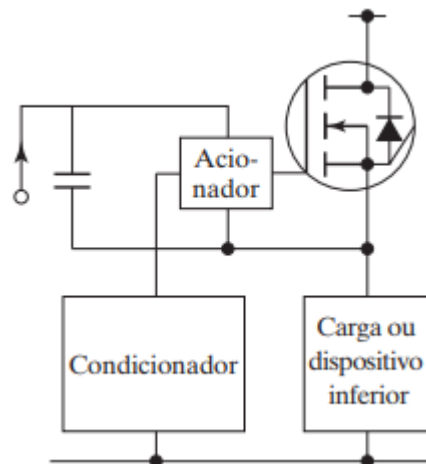
Apresentado por Hart (2011), no livro Power Electronics, quando um conversor apresenta esse tipo de topologia, este compreende as chamadas chaves *low-side* e *high-side*.

As chaves *low-side* do conversor possuem o *source* (ou emissor para IGBT) referenciado ao referencial zero (ou terra) do circuito. Assim, o acionamento do *low-side* é realizado a partir da aplicação de uma tensão no *gate* maior que a tensão limiar da chave. Contudo, as capacitâncias parasitas devem ser carregadas no acionamento da chave e descarregadas em seu desligamento, assim, o circuito *gate driver* deve permitir o fluxo rápido de corrente em aplicações de alta frequência. Nas chaves *high-side* do conversor, os terminais de *source* ou emissor não são referenciados ao referencial zero (ou terra), o que implica que a tensão aplicada ao *gate* esteja flutuando em relação ao terra do circuito. Assim, o *gate driver* deve fornecer uma tensão ao *gate* que possa ser referenciada ao ponto flutuante onde se encontra o *source* da chave.

Assim, para contornar a geração de pontos flutuantes, uma das técnicas empregadas técnica de *bootstrap*, que consiste em um circuito simples composto por um diodo e um capacitor para o armazenamento da tensão a ser aplicada ao *gate* da chave no *high-side* (RASHID, 2011).

Na figura 10 é apresentada o circuito que corresponde ao acionamento de um MOSFET com o uso de um capacitor de *bootstrap*.

Figura 10 - Amarração de Bootstrap



Fonte: Rashid (2011)

Na figura apresentada acima, o capacitor de *bootstrap* armazena energia quando a chave *low-side* está ligada e depois fornece a tensão necessária para o gate da chave *high-side*, garantindo sua condução.

O dimensionamento do capacitor de *bootstrap* depende das condições de operação do conversor. A Equação 1 é utilizada para dimensionar o valor mínimo da capacitância a ser selecionada para o circuito *gate driver* (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2007).

$$C > \frac{2(2Q_g + \frac{I_{qbdsm} \max}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f})}{V_{cc} - V_f - V_{ls} - V_{min}} \quad (1)$$

De maneira simplificada, de acordo com a *Texas Instruments em Bootstrap Circuitry Selection for Half Bridge Configurations*, o capacitor de *bootstrap* deve ser dimensionado para ter energia suficiente para acionar a porta do MOSFET de *high-side* sem ser descarregado em mais de 10%. Este capacitor *bootstrap* deve ser pelo menos 10 vezes maior do que a capacitância da porta do FET de *high-side*.

Desse modo, a capacitância do *gate* pode ser determinada como:

$$C_g = \frac{Q_g}{VQ_{1g}} \quad (2)$$

Onde:

Q_G : datasheet do dispositivo chaveador

$V_{Q_{1G}}$: $V_{CC} - V$ Diodo de *bootstrap*

2.6 CONTROLE DE CONVERSORES HÍBRIDOS PARALELO COMO FONTES

O maior desafio no controle de conversores híbridos que compreendem um conjunto de conversores chaveados em paralelo é a distribuição de corrente entre cada módulo.

Iniciado por Vidor *et al.* (2019), fora proposto um modelo de controle de conversores híbridos paralelo, que pode ser projetado de forma a associar diferentes tecnologias, diferentes frequências de operação e/ou diferentes potências. Estabeleceu-se que o primeiro inversor meia-ponte operaria com a menor frequência e seria responsável por quase a totalidade da corrente de saída. Portanto, tal módulo conversor seria o que mais apresentaria ruídos.

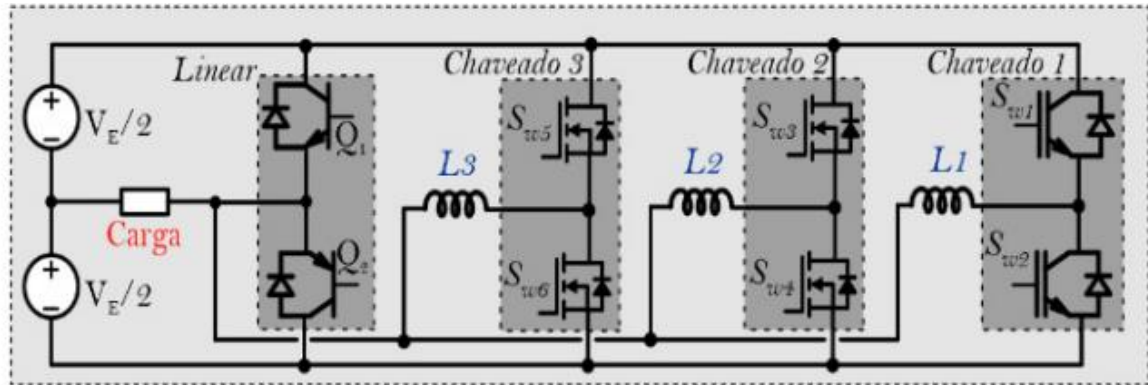
Desse modo, para preencher as lacunas do ruído apresentados pelo conversor principal, os outros conversores em paralelo foram dimensionados de forma a operar com médias e altas frequências de chaveamento e para reduzirem a ondulação da tensão de saída, injetando corrente em oposição de fase ao primeiro conversor.

Já o amplificador linear foi responsável pela forma de onda gerada e operar com baixa corrente de forma a minimizar as perdas. O amplificador linear, além de não gerar qualquer ondulação na tensão de saída, pode atuar nos transitórios de carga melhorando significativamente a resposta dinâmica do conjunto.

Nas figuras 11 e 12, apresentadas na sequência, é ilustrado o contexto apresentado acima. Observa-se o conversor híbrido proposto por Vidor *et al.* (2019), combina diferentes módulos para otimizar o desempenho. O sistema é composto por um amplificador linear e três módulos chaveados conectados em paralelo e associados a indutores. O amplificador linear, operando com baixa corrente, é responsável por gerar a forma de onda e minimizar as perdas, ao mesmo tempo em que atua na compensação de ondulações na tensão de saída e melhora a resposta dinâmica durante os transitórios de carga. O primeiro módulo chaveado, opera em alta frequência para reduzir a ondulação da tensão, injetando corrente em oposição de fase. O segundo e o terceiro módulos chaveados desempenham funções

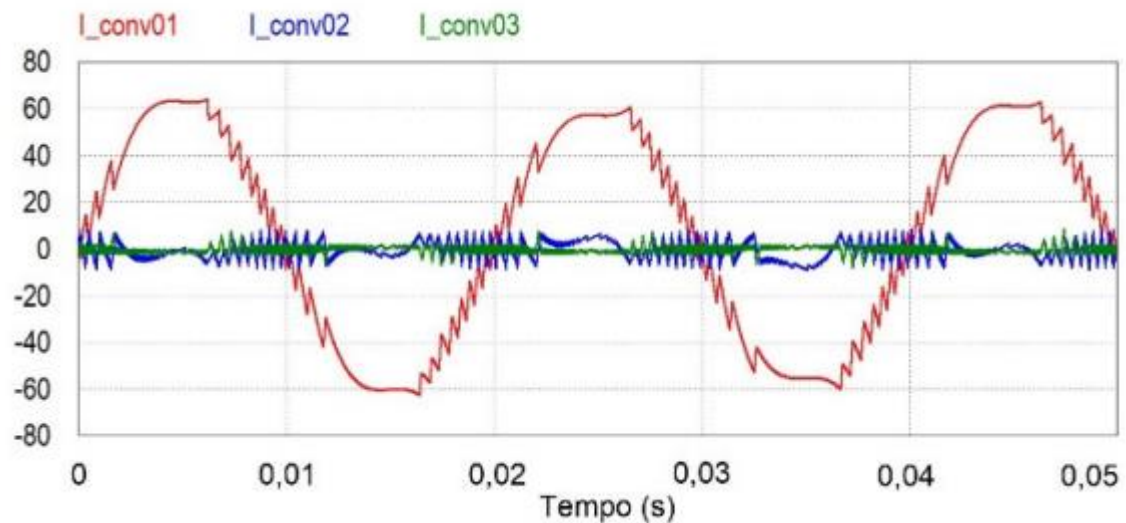
complementares, operando com frequências intermediárias para garantir a redução adicional de ruídos.

Figura 11 - Conversor híbrido proposto por Vidor *et al.* (2019)



Fonte: Adaptador de Vidor *et al.* (2019).

Figura 12 - Corrente em cada módulo conversor em paralelo



Fonte: Adaptador de Vidor *et al.* (2019).

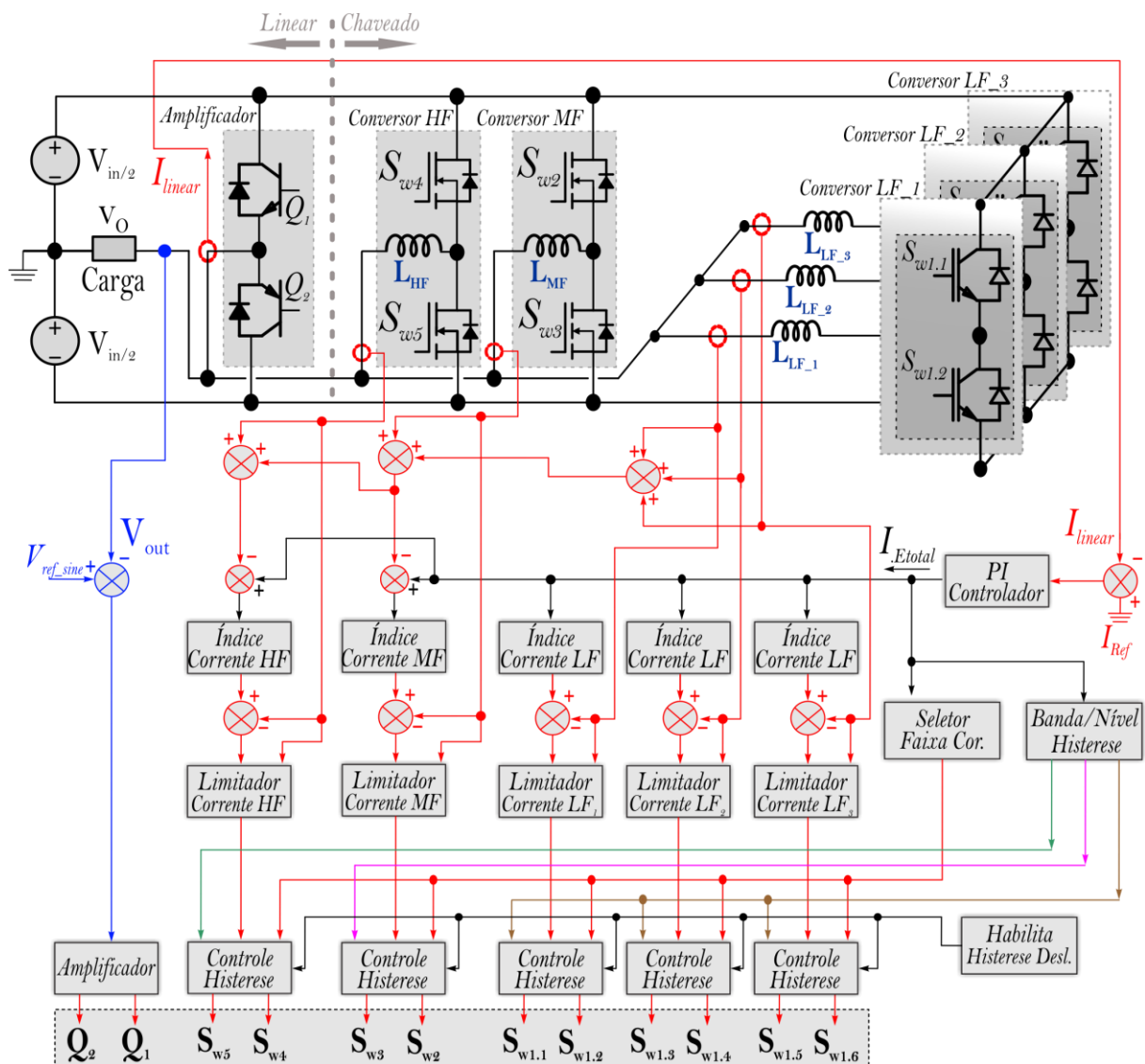
Na figura 12, apresentada acima, as correntes dos braços inversores são apresentadas. Observa-se que as frequências de chaveamento são diferentes e que o segundo e terceiro conversores atuam apenas em baixas correntes de forma a reduzir a ondulação desta na saída do conjunto.

Em continuação aos estudos de Vidor *et al.* (2019), Rigo (2020), propôs um modelo de controle de conversores híbridos paralelos. Em sua dissertação, fora modelado um conversor híbrido paralelo, com três módulos de conversores

chaveados, divididos em conversor chaveado de alta frequência, média frequência e baixa frequência.

A estrutura de controle elaborada por Rigo (2020), fora elaborada a partir da premissa que os conversores chaveados fornecem a corrente demandada e o amplificador linear sintetiza a tensão de saída com erro desprezível a referência, seguindo as premissas apontadas por Vidor *et al.* (2019). Na Figura 13 é apresentada a estrutura do conversor e o diagrama em blocos do controle.

Figura 13 - Diagrama de blocos de um conversor híbrido



Fonte: Adaptado de Rigo (2020).

Desse modo, seguindo a metodologia apresentado por Vidor *et al.* (2019) e Rigo (2020), para estabelecer um controle de um conversor híbrido paralelo é preciso definir os seguintes requisitos:

- minimizar ou eliminar a corrente de carga sobre o amplificador linear;
- impor e dividir as correntes mais elevadas nos conversores de mais baixafrequência, cujos os dispositivos semicondutores operam com correntes mais elevadas;
- dividir as correntes nos conversores associados em paralelo de mesma característica, a fim de atingir potências mais elevadas e reduzir a capacidade de manipulação de potência dos dispositivos semicondutores;
- permitir e/ou projetar os conversores de média e alta frequência para que assumam correntes em circunstâncias de sobrecarga, até seus limites definidos (limitadores de corrente), conforme necessidade ou característica de cada projeto;
- utilizar os conversores de alta frequência para minimizar a ondulação do sinal e reduzir as perdas no amplificador linear;
- minimizar e/ou eliminar as correntes circulantes entre conversores chaveados, para reduzir as perdas da estrutura;
- Implementar a seleção da faixa de corrente que cada conversor chaveado irá entrar em operação (índices/faixas de corrente);
- implementar a banda de histerese de cada conversor conforme a capacidade de potência, frequência, indutância e perdas; e
- limitar a corrente no amplificador linear para transitórios e degraus de carga, conforme a necessidade de cada projeto.

Assim, será um dos objetivos do Capítulo “3. DESENVOLVIMENTO”, estabelecer os parâmetros para os requisitos apresentados, de modo que os objetivos do presente estudo sejam cumpridos.

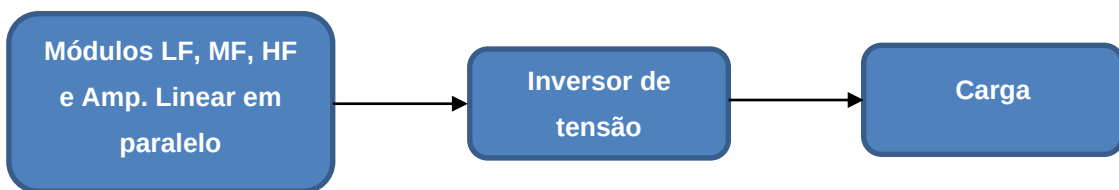
3. DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo visa apresentar os detalhes no desenvolvimento do projeto de um conversor, empregado como fonte de tensão, que visa atender à demanda de potência de todas as equipes de competição da UFSC Joinville. Além disso, dado que a equipe Fórmula Cem é a equipe que mais demanda potência, tal equipe será tomada como referência para o desenvolvimento do projeto.

Ressalta-se que, obviamente, uma fonte que atenda à demanda de potência da Fórmula Cem atenderá também às necessidades das demais equipes. Contudo, uma parte essencial do desenvolvimento do projeto proposto é encontrar a topologia de uma fonte que possa atender à demanda de todas as equipes da UFSC, e que, por meio de sua característica modular, acrescentando módulos conversores em paralelo, também atenda a demanda de potência da equipe Fórmula Cem.

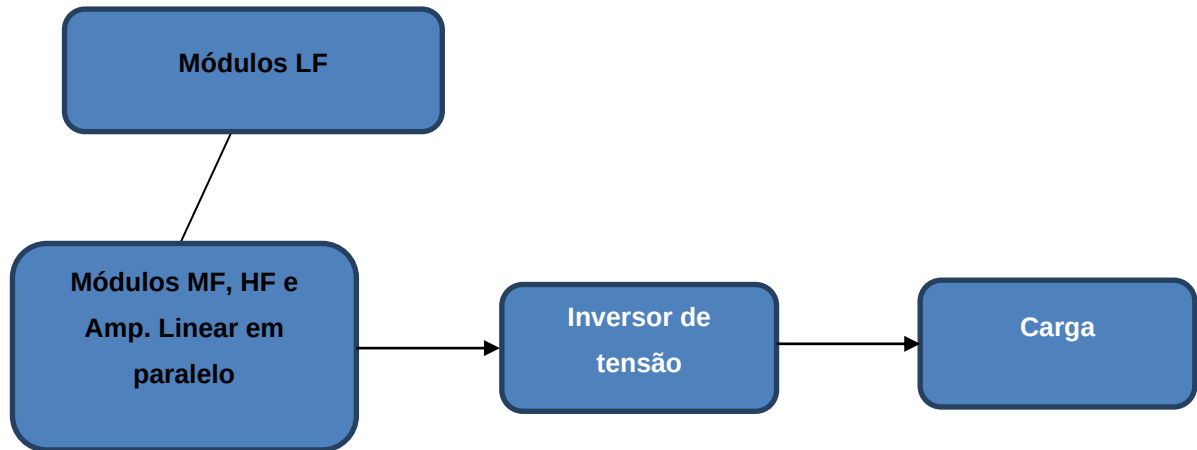
As figuras 14 e 15 é apresentado o emprego do conversor proposto, para todas as equipes do campus Joinville, com exceção da equipe Fórmula, que, devido a sua maior demanda de potência, exige a associação de mais de um módulo conversor de baixa frequência, para a grande quantidade de corrente que passa pelo sistema.

Figura 14 - Aplicação do conversor CC-CC proposto como fonte



Fonte: O autor (2024).

Figura 15 - Conversor proposto como fonte para a equipe Fórmula Cem



Fonte: O autor (2024).

3.1 REQUISITOS DE PROJETO

O motor atual da equipe Fórmula Cem, demanda as especificações conforme a tabela 3.

Tabela 3 - Sistema de tração equipe Fórmula Cem

Máxima tensão do sistema de tração	84 Vcc
Tensão nominal	74 Vcc
Capacidade dos packs de baterias	4,4 kWh
Potência do motor	6 kW

Fonte: O autor (2024).

Para estabelecer os requisitos para o projeto do conversor proposto, é preciso ter estabelecido a demanda de potência e corrente, pois tais requisitos irão influenciar o dimensionamento dos componentes. A figura 16 apresenta as especificações do motor WEG utilizado pela equipe:

Figura 16 - Especificações motor WEG

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS			
Carcaça	: 112	Regime de serviço	: -
Potência nominal	: 6 kW	Fator de serviço	: 1,00
Potência máxima	: 20 kW	Categoria	: N
Rotação nominal	: 4400 rpm	Grau de proteção	: IP55
Rotação máxima	: 9000 rpm	Torque nominal	: 13 Nm
Tensão nominal	: 51 Vca	Torque máximo	: 42,4 Nm
Corrente nominal	: 118 A	Resfriamento	: ar
Ip/In	: -	Massa	: 17 kg

Fonte: Fórmula Cem (2017).

Sabendo os valores de tensão, corrente e potência nominais, pode-se iniciar o dimensionamento do conversor proposto.

3.2 MÓDULOS CONVERSORES CHAVEADOS

Como apontado, o objetivo deste trabalho é desenvolver um conversor chaveado-linear, o qual irá ser empregado como uma fonte de tensão que atenda a demanda de potência das equipes da UFSC.

Rigo (2020), em seu trabalho apontou que um conversor híbrido chaveado-linear pode ser composto por três principais módulos de conversores chaveados, baixa frequência, média frequência, e alta frequência, junto ao amplificador linear.

Além disso, Rigo (2020) ainda apontou que conversores de média e alta frequências não deveriam assumir corrente em regime permanente em razão das perdas de comutação e que, a divisão de toda a potência de carga deveria ser destinada aos conversores chaveados de baixa frequência. Desse modo, é permitido aos conversores de média e de alta frequência que apenas operem com corrente nas dinâmicas exigidas pela carga ou em caso de falha de algum módulo. Nestas situações os conversores de média e alta frequência operam com correntes médias próximas a zero em regime permanente e assumem correntes até o limite estabelecido nas dinâmicas ou falhas.

Desse modo, precisa-se estabelecer a quantidade de conversores chaveados em paralelo que irão compor o módulo de baixa frequência, visando atender a equipe Fórmula Cem, em cenário atual e futuro.

3.2.1 Módulos conversores chaveados de baixa frequência

A metodologia do desenvolvimento do projeto inicia com a escolha da tensão de barramento que deve ser no mínimo a necessária para produzir a tensão de pico do sinal de saída. Para o conversor Meia Ponte ela deve ser selecionada através da equação abaixo:

$$V_{Barramento} = 2 \times \sqrt{2} \times V_{out_{eficaz}} \quad (3)$$

$$V_{Barramento} = 144,25V \quad (4)$$

Nota-se que a escolha de um dispositivo chaveador, além de suportar a corrente, a qual ainda será calculada, deve suportar pelo menos 144,25V CC. A corrente nominal, de acordo com a ficha técnica do motor, é de 118A (RMS).

$$I_{rms} = \frac{I_{cc}}{\sqrt{2}} = 118A \quad (5)$$

$$I_{rms} \times 118A = 167A \quad (6)$$

Conforme Rigo (2020), deve-se assumir que o módulo de conversores de baixa frequência será responsável por prover toda a corrente demandada. No entanto, ao analisarmos a demanda de corrente das equipes do campus Joinville, observamos que o valor de 167 A ultrapassa consideravelmente as necessidades das outras equipes.

A escolha de quatro módulos de conversores de baixa frequência em paralelo foi fundamentada em critérios técnicos e de segurança. Um dos critérios principais foi garantir que nenhum módulo operasse com uma corrente superior a 45 A, de forma a evitar sobrecarga, reduzir os riscos associados ao superaquecimento e prolongar a vida útil dos componentes. Com essa configuração, cada módulo opera com uma corrente máxima de aproximadamente 41,75 A, mantendo uma margem de segurança em relação ao limite estabelecido.

Inicialmente, foi estimado que as equipes menores necessitariam de correntes na faixa de 10 a 30 A, dependendo da atividade desenvolvida e da carga utilizada. Assim, mesmo com a maior demanda concentrada na equipe Fórmula Cem, os quatro

módulos operando em paralelo foram suficientes para atender todas as necessidades do campus.

Adicionalmente, a modularidade do sistema foi escolhida para permitir maior flexibilidade e robustez. Essa configuração possibilita atender à demanda total de forma segura, além de viabilizar futuras expansões ou operar sob condições adversas, como o aumento temporário de carga.

3.2.2 Módulos conversores chaveados de Média e Alta frequência

Os módulos de média e alta frequência não devem conduzir a corrente em regime permanente, devido às elevadas perdas associadas ao processo de comutação. Assim, esses conversores são designados exclusivamente para operar em resposta às dinâmicas impostas pela carga ou em situações de falha de outros módulos. Nesses cenários, os conversores de média e alta frequência permanecem com correntes médias próximas de zero durante o regime permanente, assumindo correntes apenas até o limite previamente definido quando demandados por variações dinâmicas ou condições de falha.

Embora, teoricamente, as correntes médias sejam próximas de zero em regime permanente, no presente trabalho, foi estabelecido que os dispositivos chaveadores de média e alta frequência podem assumir até 15% da corrente total. Esse limite inclui uma margem de segurança adicional para garantir a confiabilidade do sistema. Desse modo, o dispositivo chaveador a ser escolhido deve suportar uma corrente de no mínimo de 12,5 A, para cada módulo.

3.3 DIMENSIONAMENTO

Será apresentado os cálculos de dimensionamento dos dispositivos que irão compor o conversor proposto, detalhando as especificações de dimensionamento necessárias para atender às demandas de cada equipe de competição da UFSC Joinville.

3.3.1 Equipe Fórmula Cem

Para os módulos de baixa frequência, fora estabelecido o valor de histerese de 17 A, em torno de 10% do valor máximo da corrente total, de maneira subsequente, o valor da histerese do conversor de média frequência deve corresponder a 50% do valor da histerese do módulo de baixa frequência, ou seja, nesse caso, 8 A.

Apresentado por Rigo (2020), a potência dissipada sobre o amplificador linear corresponde exclusivamente à ondulação gerada pelo estágio de alta frequência, e deve girar em torno de 1,4% da potência total do conversor proposto.

$$P_{Linear} = \frac{V_{Barramento}}{8} \times \Delta Histerese_{Alta Freq} = 84 W \quad (7)$$

Desse modo, é possível determinar a histerese conversor de alta frequência, realizando a operação inversa da equação (7).

$$\frac{84 \times 8}{144,25} = \Delta Histerese_{Alta Freq} \quad (8)$$

De acordo com Rigo (2020), o desenvolvimento do conversor híbrido, com a proposta de sintetizar tensões alternadas, exigiu a formulação de relações de dependência entre os parâmetros de projeto, especialmente no cálculo dos indutores dos módulos chaveados. Essa abordagem foi essencial devido às premissas adotadas para o sistema. No entanto, no contexto do presente projeto, o conversor será configurado como uma fonte de tensão contínua (CC), o que implica em uma abordagem distinta para os cálculos e a modelagem do sistema.

A configuração proposta no presente trabalho opera de maneira semelhante a um conversor Buck, uma vez que a tensão de saída é sempre inferior à tensão de barramento, caracterizando um rebaixamento de tensão. Essa característica permite que o sistema seja modelado e analisado conforme os princípios clássicos de operação de conversores Buck. Consequentemente, o dimensionamento dos indutores dos módulos chaveados pode ser realizado seguindo a metodologia tradicional descrita na literatura sobre conversores Buck.

$$L_{CONV} = \frac{V_{saida} \times D}{F_s \times \Delta I_L} \quad (9)$$

Nota-se que para estabelecer o valor dos indutores de cada conversor, deve-se definir a frequência de chaveamento destes.

Considerando os seguintes valores de frequência de 5 kHz para o módulo de baixa frequência, 20 kHz para o conversor de média frequência, e 300 kHz para o conversor de alta frequência. As equações (10), (11) e (12) apresentam o valor de cada Indutor de cada módulo conversor.

$$L_{BF} = \frac{72 \times (1 - 0.5)}{5000 \times 17} = 423\mu H \quad (10)$$

$$L_{MF} = \frac{72 \times (1 - 0.5)}{20000 \times 8} = 225\mu H \quad (11)$$

$$L_{AF} = \frac{72 \times (1 - 0.5)}{300000 \times 4} = 30\mu H \quad (12)$$

Onde:

L_{BF} : Indutância do módulo de baixa frequência;

L_{MF} : Indutância do módulo de média frequência; e

L_{AF} : Indutância do módulo de alta frequência.

Nota-se que o indutor do módulo de baixa frequência compreende uma indutância de $423\mu H$, contudo, este valor refere-se ao valor do indutor equivalente de baixa frequência. Desse modo, decidido que serão quatro braços em paralelo compreendidos no módulo de baixa frequência, tem-se a seguinte equação para cada indutor de baixa frequência (BF):

$$\frac{1}{L_{Equivalente}} = \frac{1}{L_{BF_1}} + \frac{1}{L_{BF_2}} + \frac{1}{L_{BF_3}} + \frac{1}{L_{BF_4}} \quad (13)$$

$$L_{BF_x} = 1.7mH \quad (14)$$

Sabendo que todos os indutores de baixa frequência compreende o mesmo valor de indutância, chega-se em 1,7 mH para cada indutor.

3.3.2 Demais equipes

Analisando a demanda de corrente das demais equipes estudadas, nota-se que as equipes Babbitonga e Draconis demandam 72 A e 50 A, respectivamente. Desse modo, visando melhor distribuir essa quantidade de corrente, para a equipe Babbitonga foi empregado três módulos conversores de baixa frequência. Para a equipe Draconis apenas dois módulos já se tornam suficientes. Para a equipe Eficem, apenas um módulo de baixa frequência foi suficiente. Além disso, reitera-se que para equipe Baja podem ser usados os mesmos resultados da equipe Fórmula Cem.

Com base nos dados da Tabela 5, são apresentados a seguir os valores dos indutores calculados para as demais equipes:

Tabela 4 - Equipe de competição x Valores de indutância de cada braço

Equipe de competição	Baixa Frequência Equivalente /por módulo		Média Frequência	Alta Frequência
Barco Solar Babbitonga	670uH	2mH	340uH	40uH
Draconis Drone Designs	640uH	1.28mH	320uH	10uH
Eficem	2.6mH		1.13mH	150uH

Fonte: O autor (2024).

3.4 CONTROLE

A estrutura de controle foi desenvolvida com a premissa de que os conversores chaveados fornecem em sua totalidade a corrente demandada, enquanto o amplificador linear sintetiza a tensão de saída com erro desprezível em relação à referência.

Vidor *et al.* (2019) e Rigo (2020) apresentaram um controle por histerese de um conversor chaveado-linear, onde em seus estudos, foram apresentadas as vantagens de utilizar tal técnica de controle. Desse modo, com base na metodologia apresentada por ambos, será proposto um controle em malha fechada de tensão e corrente para o conversor do presente trabalho.

3.4.1 Controle de tensão na saída

Na proposta de associação híbrida paralela, o amplificador linear é responsável pela qualidade do sinal de saída, realizando o controle de tensão. A referência do sinal desejado é inserida na entrada do amplificador linear, que se encarrega de reproduzi-lo com a maior fidelidade possível na saída. Para minimizar as perdas, a corrente demandada pela carga será fornecida pelos conversores chaveados, enquanto a corrente no amplificador linear será mantida ao mínimo.

Para anular a corrente sobre o amplificador linear, uma abordagem eficaz é o uso de um controlador PI. Rigo (2020) apresentou uma metodologia para o dimensionamento de um controlador PI, com o objetivo de direcionar toda a corrente do conversor para os módulos chaveados.

O controle dos conversores chaveados foi projetado para assistir o amplificador linear em termos de corrente. Nesse contexto, o controlador PI compara a referência nula com a corrente do amplificador linear e gera, em sua saída, o valor correspondente à corrente de carga. Desse modo, considera-se a saída do controlador PI como um valor proporcional à corrente total demandada nos conversores chaveados para minimizar a corrente no amplificador linear.

Como apresentado na figura 13 do item 2.6, os conversores de baixa frequência recebem diretamente da saída do controlador PI o erro de corrente, assumindo a maior parte da corrente de carga.

3.4.1.1 Controlador PI

No projeto do controlador PI, algumas considerações foram adotadas. Inicialmente, estabeleceu-se um ganho elevado no amplificador linear, aproximadamente cem vezes, com o objetivo de aprimorar a precisão da tensão de saída. Essa escolha baseia-se no princípio de que um amplificador com ganho elevado proporciona ao sistema uma resposta mais precisa às variações de tensão, reduzindo de forma significativa o erro no seguimento da referência.

Além disso, foi inserido um polo na origem, com o objetivo de proporcionar ganhos elevados em baixas frequências. Desse modo, é garantido que o erro de regime estacionário seja minimizado, permitindo que o sistema corrija de forma eficaz

a diferença entre a tensão de saída e a tensão de referência em baixas frequências, resultando em uma operação precisa mesmo em condições de variação lenta.

Por fim, foi inserido um zero próximo à frequência de chaveamento do conversor de mais alta frequência, que opera em torno de 300 kHz. O zero foi posicionado em 280 kHz, próximo dessa frequência de comutação, com a finalidade de melhorar a resposta transitória do sistema, compensando os efeitos dinâmicos causados pelas oscilações de alta frequência introduzidas pelos conversores chaveados em paralelo. Desse modo, garante-se uma atenuação das ondulações geradas pela comutação, resultando em uma saída de tensão mais estável e com menor ruído, especialmente em frequências próximas à frequência de chaveamento.

3.4.2 Controle de corrente dos conversores chaveados

Para os conversores de média frequência, a estratégia é minimizar a ondulação de corrente residual dos conversores de baixa frequência. Nesse caso, a referência de corrente é calculada subtraindo a soma das correntes dos módulos de baixa frequência do erro de corrente, representando o resíduo de corrente remanescente do dito módulo chaveado.

Os conversores de alta frequência seguem princípios semelhantes aos dos conversores de média frequência, buscando minimizar as ondulações de corrente remanescentes dos conversores de baixa e média frequência, auxiliar com sobrecargas e contribuir para a dinâmica rápida do sistema. Adicionalmente, os conversores de alta frequência devem minimizar ainda mais a ondulação de corrente, reduzindo o resíduo a um nível baixo para minimizar a potência dissipada no amplificador linear, que elimina todas as ondulações remanescentes.

A referência de corrente para os conversores alta frequência é obtida subtraindo a soma das correntes dos módulos de baixa e média frequência da saída do controlador PI. Assim, o conversor alta frequência opera com a ondulação resultante dos conversores de baixa e média frequência, reduzindo-a a valores próximos de zero.

Quanto ao controle de comutação de cada chave de cada braço em paralelo, cada braço do conversor é controlado individualmente, mas de forma coordenada, de modo que a corrente total fornecida seja a soma das contribuições de cada braço, ajustadas para atender à demanda da carga e minimizar as ondulações.

O controle de comutação baseia-se no erro de corrente entre o valor desejado e o valor real medido de cada braço. Esse erro é processado pelo controlador PI, que ajusta o tempo de comutação das chaves do braço correspondente.

A lógica de comutação segue o princípio de controle por faixa de atuação, onde o erro total do sistema define se um braço específico deve ou não atuar. A atuação de cada braço depende de faixas de erro pré-estabelecidas que distribuem a responsabilidade de cada módulo de frequência. Assim, em condições de erro pequeno, somente os braços de baixa frequência são acionados, enquanto que, em condições de erro mais significativo, braços de frequência média e alta também são ativados, de acordo com suas capacidades de resposta mais rápida.

Ou seja, tal lógica permite em caso de sobre carga dos módulos de baixa frequência, que os módulos de média e alta frequência adquiram parte da corrente demanda, até um limiar pré-determinado. Desse modo, à medida que o erro aumenta, as chaves dos braços de média e alta frequência são gradativamente ativados, permitindo que o conversor reaja mais rapidamente e corrija a diferença entre a corrente desejada e a corrente medida.

Além disso, a histerese do sinal de corrente em cada módulo é utilizada para suavizar o comportamento de comutação, evitando que pequenos ruídos ou oscilações próximas ao ponto de referência causem ativação/desativação constante das chaves. A habilitação da histerese impede que o sistema mude de estado com base em variações pequenas e insignificantes, garantindo maior estabilidade no controle.

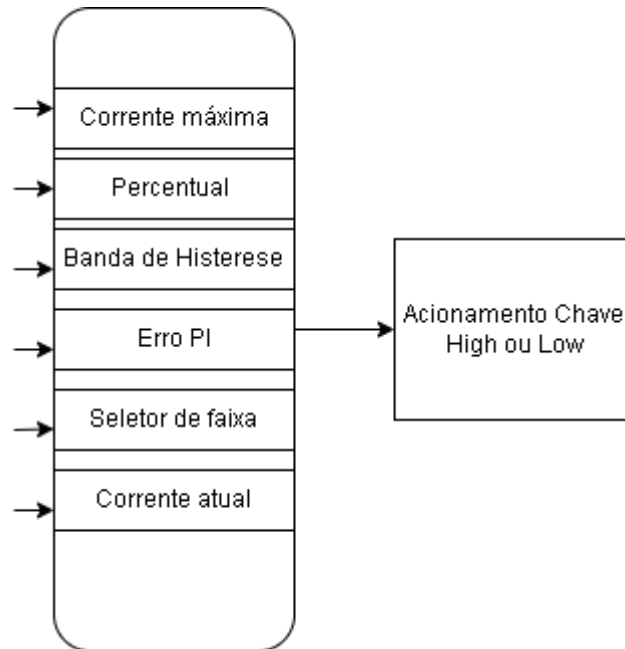
Quando o erro total está dentro de uma faixa tolerável, as chaves de alta frequência permanecem desligados, reduzindo as perdas de comutação e mantendo a operação eficiente em baixa frequência.

Desse modo, é promovida a garantia de que a corrente total seja entregue à carga de maneira precisa, minimizando oscilações e otimizando a eficiência do sistema. A combinação de braços operando em diferentes faixas de frequência permite um equilíbrio entre rapidez de resposta e eficiência, reduzindo as perdas associadas a comutações excessivas e garantindo uma operação estável mesmo sob variações de carga significativas.

Na Figura 17 é apresentado o bloco responsável pela lógica de controle descrita. Em cada braço do conversor, há um bloco de controle similar ao

apresentado. Cada braço do conversor compreende um bloco de controle como o apresentado.

Figura 17 - Bloco de controle



Fonte: O autor (2024).

4. SIMULAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da simulação do conversor proposto.

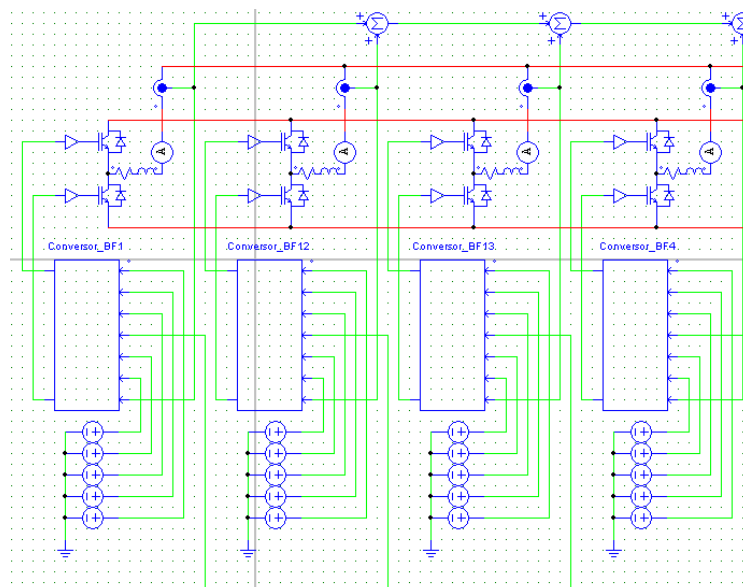
4.1 ESQUEMÁTICO

O conversor proposto fora modelado no software PSIM, a fim de validar as suas premissas e o seu funcionamento. O conversor pode ser dividido em quatro grandes grupos:

- Módulo conversor de baixa frequência;
- Módulo conversor de média frequência;
- Módulo conversor de alta frequência;
- Amplificador linear.

Na figura 18 é apresentado o módulo conversor de baixa frequência, onde, especificamente para a equipe Fórmula Cem, fora implementado um módulo conversor com quatro braços em paralelo. Para o controle de corrente, a corrente de cada braço é monitorada em tempo real, que, dependendo do valor desta corrente, o braço atua ou não.

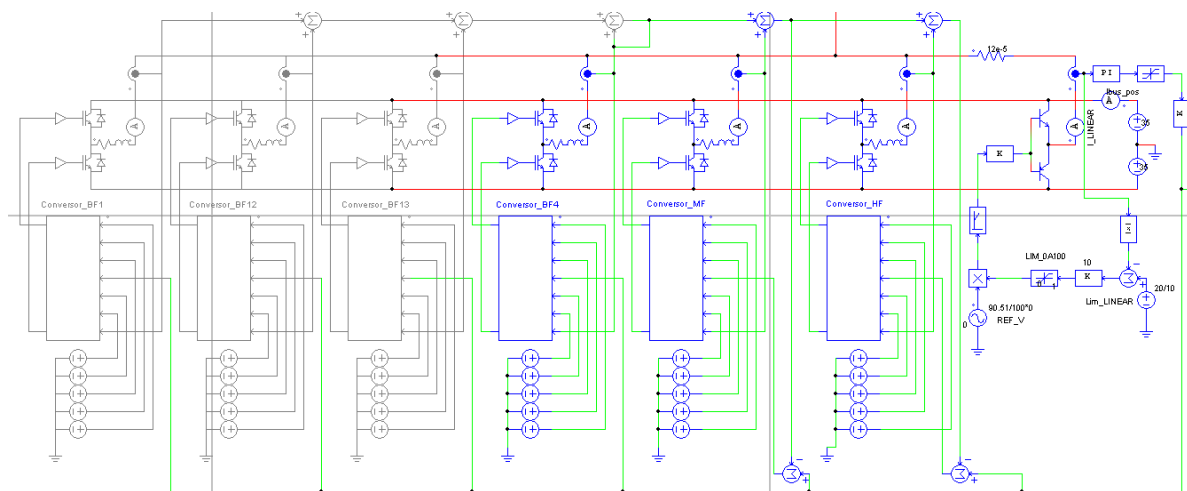
Figura 18 - Módulo conversor de Baixa Frequência para a equipe Fórmula Cem



Fonte: O autor (2024).

Para exemplificar o principal objetivo do conversor proposto compreender uma topologia modular e flexível, na figura 19 é representado uma situação em que não fora necessário prover demasiada potência ao sistema motriz, um exemplo hipotético onde apenas um conversor de baixa frequência atende os requisitos de projeto, ou seja, de maneira simplificada, é possível aumentar ou diminuir a potência, desde que respeitados os limites térmicos dos componentes, a mesma analogia vale para as demais equipes.

Figura 19 - Conversor com apenas um braço conversor de baixa frequência

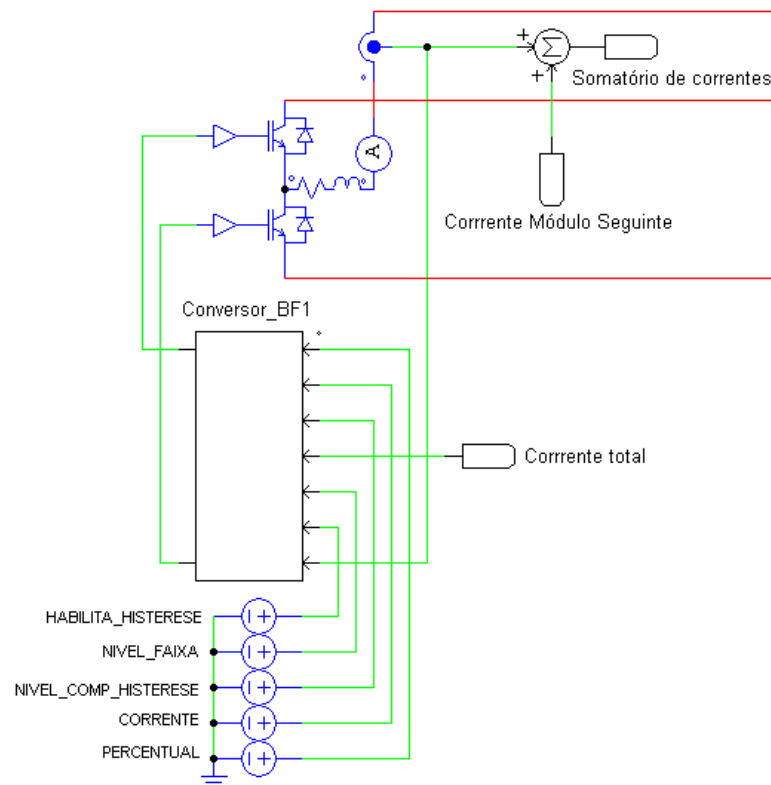


Fonte: O autor (2024).

A configuração apresentada acima, destaca um dos principais objetivos do projeto: a modularidade. Com base nessa abordagem, é possível escalar o sistema de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação, seja aumentando o número de módulos para atender a maiores demandas ou reduzindo-os para aplicações mais modestas. Além disso, a capacidade de adicionar ou remover módulos sem comprometer a operação do sistema demonstra o potencial da topologia para ser aplicada em diferentes contextos e equipes, reforçando o objetivo de um conversor modular escalável, eficiente e de fácil manutenção.

É apresentado na figura 20 um braço conversor, especificamente de baixa frequência, onde este por meio da referência total da corrente do conversor e os sinais de controle impostos, aciona ou desaciona as chaves de baixa frequência.

Figura 20 - Braço conversor de baixa frequência e bloco de controle



Fonte: O autor (2024).

Devido ao conversor proposto poder compreender múltiplos braços de um mesmo módulo em paralelo, o índice “Percentual” do bloco de controle representa o percentual de corrente que braço conversor pode assumir. No caso de conversores ou módulos com as mesmas características, o índice de corrente é equivalente à unidade dividida pelo número de conversores em paralelo.

Para garantir a proteção e o funcionamento adequado dos dispositivos semicondutores, são estabelecidas regras de controle baseadas nas limitações de corrente. A limitação é implementada com o uso de um comparador de valor absoluto, que desativa o módulo ou conversor ao exceder o limite de corrente pré-definido. No caso do amplificador linear, a corrente é monitorada por meio da tensão em um resistor de saída, o que permite reduzir a corrente de polarização no estágio final quando o limite é alcançado. Em situações transitórias, se o limite de corrente do amplificador linear for atingido, a tensão de saída apresentará um erro significativo, desviando-se da forma de onda de referência.

Outro aspecto importante na topologia proposta é a implementação de um seletor de faixa, também conhecido como seletor de banda. Caso a banda de

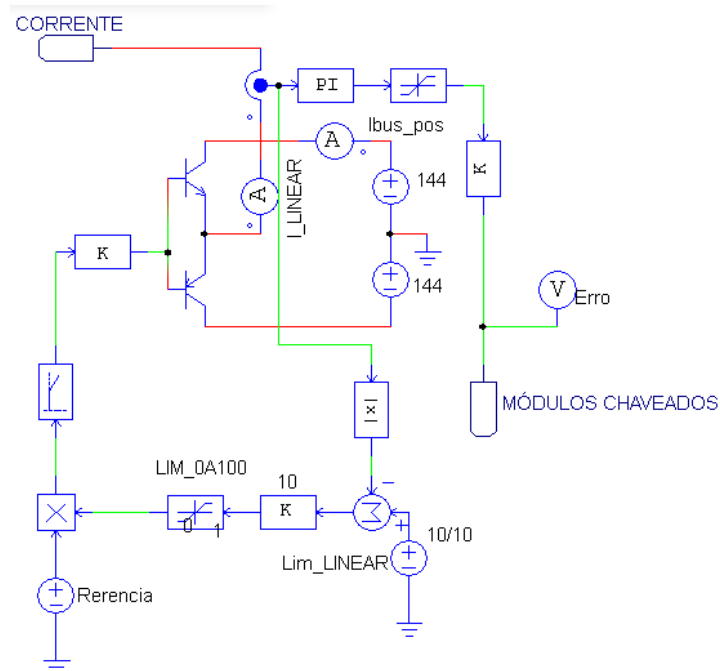
histerese de um dos inversores seja maior que o nível de corrente requerido pela carga, pode ocorrer uma polaridade oposta à corrente demandada, gerando correntes circulantes entre os conversores e aumentando as perdas e o estresse sobre os dispositivos semicondutores. Para evitar essa situação, o seletor de banda garante que cada conversor só será ativado quando a corrente de saída exceder sua faixa de operação. O controle é feito com base no sinal de corrente de saída do controlador PI, que é comparado com os limites estabelecidos para cada conversor, ativando-o apenas quando necessário.

Além disso, o projeto do controlador de histerese foi desenvolvido para operar com diferentes frequências de chaveamento – baixas, médias e altas – conforme as características dos dispositivos semicondutores utilizados, pois, a topologia proposta permite o uso de diferentes tipos de dispositivos chaveadores.

Quanto ao módulo que sintetiza a tensão do conversor, o processo começa com a comparação entre a referência de entrada e a tensão de saída, gerando um sinal de erro que é utilizado para criar a referência de tensão para o amplificador linear. Dada uma carga qualquer na saída, a corrente que flui através dessa carga seria, em princípio, fornecida pelo amplificador linear. No entanto, a realimentação da corrente do amplificador é comparada com uma referência nula, e o controlador PI atua de forma a transferir essa corrente para os conversores chaveados, que então assumem o fornecimento da corrente de carga.

Uma estrutura de controle imposta sobre o amplificador linear é apresentado na figura 21.

Figura 21 - Módulo de controle de tensão



Fonte: O autor (2024).

O controle do amplificador linear começa com o bloco de referência, que define a tensão desejada. Esse valor é comparado com a tensão real medida pelo bloco "bus_pos", gerando o sinal de erro, que é processado pelo controlador PI. O componente proporcional corrige desvios rapidamente, enquanto o integral elimina erros persistentes, garantindo que a saída atinja o valor de referência. A saída do controlador PI é direcionada aos módulos chaveados, enquanto blocos de limitação, como "LIM_0A100" e "Lim_LINEAR", protegem os componentes contra sobrecarga. O sistema realiza medições em tempo real de corrente para ajustar dinamicamente o funcionamento, reagindo rapidamente a variações. Assim, os módulos chaveados fornecem a potência principal, e o amplificador linear sintetiza a tensão de saída, sem qualquer ondulação.

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

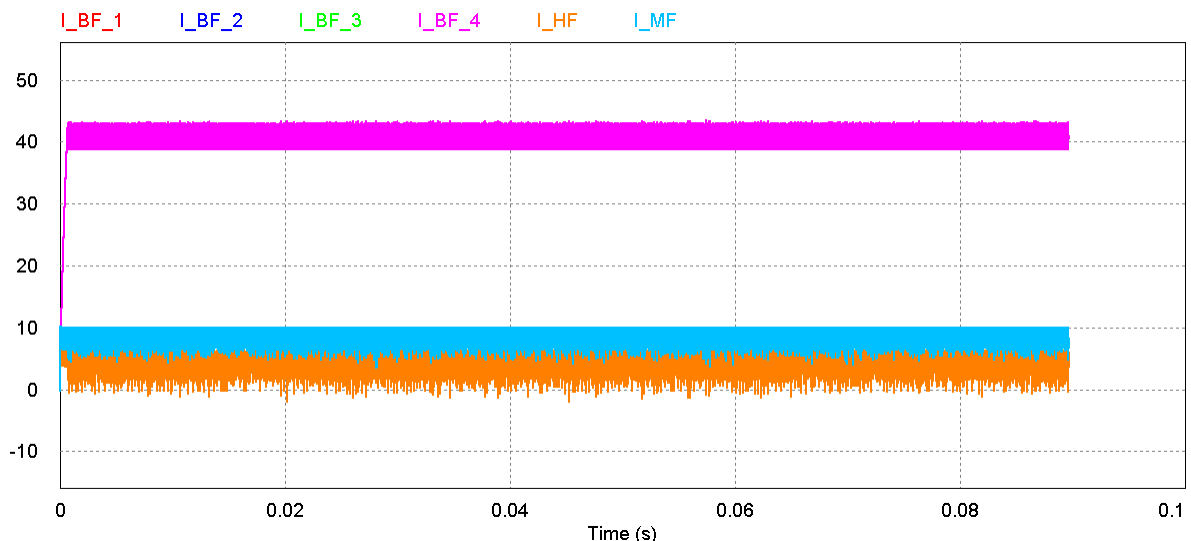
Neste tópico, é apresentado os resultados obtidos a partir das simulações realizadas para o sistema em questão. As simulações foram conduzidas utilizando ferramentas de modelagem PSIM, visando analisar o desempenho do circuito sob diversas condições operacionais.

4.2.1 Equipe Fórmula Cem

Para fornecer uma potência de 6 kW, correspondente à demanda nominal do motor da equipe Fórmula Cem, com uma tensão de 72 Vcc (correspondente a 51 V RMS) e corrente de 168 A (118 A RMS), os braços de baixa frequência absorvem praticamente toda a corrente necessária, distribuindo 42 A por braço. O conversor de média frequência complementa a corrente remanescente, enquanto o conversor de alta frequência tem a função de cancelar a corrente no amplificador linear, operando com valores próximos de zero amperes.

Na figura 22 é apresentado o valor de corrente sobre cada módulo conversor da equipe Fórmula Cem.

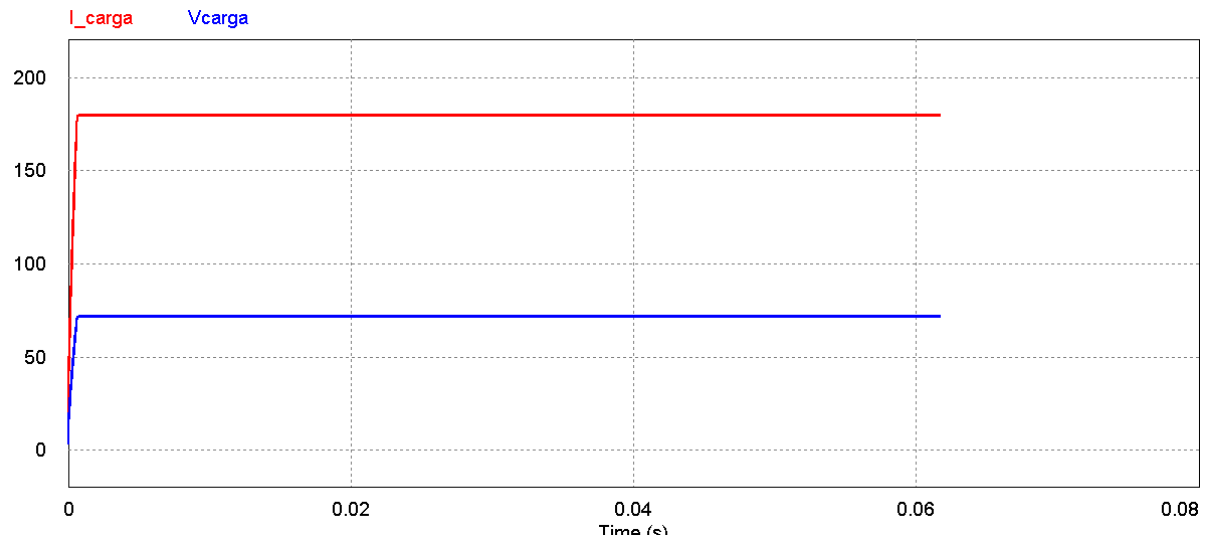
Figura 22 - Corrente em cada módulo conversor



Fonte: O autor (2024).

Na saída, é provido a tensão de 72 V, e uma corrente de 168 A, sendo que esta corrente pode ser amplificada, caso seja habilitado a permissão de cada braço de baixa frequência fornecer mais corrente. Na figura 23 é apresentado o valor de tensão e corrente de saída do conversor.

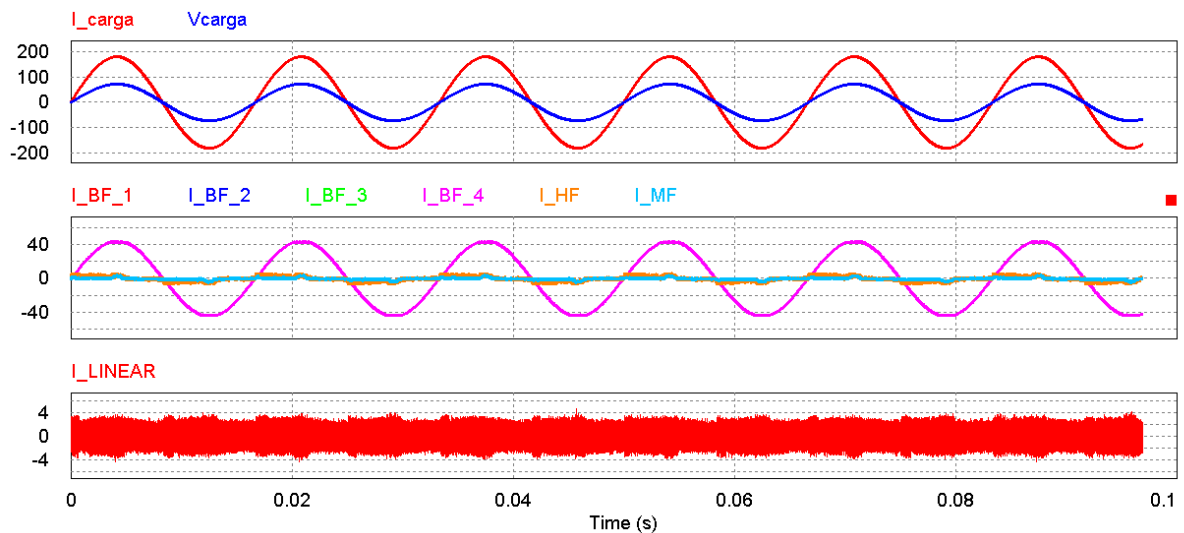
Figura 23 - Tensão e Corrente de saída



Fonte: O autor (2024).

Apresentado na figura 24, de modo a validar o conversor para a equipe Fórmula Cem, devido ao sinal de saída ser apenas um sinal sintetizado pelo amplificador linear, pode-se trocar o sinal de referência CC para CA, de modo a simular a tensão e corrente de saída do inversor que irá controlar o motor da equipe.

Figura 24 - Saída dos módulos conversores



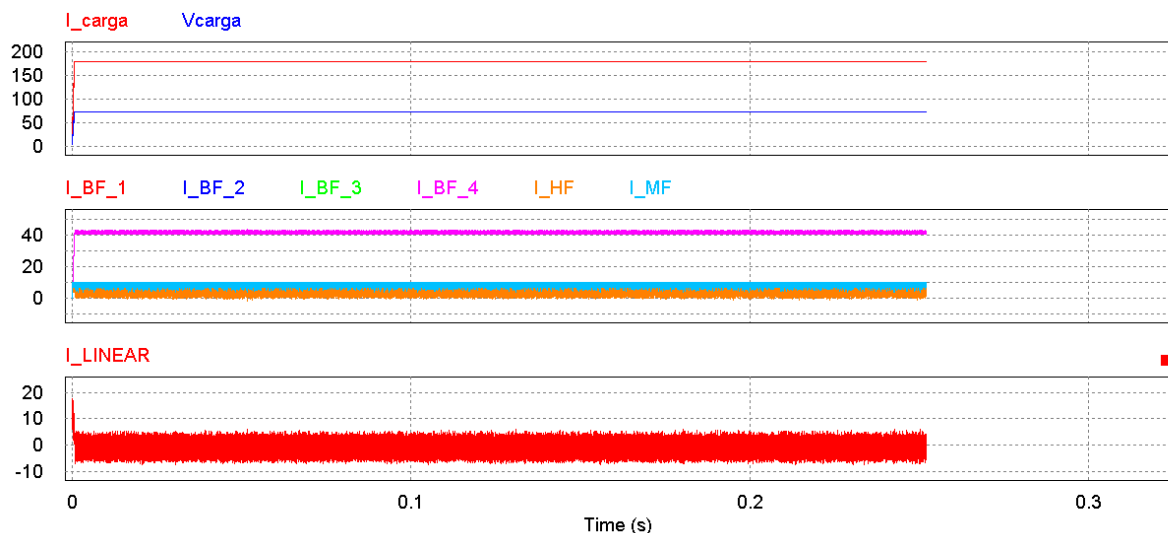
Fonte: O autor (2024).

Observa-se que, para sinais de corrente alternada (CA), a corrente sobre o amplificador linear apresenta menos oscilações e picos, como apresentado na figura 25. Segundo Rigo (2020), a banda de histerese que fora implementada no controle,

foi projetada para intercalar as comutações entre conversores de características semelhantes. Assim, pequenas variações nos valores de histerese (em torno de 1%) ou nas indutâncias projetadas garantem que as comutações ocorram em tempos distintos, permitindo que as correntes se intercalem durante cada semiciclo do sinal de saída. No entanto, Rigo (2020) reitera, para sinais contínuos de saída, esse procedimento pode ser inadequado e exigirá outra técnica de controle.

Este fato, embora inicialmente positivo, pode, em cenários mais complexos, gerar desafios adicionais. A implementação de uma estratégia de controle mais flexível para o deslocamento da banda de histerese poderia aumentar a complexidade do sistema, uma vez que envolveria a coordenação dinâmica das comutações entre os conversores, o que poderia acarretar maiores exigências de controle e aumento na dificuldade de implementação. Além disso, tal abordagem exige maior capacidade de processamento para monitoramento e ajuste contínuo. Desse modo, no projeto proposto não fora implementado a possibilidade de habilitar ou desabilitar o deslocamento da banda de histerese. Em simulação, não fora visualizado quaisquer indícios de correntes circulantes entre os conversores.

Figura 25 – Valores de saída e corrente sobre cada módulo conversor



Fonte: O autor (2024).

O pico de corrente nos instantes iniciais sobre o amplificador linear em operações CC, se deve ao fato de que, durante a partida e em qualquer condição transitória, o amplificador linear responde muito mais rápido do que os módulos chaveados, incluindo o módulo de alta frequência. Ou seja, independentemente da

indutância, os módulos chaveados necessitam de um tempo maior para alcançar o valor de carga desejado, e, durante esse intervalo, o amplificador linear é responsável por assumir toda a corrente. Na prática, isso resulta na necessidade de um amplificador linear de maior capacidade ou na limitação da corrente no amplificador, o que pode levar a distorções na tensão de saída.

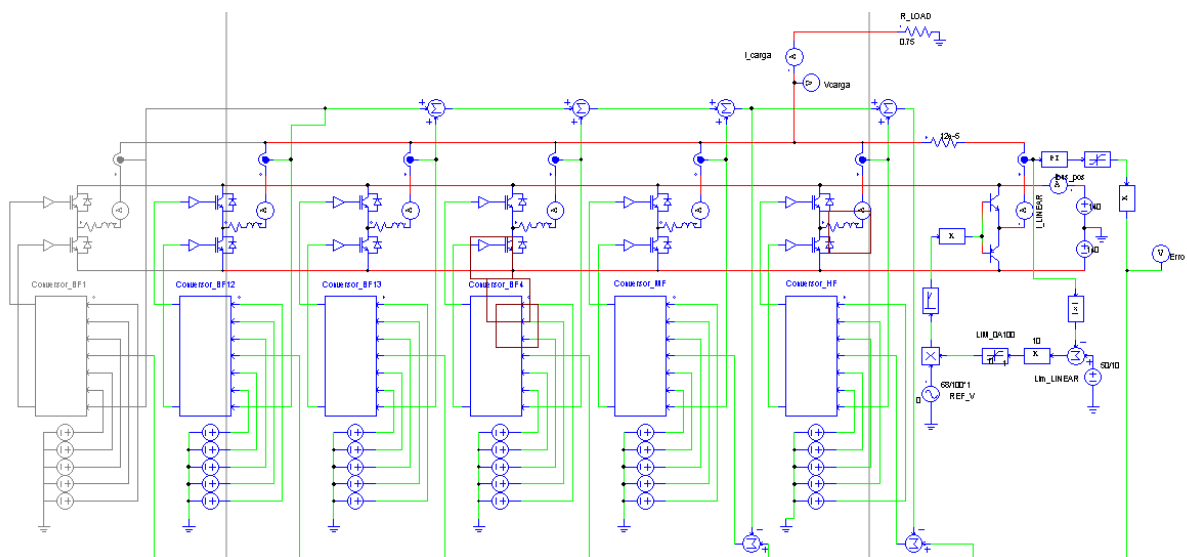
4.2.2 Demais equipes

Para as demais equipes, o resultado da simulação é análogo, limitando-se os resultados apenas aos valores nominais de tensão e corrente específicos de cada equipe. Além disso, para melhor apresentar o resultado da simulação de cada conversor, fora sintetizado como sinal de saída a tensão CA corresponde de cada equipe.

4.2.2.1 Babitonga

Abaixo é apresentado o conversor desenvolvido para a equipe Babitonga.

Figura 26 - Conversor da equipe Babitonga

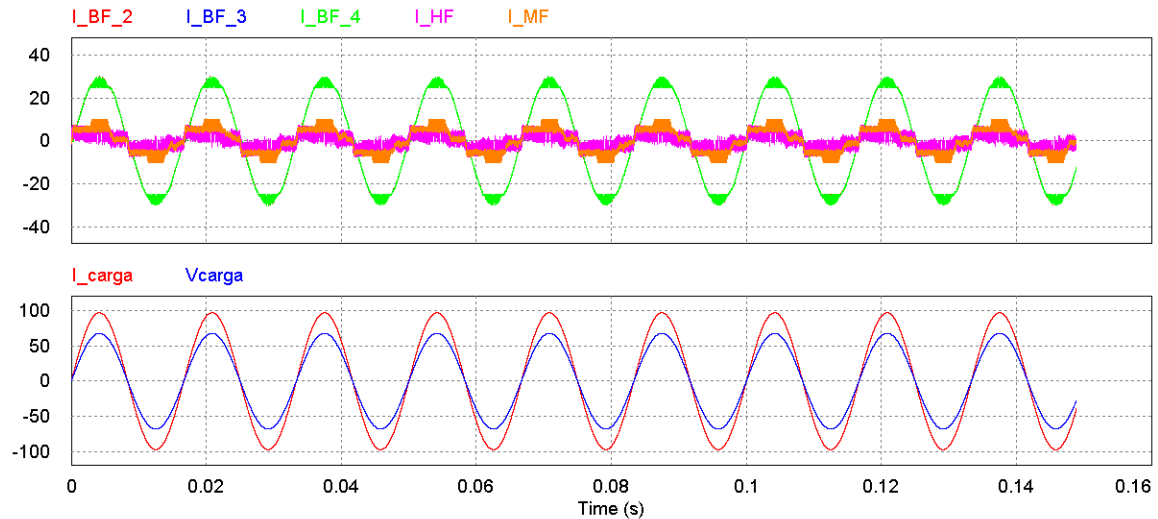


Fonte: O autor (2024).

Para a equipe Babitonga, fora necessário empregar três módulos de baixa frequência, visto que a mesma faz uso de 72 A RMS. Desse modo, a corrente foi melhor dividida entre os módulos.

Na figura 27 é apresentado o resultado da simulação do conversor proposto para a equipe Babitonga.

Figura 27 - Valores de corrente e tensão do conversor da equipe Babitonga



Fonte: O autor (2024).

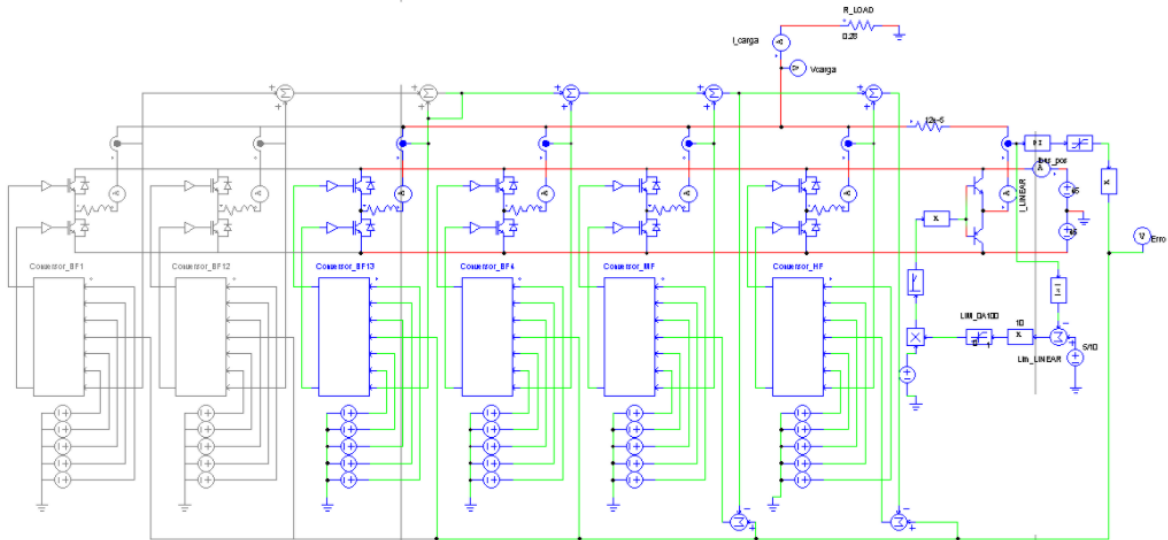
4.2.2.2 CTJ Baja

O conversor proposto para a equipe CTJ Baja segue exatamente o mesmo modelo dimensionado para a equipe Fórmula Cem.

4.2.2.3 Draconis

O conversor proposto para a equipe Draconis é apresentado na figura 28.

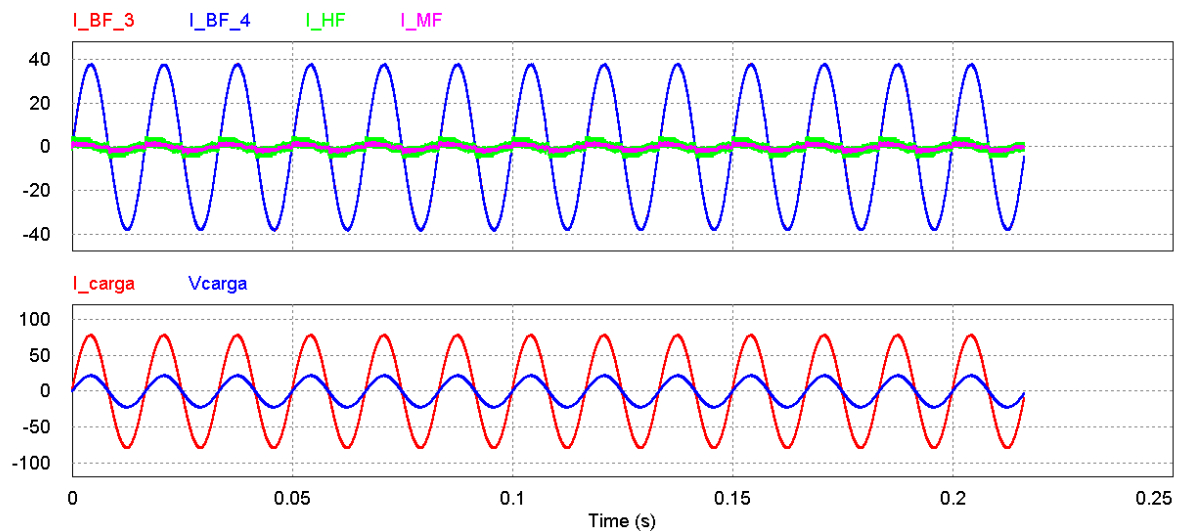
Figura 28 - Conversor da equipe Draconis



Fonte: O autor (2024).

Para a equipe Draconis, apenas dois módulos de baixa frequência foram necessários. De modo que, para prover a corrente de 50 A, fora especificado que cada um desses módulos deve prover 50% da corrente total.

Figura 29 - Valores de corrente e tensão do conversor da equipe Draconis



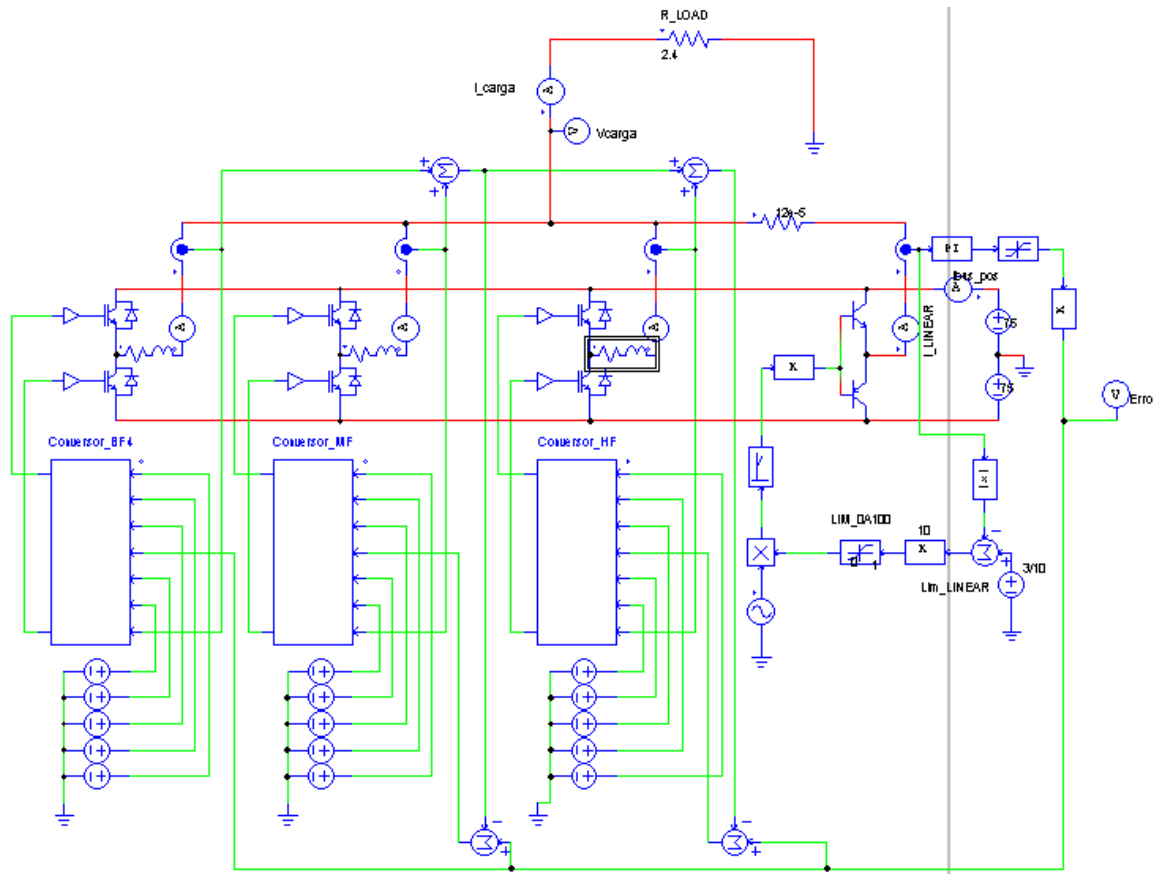
Fonte: O autor (2024).

4.2.2.4 Eficem

De maneira análoga, abaixo é apresentado o conversor para a equipe EFICEM. Devido a menor corrente demandada, apenas um módulo de baixa

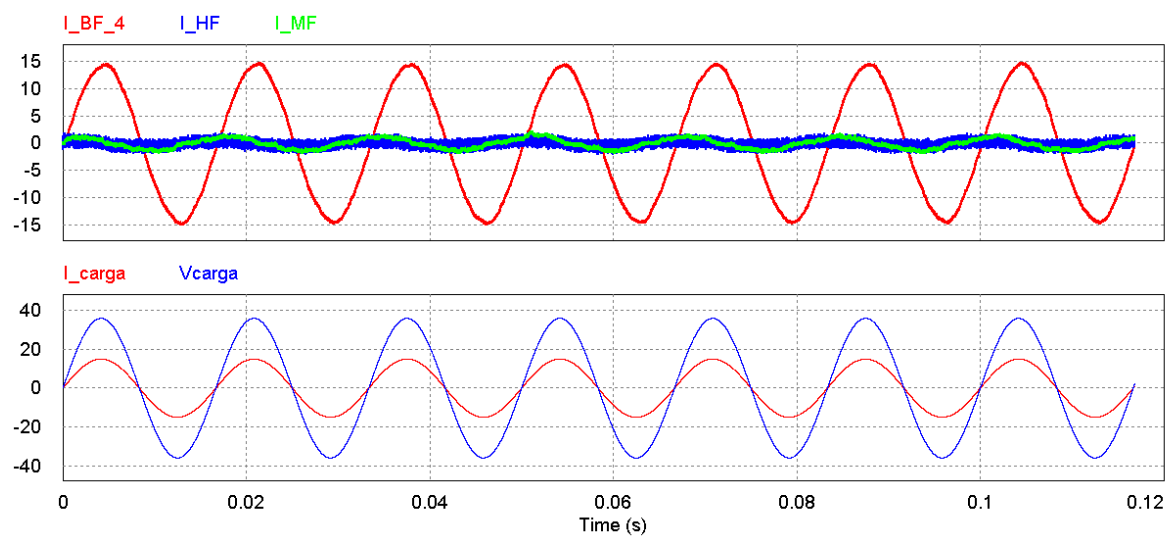
frequência foi utilizado. Na figura 30 é apresentado o conversor proposto para a equipe, e na figura 31 é apresentado o resultado da simulação do mesmo.

Figura 30 - Conversor da equipe Eficem



Fonte: O autor (2024).

Figura 31 - Valores de corrente e tensão do conversor da equipe Eficem



Fonte: O autor (2024).

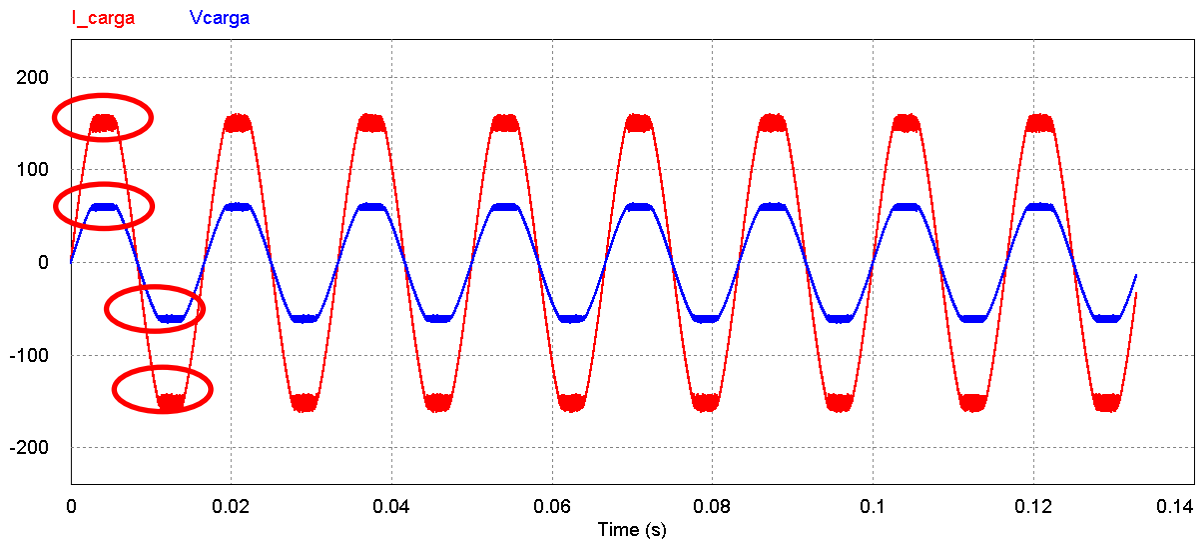
4.2.3 Configuração de sobrecorrente ou falha

O conversor proposto, devido a leitura de corrente instantânea sobre cada módulo conversor, atua também como um dispositivo de segurança, pois limita a corrente fornecida.

Abaixo será apresentado duas possíveis situações em que o conversor proposto atua como um dispositivo de segurança.

Na figura 32 é apresentado a primeira situação, onde um dos conversores em paralelo de baixa frequência da equipe Fórmula Cem, deixou de atuar, simulando a falha desse conversor.

Figura 32 - Valores de tensão e corrente em caso de falha

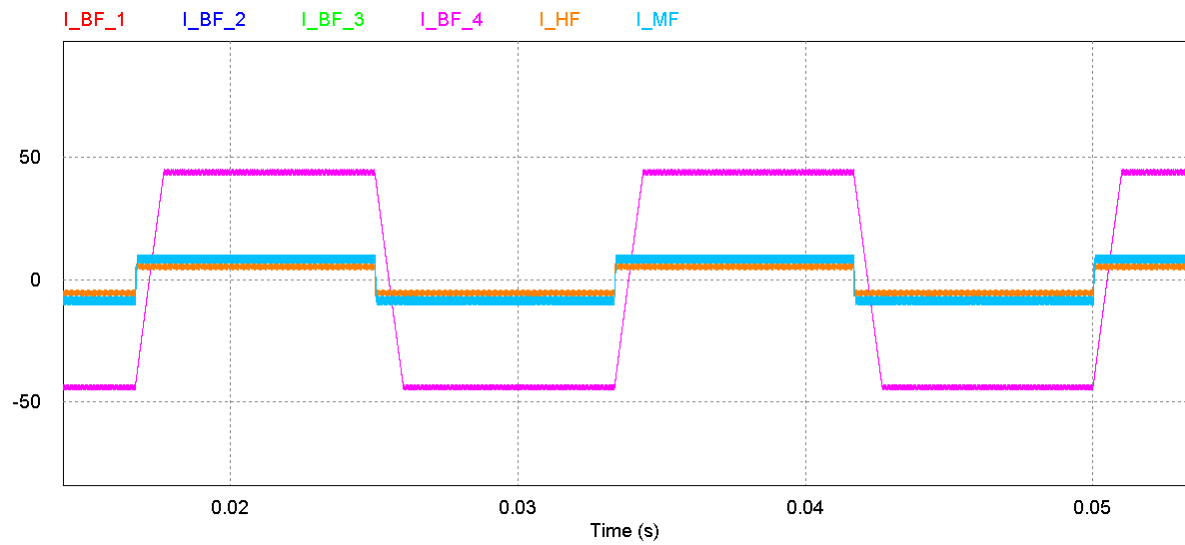


Fonte: O autor (2024).

Por meio da figura 32, é possível notar que os módulos conversores entraram em limitação, pois, devido a um módulo de baixa frequência parar de funcionar, os demais módulos tiveram que assumir a corrente que anteriormente era provida por este, o que superou os valores de corrente especificado no controlador, o que fez os módulos limitarem o valor de corrente.

Já na figura 33, é apresentado a segunda situação de modo de segurança, onde uma situação de curto-circuito foi imposta sobre o conversor, o que implicou em uma demanda de corrente alta e acima do especificado. Para esse caso, foi considerado que todos os módulos estão funcionando corretamente.

Figura 33 - Módulos conversores em estado de curto



Fonte: O autor (2024).

Nota-se que todos os módulos conversores entraram em limitação, o que impede que o conversor por inteiro sofra qualquer dano devido ao curto.

5. DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR

Será apresentado o desenvolvimento dos módulos conversores, bem como apresentado a escolha dos componentes que irão compor cada módulo conversor.

5.1 MÓDULOS CONVERSORES X DISPOSITIVOS DE CHAVEAMENTO

A escolha dos dispositivos chaveadores é fundamental para garantir a eficiência, a estabilidade e a confiabilidade do sistema. Os principais fatores que foram considerados neste trabalho incluem:

- Capacidade de Corrente e Tensão: Os dispositivos devem ser capazes de suportar as correntes e tensões envolvidas no sistema sem comprometer o desempenho ou a segurança. A capacidade de corrente deve ser adequada para lidar com a carga máxima prevista, enquanto a tensão deve ser compatível com a tensão de operação do conversor;
- Custo e Disponibilidade: Considerações econômicas também desempenharam um papel importante na seleção dos dispositivos. O custo deve ser compatível com o orçamento do projeto, e a disponibilidade dos componentes devem ser verificadas para garantir que não haja atrasos na fabricação e montagem do conversor.

De acordo com as equações (3) e (6), o sistema deve ser capaz de prover uma tensão e corrente de até 144,25 V e 168 A. Desse modo, a tabela 6, apresenta os dispositivos de chaveamento escolhidos.

Ainda, para as equipes que demandaram mais de 50 A, foi empregado mais que um módulo conversor de baixa frequência, o que fez que nenhuma equipe ultrapasse o valor de 45 A por braço.

Desse modo, o limite de corrente do dispositivo chaveador é 45 A, e de tensão 144,25 V.

Outro fator que se levou em consideração foi a capacitância de entrada, saída e realimentação do dispositivo chaveador, pois, essas capacitâncias afetam a velocidade de comutação. Capacitâncias mais baixas permitem que o dispositivo seja comutado mais rapidamente, visando desviar-se do efeito Miller.

Ainda, outro fator importante que precisou ser levado em consideração foram os *Turn-On Delay Time*, *Rise Time* e *Turn-Off Delay Time* *Fall Time*, que impactam na capacidade de comutação, dependendo da frequência escolhida.

Abaixo é apresentado a tabela de dispositivos escolhidos para compor os módulos de baixa, média e alta frequência.

Tabela 5 - Dispositivo chaveadores escolhidos

Módulo	Dispositivo	V _{cce}	I _c
Baixa Frequência	IRGP4086 IGBT	300V	250A
Média Frequência	IRGP4086 IGBT	300V	250A
Alta Frequência	IRF840 MOSFET	500V	8A

Fonte: O autor (2024).

Vale ressaltar que tais dispositivos escolhidos atendem o conversor corresponde para cada equipe de competição da UFSC – Joinville.

Quanto a construção do circuito do amplificador linear, RIGO (2020) apresentou uma análise e construção deste, desse modo, tal tópico não será abordado no presente trabalho.

Vale ressaltar que os indutores variam de equipe para equipe, e este sim necessita ser adquirido de forma individual.

5.2 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Foi desenvolvido o esquemático dos módulos conversores propostos no software Protheus. O *layout* compreende dois *layers*, para ter uma divisão física entre o sistema de potência e o sistema de controle dos *gates*.

5.2.1 Cálculo do capacitor de bootstrap

Cada módulo conversor compreende uma frequência de chaveamento determinada, o que implica em diferentes valores de capacitância para o capacitor de bootstrap.

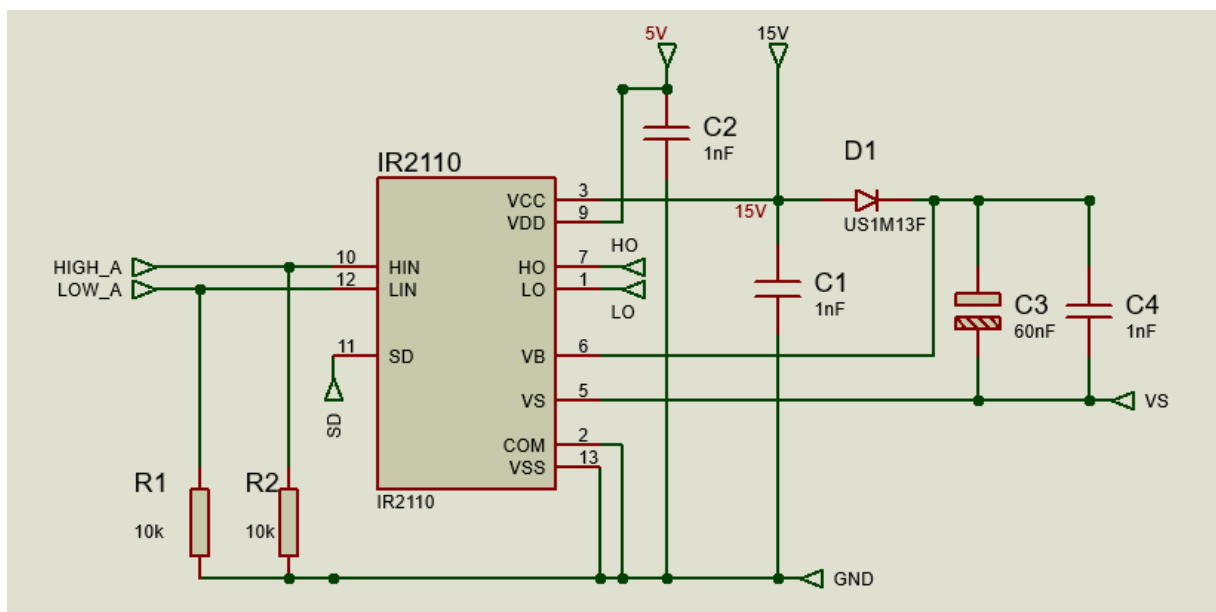
Para o módulo de baixa e média frequência, que utilizam o mesmo dispositivo chaveador, o valor de *Gate Charge* (Q_g), por meio da equação (2), é de 65 nF e utilizando o diodo US1-13-F, como diodo de bootstrap, por meio da equação (2), obtém-se um valor para capacitância de *gate* (C_g) de 4,88 nF. Aplicando o fator de correção de pelo menos dez vezes, o capacitor de *bootstrap* deve compreender uma capacitância de no mínimo 48,8 nF. Para o módulo de alta frequência, fora obtido um valor para capacitância de *gate* (C_g) de 4,51 nF, chegando no valor de capacitor de *bootstrap* de uma capacitância de no mínimo 45,21 nF.

Visando padronizar a máxima quantidade de componentes possíveis, visto que se solicita um valor de no mínimo de dez vezes da capacitância de *gate* (C_g), determinou-se que, para todos os módulos, o capacitor de *bootstrap* terá a capacitância de 60 nF.

Para o acionamento dos *gate-drivers*, fora escolhido o circuito integrado (CI) IR2110, que apresenta o acionamento *high-side* e *low-side* distintos, possibilitando assim a operação com diferentes modos de comutação no braço inversor.

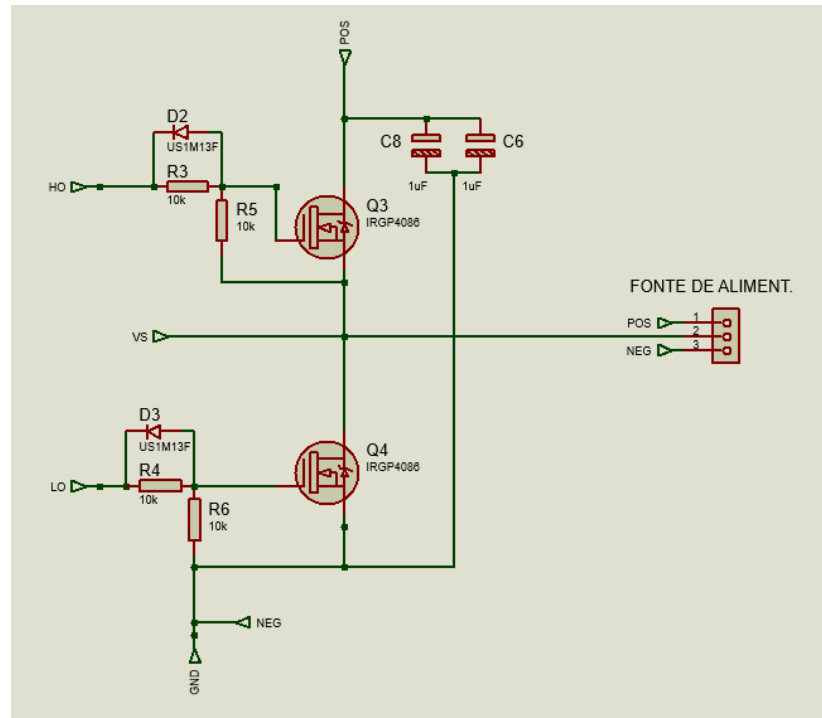
A figura 34 apresenta o esquemático desenvolvimento para o acionamento do *gate driver* junto ao capacitor e diodo de *Bootstrap*. Na sequência a figura 25 ilustra o esquemático desenvolvido de um módulo conversor genérico, ou seja, que pode ser de baixa, média ou alta frequência, e que recebe os sinais do *gate driver*.

Figura 34 – Circuito de acionamento *Gate driver* com amarração de *Bootstrap*



Fonte: O autor (2024).

Figura 35 – Módulo conversor genérico



Fonte: O autor (2024).

5.2.2 Acionamento do IR2110

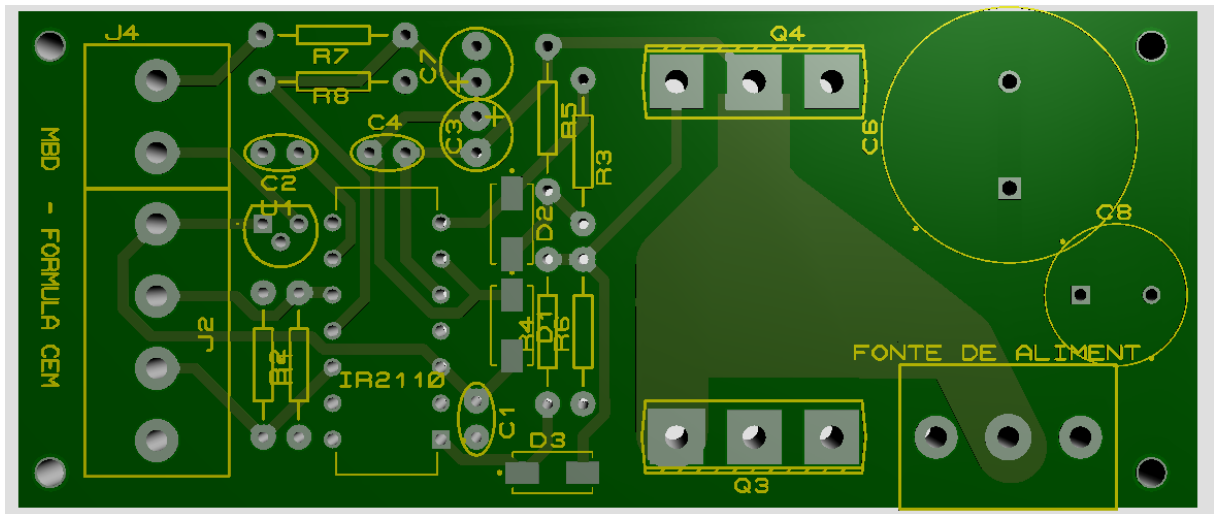
Para padronizar os componentes e estabelecer uma relação entre dispositivos de controle compatíveis com o IR2110, capazes de operar em uma faixa de frequência entre 5 kHz e 300 kHz, o STM32 da STMicroelectronics foi escolhido como referência. Além disso, ele possui um ADC de 12 bits, do tipo SAR (Successive Approximation Register), com uma taxa de amostragem de 2.5 Msps, permitindo o tratamento rápido e eficiente dos valores de corrente medidos, garantindo maior precisão e desempenho no sistema.

5.2.3 Desenvolvimento

Para o dimensionamento das trilhas de potência, foi utilizada a calculadora da PCB Brasil para dimensionar a placa de circuito impresso (PCB).

Nas figuras 36 e 37 é apresentado a placa de PCI desenvolvida, junto ao *layout* e trilhas de ligação do circuito.

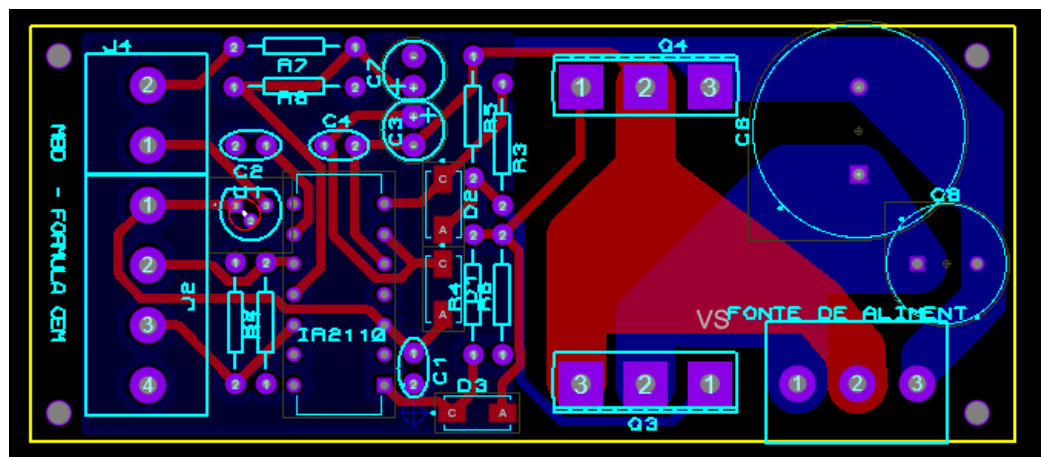
Figura 36 - PCI de um módulo conversor



Fonte: O autor (2024).

Considerando que a personalização e realidade de cada equipe, optou-se por desenvolver um módulo conversor genérico, que permita a integração com qualquer dispositivo microcontrolador.

Figura 37 - Layout do esquemático de um módulo conversor



Fonte: O autor (2024).

Nota-se que os dispositivos chaveadores foram posicionados nas bordas da PCB, permitindo o anexo de um dissipador de potência, o qual será necessário para garantir a eficiência térmica do módulo conversor, principalmente de baixa frequência. Além disso, quanto menor a distância da trilha de “gate” melhor, pois menos interferência a ruídos a chave receberá.

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do conversor chaveado-linear apresentado neste trabalho representa uma abordagem eficiente e inovadora para atender às demandas de potência das equipes de competição da UFSC Joinville. A solução proposta combina os benefícios de módulos conversores operando em diferentes faixas de frequência – baixa, média e alta – juntamente com um amplificador linear, resultando em uma topologia modular e flexível.

A divisão estratégica da corrente entre os módulos foi concebida para maximizar a eficiência do sistema, com os módulos de baixa frequência assumindo a maior parte da corrente em regime permanente, enquanto os módulos de média e alta frequência são responsáveis por atender às dinâmicas exigidas pela carga ou situações de falha. Além disso, o controle por histerese, aliado à implementação de um controlador PI, garante a qualidade da tensão de saída e distribui a corrente de forma otimizada, reduzindo as perdas de potência no amplificador linear, além de contribuir com a facilidade no desenvolvimento do controle embarcado.

As simulações realizadas validaram as premissas do projeto, evidenciando o desempenho satisfatório do conversor em diferentes condições operacionais, como regime permanente, sobrecarga e falhas. Os resultados indicaram que o sistema é capaz de fornecer a potência necessária para todas as equipes, desde a Fórmula Cem, que exige alta demanda, até equipes que empregam menor potência, como a Eficem. Adicionalmente, a modularidade do sistema permite a adição ou remoção de módulos conforme a necessidade, ampliando sua aplicabilidade e eficiência em diferentes cenários.

Embora o conversor proposto já atenda plenamente às demandas das equipes de competição, existem oportunidades para melhorias que podem potencializar ainda mais sua eficiência e funcionalidade. Entre as propostas de avanços futuros, destaca-se a implementação de uma análise de eficiência dinâmica, por meio do desenvolvimento de um algoritmo capaz de monitorar, em tempo real, a eficiência de cada módulo conversor. Esse algoritmo determinaria automaticamente quais módulos devem operar em determinadas condições, ativando apenas os necessários para atender à carga. Tal abordagem não apenas reduziria as perdas

como também aumentaria a eficiência geral do sistema, garantindo maior versatilidade e adaptabilidade às diferentes demandas operacionais.

Como outro passo futuro, propõe-se o desenvolvimento de um *rack* de controle e potência modular, projetado para permitir o acréscimo e a retirada de módulos conversores de forma simples e eficiente, no estilo "*plug-in*". Essa solução facilitaria a expansão ou redução da capacidade do sistema de acordo com as necessidades operacionais, proporcionando maior flexibilidade para atender a diferentes demandas de potência de forma prática.

REFERÊNCIAS

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J. C.; UMANS, S. D. **Electric machinery**. 6. ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 2003.

HART, D. W. **Power electronics**. 1. ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2011.

MANJREKAR, M.; STEIMER, P.; FELLOW, Li. Hybrid multilevel power conversion system: a competitive solution for high-power applications. **Ieee Transactions On Industry Applications**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 834-841, 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/28.845059>.

RASHID, M. H. **Power electronics handbook**. 3. ed. Burlington: Elsevier Inc., 2011.

RIGO, Nataniel Marcos. **CONVERSOR MULTINÍVEL HÍBRIDO PARALELO ASSISTIDO EM CORRENTE (CHAVEADO-LINEAR): ESTUDO, CONTRIBUIÇÃO E DESENVOLVIMENTO**. 2020a. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós Graduação, Universidade Federal de Santa Maria Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2020.

SILVA, G. S.; BELTRAME, R. C.; SCHUCH, L.; RECH, C. **Hybrid AC Power Source Based on Modular Multilevel Converter and Linear Amplifier**", in IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 1, pp. 216–226, Jan. 2015.

SOCIEDADE DE ENGENHEIROS DA MOBILIDADE. Fórmula SAE BRASIL. São Paulo: **SAE BRASIL, 2024**. Disponível em: https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil/#google_vignette. Acesso em: 13 jul. 2024.

TALEBI, N.; SADRNI, M.A.; RAFIEI, S.M.R.. Current and voltage control of paralleled multi-module inverter systems. **2009 17Th Mediterranean Conference On Control And Automation**, [S.L.], p. 1-1, jun. 2009. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/med.2009.5164759>.

VIDOR, Dalton L. R. *et al.* **Análise de conversores por modelos de similaridade com fontes**. In: SEMINÁRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E CONTROLE (SEPOC), 10., 2017a, Santa Maria. Anais. Santa Maria: IEEE; Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Disponível em: https://drive.google.com/drive/folders/1t1Ys0tcbFX4kozsvj0vbS4dL5fN_3D5t. Acesso em: 25 jun. 2023.

VIDOR, Dalton L. R. *et al.* **Conversor série chaveado-linear (SL)**. In: SEMINÁRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E CONTROLE (SEPOC), 10., 2017b, Santa Maria. Anais. Santa Maria: IEEE; Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Disponível em: https://drive.google.com/drive/folders/1t1Ys0tcbFX4kozsvj0vbS4dL5fN_3D5t. Acesso em: 25 jun. 2023.

VIDOR, Dalton L.R. et al. **Conversores CC-CC e CC-CA híbridos série e paralelo**. Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Sociedade Brasileira de Automática (SBA), v. 1, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.20906/CBA2022/914>. Acesso em: 14 jul. 2024

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **CVW300 G2: manual do usuário**. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h72/h09/WEG-CVW300-G2-manual-do-usuario-10005423031-pt.pdf.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2024.

WU, T.; CHEN, Y.; HUANG, Y. 3C strategy for inverters in parallel operation achieving an equal current distribution. **Ieee Transactions On Industrial Electronics**, [S.L.], v. 47, n. 2, p. 273-281, abr. 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/41.836342>.

INTERNATIONAL RECTIFIER. **HV floating MOS-Gate driver ICs**. 2007. Disponível em: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-HV_Floating_MOS_Gate_Drivers-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4626c1f3dc3016c47de609d140a. Acesso em: 2 jun. 2023.

EMRAX. User manual for EMRAX motors. Version 4.5. January 2017. Disponível em: https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/01/user_manual_for_emrax_motors_january_2017_version_4.5.pdf. Acesso em: 18 jul. 2024.