

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCEL MACIEL FERNANDES

**ESTUDO DE CONVERSORES CA-CA PARA APLICAÇÃO EM MORE ELECTRIC
AIRCRAFTS (MEA)**

JOINVILLE

2024

MARCEL MACIEL FERNANDES

**ESTUDO DE CONVERSORES CA-CA PARA APLICAÇÃO EM MORE ELECTRIC
AIRCRAFTS (MEA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Programa de Graduação em Engenharia Elétrica
do Centro de Ciências Tecnológicas da Univer-
sidade do Estado de Santa Catarina, como requi-
sito parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica

Orientador: Sérgio Vidal Garcia Oliveira

JOINVILLE

2024

Dedico este trabalho à memória do meu pai.
Sua sabedoria e amor incondicional continuam
a guiar meus passos. Este TCC é uma
homenagem ao seu legado e aos valores que me
ensinou.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a minha mãe que sempre esteve ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador Sergio Vidal Garcia Oliveira, pela orientação, paciência e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho. Suas sugestões e feedbacks foram fundamentais para a sua conclusão.

Agradeço também aos professores do DEE, cujas aulas e conselhos enriqueceram meu conhecimento e foram essenciais para a realização deste estudo.

Não posso deixar de mencionar meus colegas do Núcleo de Processamento de Energia Elétrica, cuja colaboração e troca de ideias foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Suas críticas construtivas e apoio foram muito valiosos.

*“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com
o tempo que nos é dado.” (GANDALF)*

RESUMO

Este trabalho investiga o desempenho de diferentes topologias de conversores CA-CA para aplicações em More Electric Aircraft (MEA). A pesquisa explora as vantagens dos conversores matriciais diretos e indiretos e o conversor *back-to-back*, realizando simulações para avaliar as suas figuras de mérito sob diferentes condições operacionais. Os resultados indicam que os conversores oferecem alta eficiência e densidade de potência, sendo promissores para a redução do consumo de combustível e emissões na aviação. No entanto, desafios como controle preciso e mitigação de EMI precisam ser abordados. Conclui-se que a adoção dessas tecnologias pode contribuir significativamente para a sustentabilidade da indústria aeronáutica, mas requer avanços adicionais em controle e fabricação.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência. More Electric Aircraft. Conversor Matricial. Semicondutores.

ABSTRACT

This work investigates the performance of different AC-AC converter topologies for applications in More Electric Aircraft (MEA). The research explores the advantages of direct and indirect matrix converters and the back-to-back converter, conducting simulations to evaluate their figures of merit under different operational conditions. The results indicate that the converters offer high efficiency and power density, making them promising for reducing fuel consumption and emissions in aviation. However, challenges such as precise control and EMI mitigation need to be addressed. It is concluded that the adoption of these technologies can significantly contribute to the sustainability of the aviation industry but requires further advancements in control and manufacturing.

Keywords: Power Electronics. More Electric Aircraft. Matrix Converter. Semiconductors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cargas em uma Aeronave.	17
Figura 2 – Distribuição com Frequência Constante.	19
Figura 3 – Distribuição com Frequência Variável.	20
Figura 4 – Distribuição com Corrente Contínua.	21
Figura 5 – Conversor Matricial Direto.	24
Figura 6 – Conversor Matricial Indireto.	25
Figura 7 – Conversor Back-to-Back.	26
Figura 8 – Arranjo bidirecional com ponte de diodos.	28
Figura 9 – Arranjo bidirecional coletor comum.	29
Figura 10 – Arranjo bidirecional emissor comum.	29
Figura 11 – Arranjo bidirecional chaves em anti paralelo.	29
Figura 12 – Comparação entre Silício, Carbetto de Silício e Nitreto de Gálio.	31
Figura 13 – Simulação de exemplo no <i>Simulink</i>	33
Figura 14 – Degrau de torque.	34
Figura 15 – Tensão de entrada em 400 Hz.	34
Figura 16 – Tensão de entrada em 800 Hz.	35
Figura 17 – Etapa de potência do CMC.	36
Figura 18 – Controlador.	36
Figura 19 – Cálculo dos Tempos.	37
Figura 20 – Geração dos Tempos.	37
Figura 21 – Geração dos Pulsos de comando.	38
Figura 22 – Conversor Matrcial Indireto simulado no PSIM.	39
Figura 23 – Sistema de blocos do Modulador.	39
Figura 24 – Conversor Back-to-Back simulado no PSIM.	40
Figura 25 – Corrente de entrada do CMC.	41
Figura 26 – Corrente de entrada do IMC.	41
Figura 27 – Corrente de entrada do conversor Back-to-Back.	41
Figura 28 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do CMC.	42
Figura 29 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do IMC.	42
Figura 30 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do conversor Back-to-Back	43
Figura 31 – Tensão de Linha de Saída do CMC.	43
Figura 32 – Tensão de Linha de Saída do IMC.	44
Figura 33 – Tensão de Linha de Saída do conversor Back-to-Back.	44
Figura 34 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do CMC.	45
Figura 35 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do IMC.	45
Figura 36 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do conversor Back-to-Back.	46

Figura 37 – Corrente de Saída do CMC.	46
Figura 38 – Corrente de Saída do IMC.	47
Figura 39 – Corrente de Saída do conversor Back-to-Back.	47
Figura 40 – Corrente de Saída do CMC em Regime Permanente.	48
Figura 41 – Corrente de Saída do IMC em Regime Permanente.	48
Figura 42 – Corrente de Saída do conversor Back-to-Back em Regime Permanente.	48
Figura 43 – Corrente de entrada do CMC.	49
Figura 44 – Corrente de entrada do IMC.	49
Figura 45 – Corrente de entrada do conversor Back-to-Back.	50
Figura 46 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do CMC.	50
Figura 47 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do IMC.	51
Figura 48 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do conversor Back-to-Back	51
Figura 49 – Tensão de Linha de Saída do CMC.	51
Figura 50 – Tensão de Linha de Saída do IMC.	52
Figura 51 – Tensão de Linha de Saída do conversor Back-to-Back.	52
Figura 52 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do CMC.	53
Figura 53 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do IMC.	53
Figura 54 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do conversor Back-to-Back.	53
Figura 55 – Corrente de Saída do CMC.	54
Figura 56 – Corrente de Saída do IMC.	54
Figura 57 – Corrente de Saída do conversor Back-to-Back.	54
Figura 58 – Corrente de Saída do CMC em Regime Permanente.	55
Figura 59 – Corrente de Saída do IMC em Regime Permanente.	55
Figura 60 – Corrente de Saída do conversor Back-to-Back em Regime Permanente.	55
Figura 61 – Velocidade do motor.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros Nominais de saída dos Conversores	32
Tabela 2 – Parâmetros de Simulação	34
Tabela 3 – Parâmetros de Simulação do motor	35
Tabela 4 – Rendimento do Motor	57
Tabela 5 – Dados referentes a entrada dos conversores.	58
Tabela 6 – Dados referentes a saída dos conversores.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APU	Auxiliary Power Unit
ATRU	Auto Tranformer Retifier Unit
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CMC	Conversor Matricial Convencional
CSCF	Constant Speed/Constant Frequency
CSD	Constant Speed Drive
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
GEN	Gerador de Energia
HVDC	High Voltage Direct Current
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
IMC	Indirect Matricial Converter
MEA	More Electric Aircraft
NPC	Neutral Point Clamped
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TRU	Transformer Retifier Unit
VSI	Voltage Source Inverter
VSVF	Variable Speed/Variable Frequency

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcento
$^{\circ}$	Graus
CO_2	Dióxido de Carbono
SiC	Carbeto de Sílício
GaN	Nitreto de Gálio
ω	Velocidade angular
τ	Torque
v	Velocidade no eixo do motor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3	METODOLOGIA	16
2	FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	CARGAS EM MEAS	17
2.2	TOPOLOGIA DOS MEAS	18
2.2.1	Geração	18
2.2.1.1	<i>Velocidade Constante / Frequência Constante (CSCF)</i>	18
2.2.1.2	<i>Velocidade Variável / Frequência Variável (VSVF)</i>	18
2.2.2	Distribuição	18
2.2.2.1	<i>Distribuição com Frequência Constante</i>	19
2.2.2.2	<i>Distribuição com Frequência Variável</i>	20
2.2.2.3	<i>Distribuição em Corrente Contínua</i>	21
2.3	NORMA MIL-STD-704F	22
2.4	CONVERSORES NOS MEAS	22
2.4.1	Conversão CA-CA	22
2.4.1.1	<i>Cicloconvertidores</i>	23
2.4.1.2	<i>Conversor Matricial Direto</i>	23
2.4.1.3	<i>Conversor Matricial Indireto</i>	24
2.4.1.4	<i>Conversor Back-to-Back</i>	26
2.4.2	Conversão CA-CC	27
2.4.3	Conversão CC-CC	27
2.4.4	Conversão CC-CA	28
2.5	SEMICONDUCTORES	28
2.5.1	Dispositivos de Silício	30
2.5.2	Dispositivos de SiC e GaN	30
2.5.3	Si x SiC x GaN	31
3	DESENVOLVIMENTO	32
3.1	PARÂMETROS DA NORMA MIL-STD	32
3.2	MODULAÇÃO	32
3.3	SIMULAÇÃO	33
3.3.1	Conversor Matricial Direto	35
3.3.2	Conversor Matricial Indireto	38
3.3.3	Conversor Back-to-Back	39

3.4	RESULTADOS	40
3.4.1	Entrada com 400 Hz	40
3.4.2	Entrada com 800 Hz	49
3.4.3	Carga	56
3.5	DISCUSSÃO	57
4	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

More Electric Aircraft (MEA) é um termo utilizado para descrever a próxima geração de aeronaves que utiliza tecnologias avançadas para substituir sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos por sistemas elétricos. A principal vantagem dos MEAs é a eficiência energética, o que leva a reduções significativas no consumo de combustível e nas emissões de gases do efeito estufa.

Desde a criação no início do século XX, as aeronaves passaram por um enorme desenvolvimento tecnológico até chegar no que são hoje em dia, começando com modelos movidos a motores de pistão refrigerados a ar, onde uma hélice era utilizada para dar a partida no motor, passando pela era dos aviões a jato, onde o motor era movido por explosão de gases em alta velocidade, chegando na era moderna, onde foram implementados os primeiros sistemas de controle junto da implementação da eletrônica, a era digital, onde os sistemas digitais passaram a substituir os analógicos nas aeronaves, chegando nos MEAs, onde busca a substituição dos sistemas hidráulicos e pneumáticos por sistemas elétricos.

O estudo de conversores aplicados em aeronaves é de suma importância para aprimorar a confiabilidade e a eficiência energética das aeronaves. Para isso, é necessário estudar como o conversor se comporta em condições como pressão atmosférica menor, temperaturas mais baixas e vibrações resultantes de turbulência por exemplo. É necessário entender como os dispositivos semicondutores se comportam nessas condições, analisando tempo de comutação, perdas e interferências eletromagnéticas devido aos equipamentos de transmissão e recepção de sinais e outros conversores presentes nas aeronaves.

Com o aumento da preocupação com o bem estar ambiental, também se iniciou uma corrida para otimizar tecnologias que geram algum tipo de dano ao meio ambiente, como a queima de combustíveis presente em veículos e em aeronaves, além de pesquisas para a criação de novas tecnologias sustentáveis para minimizar ou até mesmo extinguir a geração de CO_2 .

Existe uma expectativa de que no futuro existam aeronaves com propulsão elétrica híbrida e com propulsão totalmente elétrica, que teriam o potencial de reduzir ainda mais as emissões de gases e o ruído das aeronaves. Essas aeronaves seriam fabricadas com materiais mais leves, como fibra de carbono para reduzir o seu peso e aumentar a eficiência.

Os MEAs são projetados com um sistema elétrico distribuído que alimenta todos os componentes elétricos, como motores, atuadores, sistemas de ar condicionado e iluminação, eliminando assim a necessidade de sistemas hidráulicos ou pneumáticos, que são mais volumosos e têm menor eficiência. Além disso, os sistemas elétricos distribuídos são capazes de fornecer energia de forma mais precisa e eficiente para os diversos sistemas e componentes de uma aeronave, o que permite um melhor desempenho e maior segurança.

Os sistemas elétricos de uma aeronave devem ser projetados para cumprir com diversos parâmetros impostos por norma, a fim de evitar falhas catastróficas, por isso existe uma certa redundância de conversores de energia para que, caso um venha a falhar, outro conversor esteja

pronto para suprir o que veio a falhar.

Além da eficiência energética, os MEAs oferecem outras vantagens, como maior confiabilidade, menor necessidade de manutenção e menor custo total de propriedade. Os MEAs também permitem maior flexibilidade de projeto e oferecem uma plataforma que possibilita a integração de novas tecnologias, como aeronaves com motores elétricos ou híbridos-elétricos, bem como sistemas avançados de armazenamento de energia.

Os MEAs são particularmente importantes no contexto das preocupações com a sustentabilidade ambiental, já que a indústria da aviação é responsável por uma parcela significativa das emissões de gases do efeito estufa, cerca de 2,4%. A utilização de sistemas elétricos distribuídos e outras tecnologias avançadas pode ajudar a reduzir as emissões de carbono da aviação e contribuir para um futuro mais sustentável.

O projeto dos conversores de energia é de suma importância para o funcionamento do sistema elétrico de uma aeronave, a fim de garantir energia de qualidade para as cargas presentes no sistema.

Em resumo, os MEAs representam uma evolução importante na indústria da aviação, proporcionando benefícios significativos em termos de eficiência, desempenho, confiabilidade e sustentabilidade. À medida que novas tecnologias continuam a ser desenvolvidas e integradas em aeronaves, os benefícios dos MEAs só tendem a aumentar.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar as diferentes topologias dos MEAs desde o sistema de geração, passando pela distribuição, os diferentes tipos de conversores de potência que podem ser utilizados com foco nos conversores CA-CA presentes nos MEAs, até as tecnologias dos dispositivos semicondutores usados nos conversores. A estrutura deste trabalho começa no capítulo um com esta introdução seguida dos objetivos, seguinte no capítulo dois a revisão bibliográfica sobre o sistemas elétricos presentes nas aeronaves e também dos conversores utilizados e as tecnologias de semicondutores que podem ser utilizados em uma aeronave, as hipóteses são apresentadas no capítulo três, no capítulo quatro é apresentada a metodologia utilizada no trabalho, o capítulo cinco é o desenvolvimento do trabalho, mostrando as simulações, seus resultados e a discussão, e por fim a conclusão no capítulo seis.

1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo sobre os diferentes tipos de conversores CA-CA utilizados em MEAs, focando na análise comparativa de suas respectivas figuras de mérito. Este estudo buscará identificar os principais parâmetros de desempenho de cada conversor. A comparação será fundamentada em critérios técnicos e operacionais, visando determinar qual conversor oferece as maiores vantagens para aplicação em aeronaves.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar uma revisão das diferentes topologias de More Electric Aircraft (MEA), identificando suas principais características e aplicações em aeronaves.;
- b) Investigar as diversas topologias de conversores CA-CA utilizados em MEAs, detalhando os princípios de funcionamento e as principais configurações;
- c) Executar simulações computacionais para avaliar o desempenho das topologias de conversores CA-CA sob diferentes condições operacionais;
- d) Comparar os resultados das simulações para determinar a topologia de conversor CA-CA mais vantajosa para aplicação em aeronaves, com base nas figuras de mérito.

1.3 METODOLOGIA

Como metodologia proposta serão abordadas três topologias de conversores CA-CA que podem estar presentes nos MEAs, sendo elas o conversor matricial direto, conversor matricial indireto e o conversor Back-to-Back, seguindo as referências [1], [2] e [3], para uma melhor organização, o trabalho será dividido nas seguintes etapas:

1ª Etapa: Estudo da norma MIL-STD-704F.

Essa é a norma que regulamenta os conversores de potência presentes em aeronaves. Nesta etapa será feito um estudo da norma, para definir os parâmetros utilizados no modelamento dos conversores.

2ª Etapa: Estudo do método de modulação dos conversores CA-CA escolhidos.

Nesta etapa será estudado a modulação que geralmente é empregada nesse tipo de conversor, como a modulação PWM ou modulação por espaço vetorial.

3ª Etapa: Simulação dos três conversores em software.

Nesta etapa será feita a simulação de cada conversor proposto, utilizando softwares como MatLab, PSIM e LTSpice. Objetivando estabelecer métricas de comparação como valores de tensão, corrente, fator de potência, distorção harmônica e rendimento.

4ª Etapa: Comparação e análise dos resultados.

Nesta etapa serão comparados os resultados da simulação, identificando as principais figuras de mérito dos conversores.

2 FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados as principais topologias do sistema elétrico de uma aeronave, os tipos de conversão de que energia podem ser utilizados para alimentar as cargas presentes em uma aeronave, além de comentar as tecnologias de semicondutores que podem ser aplicados nos conversores dos MEAs.

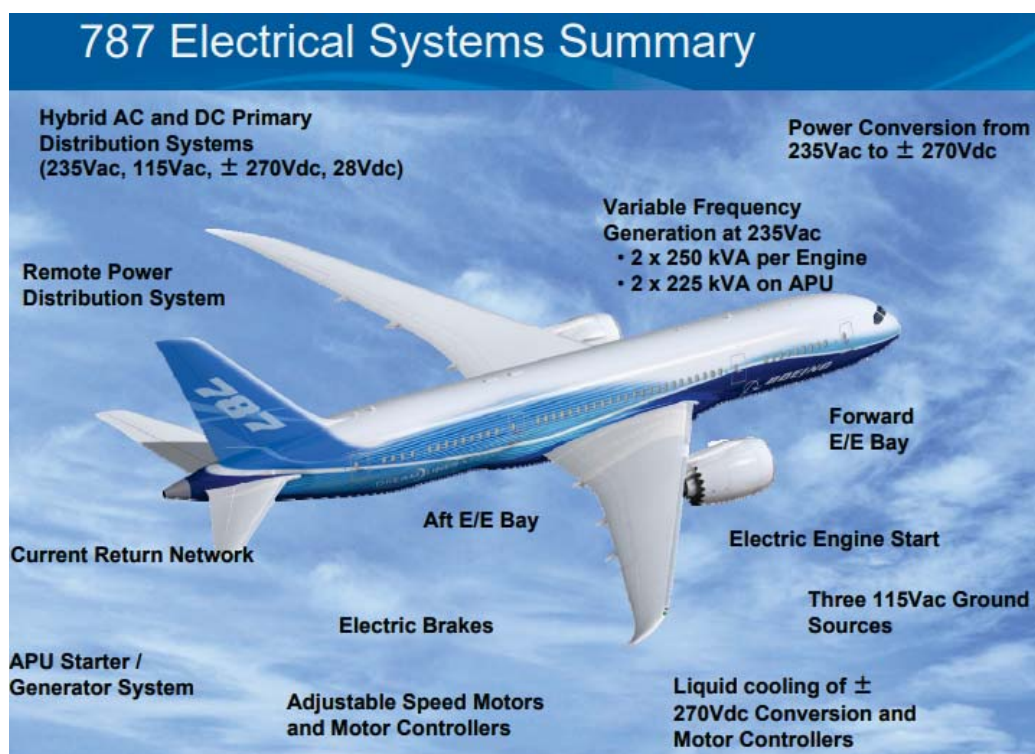
2.1 CARGAS EM MEAS

Em primeiro lugar é preciso buscar quais são os subsistemas de uma aeronave que são alimentados eletricamente. Dentro de uma aeronave existem sistemas para garantir a segurança do voo e o conforto dos passageiros, são esses sistemas que irão consumir energia elétrica, ou seja, são as cargas elétricas da aeronave, mas que tipos de carga existem dentro de uma aeronave?

Em um Boeing 787, por exemplo, este possui um total de 1MW de carga instalada, sendo esse 1MW distribuídos entre os sistemas, partindo do mais simples como iluminação, condicionadores de ar, áudio, vídeo e internet até os mais sofisticados como sistema anticongelante das asas, controladores de voo, controladores de pressão, entre outros [4].

Na Figura 1 é apresentado um sumário do sistema elétrico de um Boeing 787 onde é importante destacar a geração com frequência variável e um sistema de distribuição híbrido, ou seja, distribuição por frequência variável e distribuição por corrente contínua. As cargas podem variar para cada tipo de aeronave, nesse caso é um avião de grande porte.

Figura 1 – Cargas em uma Aeronave.



Fonte: [4].

2.2 TOPOLOGIA DOS MEAS

As topologias do sistema elétrico de potência de uma aeronave podem ser dividida em geração e distribuição de energia. Essas arquiteturas ainda podem ser subdivididas, a geração pode ser classificada como: Velocidade Constante / Frequência Constante (*Constant speed / Constant Frequency-CSCF*) ou Velocidade Variável / Frequência Variável (*Variable speed / Variable Frequency-VSVF*) e a distribuição pode ser classificada como Frequência Constante, Frequência Variável e em Corrente Contínua.

2.2.1 Geração

Nesta seção serão apresentadas a duas formas de geração elétrica de uma aeronave, essa geração que é normalmente feita com geradores síncronos, o controle da tensão é feito por uma unidade de controle de geração e podem ser de frequência constante ou variável.

2.2.1.1 Velocidade Constante / Frequência Constante (CSCF)

Segundo [5], nessa arquitetura o gerador é conectado ao motor principal da aeronave por meio de um acionamento mecânico, esse que é chamado de Drive de Velocidade Constante (*Constant Speed Drive-CSD*), esse que tem a função de manter a velocidade da aeronave constante e consequentemente a sua frequência se mantém constante.

2.2.1.2 Velocidade Variável / Frequência Variável (VSVF)

Nessa arquitetura não existe conexão entre o motor principal e o gerador. Então as frequências variam proporcionalmente de acordo com a velocidade do motor, essa frequência, dependendo do modelo de aeronave, pode variar entre os valores de 350 Hz e 800 Hz. A tensão de saída pode ser convertida em tensão CA com frequência constante ou em tensão CC próximas ao gerador ou em outra localização próxima das cargas. A maior vantagem desses sistemas são melhoras do sistemas de partida, outras vantagens são a alta confiabilidade, menos custos, tempos de ciclos de trabalho menores [5], [6] e como o gerador pode ser instalado próximo do motor ou das cargas, isso permite uma melhor otimização da distribuição de peso da aeronave [7].

2.2.2 Distribuição

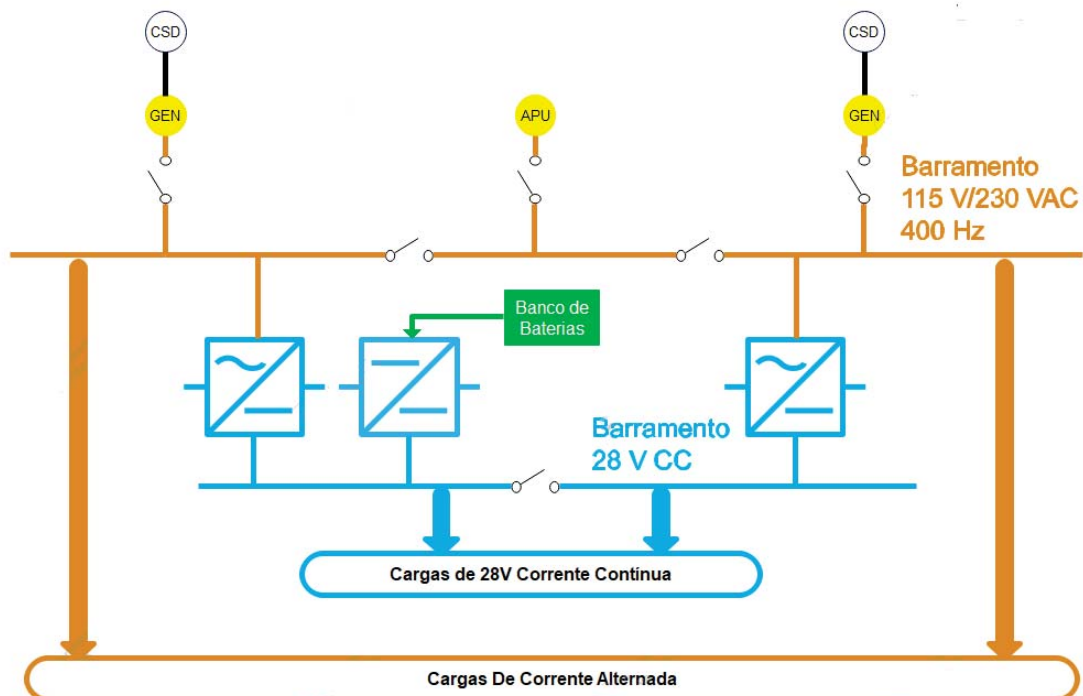
Após a geração vem a distribuição que faz a interligação de diferentes barramentos por meio de chaves contadoras, seja para alimentar as cargas diretamente ou por meio de conversores de potência. A distribuição pode ser por frequência constante, frequência variável ou por corrente contínua.

2.2.2.1 Distribuição com Frequência Constante

Esse tipo de distribuição pode ser fornecido tanto por CSCF quanto por VSVF. No VSVF, o conversor CA-CA converte a frequência variável do gerador em frequência constante e, a partir desse ponto, faz a distribuição das cargas. Uma desvantagem desse caso, é que o conversor deve processar toda a potência do gerador, além de possuir uma alta confiabilidade para atingir o nível de segurança exigido para uma aeronave, além de que algumas das principais cargas da aeronave precisam que o conversor de potência esteja instalado próximos e em alguns casos é preciso instalar conversores adicionais próximos as cargas [5].

Na Figura 2, é apresentado um exemplo de distribuição com frequência constante. Nela, pode-se observar que, além dos geradores conectados ao CSD, há uma unidade auxiliar de potência (APU) responsável por prover energia quando a aeronave está no solo e em condições de emergência. Além disso, há um conversor CC-CC conectado a um banco de baterias, que é responsável por fornecer energia transitória, ou seja, enquanto os conversores não estão em regime permanente. O banco de baterias serve para armazenar a energia regenerativa, fornecer energia em caso de emergência, equilibrar a potência CC retificada dos geradores CA e auxiliar na partida do motor.

Figura 2 – Distribuição com Frequência Constante.



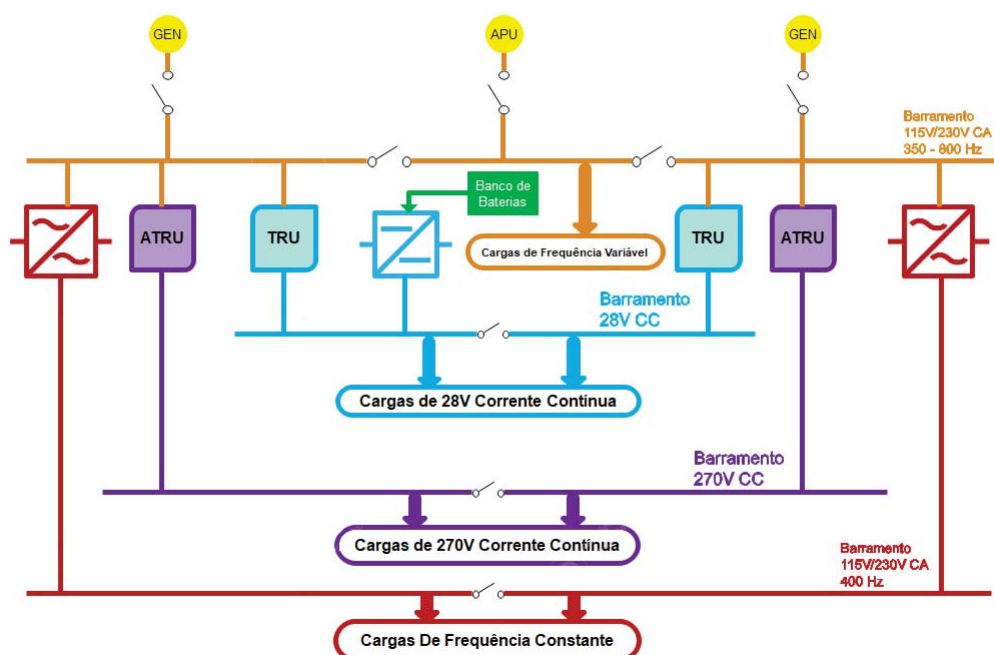
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em [5].

2.2.2.2 Distribuição com Frequência Variável

Essa topologia só pode ser fornecida por distribuição VSVF, essa distribuição acontece sem nenhum tipo de interface entre gerador e barramento e é convertido para a tensão CA necessária ou tensões CC dependendo das cargas e suas localizações. A confiabilidade desse sistema é maior quando existem muitos conversores de potência distribuídos no sistema, permitindo mais redundâncias no sistema a fim de evitar falhas. Outra vantagem desse sistema é que ele não necessita de conversores com a potência nominal do gerador. Porém, os equipamentos de suporte como bombas e ventoinhas, precisam ser relativamente maiores se forem alimentados pelo barramento de frequência variável. Por outro lado, cargas como o sistema de descongelamento das asas, fornos e aquecedores de bordo são insensíveis à frequência, pois são cargas resistivas, podendo ser conectados diretamente no barramento de frequência variável sem a necessidade de um conversor de potência.

Na Figura 3 é apresentado um exemplo de distribuição com frequência variável, nela pode ser observado que os geradores são conectados ao motor, além de uma APU para casos de emergência, porém agora como o gerador está conectado diretamente ao motor são necessários conversores CA-CA para gerar uma frequência constante para determinadas cargas e também o sistema utiliza de unidades retificadoras autotransformadoras (ATRU) e unidades transformadoras retificadoras para fazer a conversão CA-CC, além de manter o banco de baterias para auxiliar na partida e em casos de emergência [5].

Figura 3 – Distribuição com Frequência Variável.



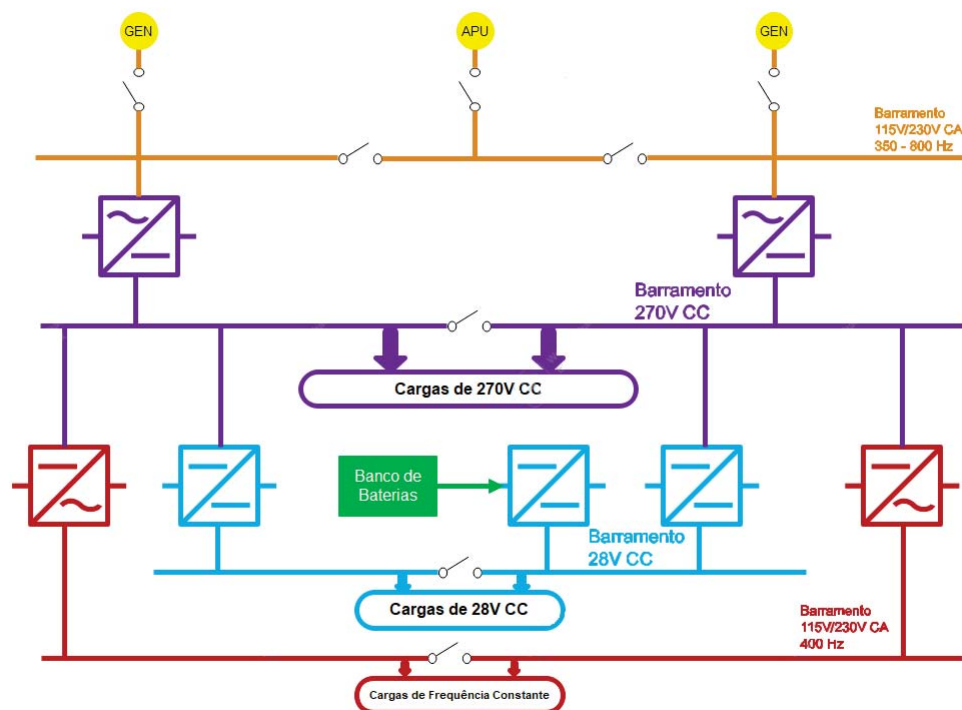
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em [5].

2.2.2.3 Distribuição em Corrente Contínua

Nesta topologia de distribuição, existe a conversão de tensão com frequência variável em tensão contínua com valor de 270VDC, por meio de retificadores, essa conversão é conhecida como Alta Tensão Corrente Contínua (*High Voltage Direct Current (HVDC)*) na indústria aeronáutica. É mais fácil fazer o acoplamento entre a fonte principal e os dispositivos de armazenamento nesse caso e a rede de distribuição de energia é menor do que em outras topologias. É também uma melhor opção quando existem problemas com o efeito *skin* na distribuição e quando é necessário aumentar o número de elementos armazenadores de energia no sistema. Além disso, são necessários apenas dois cabos para a distribuição, o que leva a um menor número de conversores de potência. Mas as principais desvantagens dessa topologia são a segurança e as falhas no sistema devido ao efeito corona e à quebra de isolamento.

Na Figura 4 é apresentado um exemplo de distribuição em corrente contínua, nela pode ser observado que a distribuição se dá a partir de um conversor CA-CC ligado ao gerador, criando um barramento de 270V de corrente contínua, conversores CC-CC para as cargas de corrente contínua, além de utilizar inversores para alimentar as cargas de frequência constante e ainda um banco de baterias para armazenar energia [5].

Figura 4 – Distribuição com Corrente Contínua.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em [5].

2.3 NORMA MIL-STD-704F

A norma MIL-STD-704F é um padrão militar dos Estados Unidos que estabelece requisitos para o fornecimento de energia elétrica a aeronaves. Essa norma foi desenvolvida pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos e é parte de uma série de padrões conhecidos como *Military Standard* (MIL-STD), que definem critérios técnicos e de desempenho para garantir a interoperabilidade e confiabilidade dos equipamentos militares em sua maioria.

Especificamente, a MIL-STD-704F trata das características elétricas dos sistemas de energia a bordo de aeronaves, como frequências, tensões, interferência eletromagnéticas (*EMI*), variações aceitáveis e qualidade da energia elétrica. A norma fornece diretrizes para garantir que os sistemas elétricos das aeronaves atendam aos requisitos operacionais e de segurança.

2.4 CONVERSORES NOS MEAS

Para cada tipo de topologia dos MEA, são empregados determinados conversores de energia compatíveis de acordo com a topologia de geração e distribuição da aeronave. Em distribuição com frequência constante são necessários apenas conversores CA-CC de 115V ou 230V e 400Hz para 28V CC, já na distribuição com frequência variável, são necessários conversores CA-CA de 115V ou 230V de 350-800Hz para 115V ou 230V e 400Hz, conversores CA-CC de 115V ou 230V 350-800Hz para 28V DC, e conversores CA-CC de 115V ou 230V 350-800Hz para 270V DC e na distribuição por corrente contínua são necessários conversores CA-CC 115V ou 230V 350-800Hz para 270V DC, inversores, onde a amplitude e a frequência vão depender da carga e conversores CC-CC de 270V CC para 28V CC. Esses parâmetros são definidos em acordo com a norma MIL-STD-704F que determina as características de potência em uma aeronave. Nesta seção serão abordadas os tipos de conversão de energia com exemplos de conversores que podem realizá-las [5]. Os valores de potência nominal dos conversores variam de acordo com o seu sistema elétrico, para exemplificar será usado como base o sistema elétrico de um Boeing 787.

2.4.1 Conversão CA-CA

Para um MEA, é fundamental que tanto a saída como a entrada possuam características senoidais, baixo conteúdo harmônico e alto fator de potência. Os conversores CA-CA possuem valores nominais que variam de 15kVA até 90kVA, já que em alguns casos eles estão conectados diretamente no gerador elétrico da aeronave. Um conversor muito utilizado e que pode ser implementado em um MEA, é o conversor conhecido como Back-to-Back, esse que é um conversor de forma indireta e possui elementos de armazenamento no barramento CC, o que implica na diminuição da vida útil do conversor, aumenta a sua complexidade e reduz seu desempenho. Já a conversão de forma direta pode ser feita de duas maneiras, por ciclo conversores ou por um conversor matricial [5], [8].

Ainda sobre a conversão CA em uma aeronave não é permitido ter potência regenerativa, a fim de evitar instabilidade ou até mesmo a perda de um gerador, e também devido as soluções de armazenamento de energia CA, portanto apenas topologias unidirecionais são utilizadas para para esse tipo de conversão, a fim de evitar problemas no barramento CA da aeronave [9].

O estudo realizado em [10], comparou os conversores matriciais diretos e indiretos em termos de densidade de potência e eficiência com conversor Back-to-Back. O estudo mostrou que conversores matriciais são inegavelmente mais densos em termo de potência, peso e volume, e são ligeiramente mais eficiente do que conversores Back-to-Back.

2.4.1.1 *Cicloconversores*

Um cicloconversor consegue converter de forma direta uma frequência de entrada em outra frequência na saída, além de controlar a amplitude da forma de onda de saída pelo ângulo de disparo do tiristores. Porém a forma de onda da saída não é uma senoide, falhas de comutação podem ocorrer a qualquer momento e a potência do gerador de entrada do ciclo conversor deve produzir duas vezes a potência requerida pelo sistema [5]. Um fator que também pesa contra os cicloconversores, é o fato de que a máxima frequência de saída é a mesma da entrada.

2.4.1.2 *Conversor Matricial Direto*

Uma alternativa para a conversão CA-CA é o conversor matricial convencional - CMC (*Conventional Matrix Converter*) ou como é conhecido, o conversor matricial direto. Esse tipo de topologia faz uma conexão direta e independente entre as três fases de entrada e as três fases de saída. Essa topologia pode apresentar [1]:

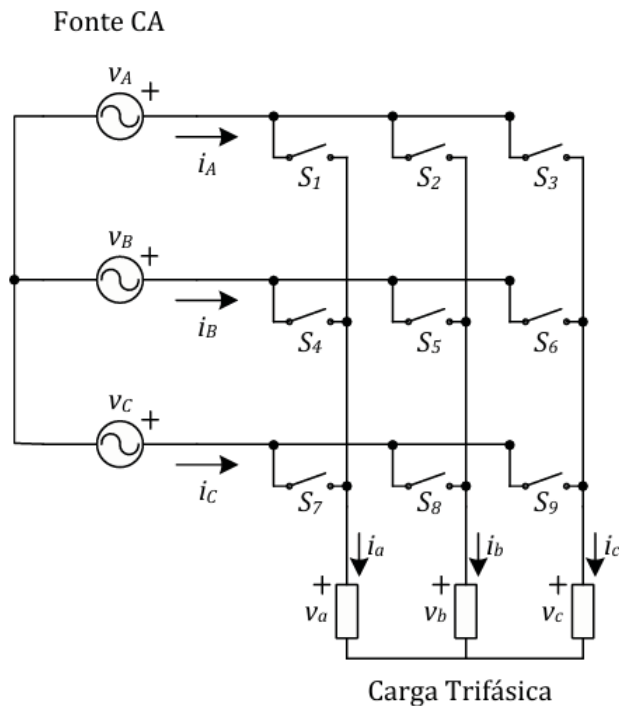
- Circuito compacto;
- Modulação da tensão de saída com amplitude e frequência ajustáveis;
- Corrente com características senoidais na entrada;
- Operação com fator de deslocamento unitário na entrada e com qualquer tipo de carga na saída;
- Operação em quatro quadrantes.

Possuí esse nome por causa do método como é realizada a conversão, onde uma entrada trifásica é ligada em um arranjo de interruptores e a saída desse arranjo é conectada em uma carga, essa é uma conversão direta, dependendo apenas do índice de modulação dos interruptores, sendo possível controlar tensão, corrente e frequência de saída. Os interruptores da matriz são organizados de um modo que formam uma matriz 3x3. Porém a tensão de saída gerada é menor que a tensão de entrada, por isso seria necessário alimentar o sistema com 230 – 380V para que

o conversor matricial pudesse alimentar os subsistemas com 115 – 230V, além deste ser um conversor não isolado [5], [1].

A topologia é apresentada na Figura 5. Onde mostra um CMC de saída trifásica conectada a uma rede também trifásica. A carga é apresetada como um arranjo de impedâncias que representam a carga alimentada pelo CMC.

Figura 5 – Conversor Matricial Direto.



Fonte: [1].

O CMC possui um arranjo de nove interruptores bidirecionais que fazem a conexão da entrada com a saída, as tensão e correntes sintetizadas pelo CMC se dão pelo acionamento desses interruptores por determinados períodos de tempo. Portanto, sendo que cada interruptor tem dois estados, aberto e fechado, é possível obter 512 combinações, porém como existem restrições como, não curto-circuitar as fase de entrada ou interromper a corrente em alguma fase de saída, o número de combinações cai para 27. Uma técnica de comutação muito utilizadas para esse conversor é a Modulação por Espaços Vetoriais - SVM (*Space Vector Modulation*), essa técnica baseia-se na determinação dos períodos em que uma combinação de interruptores do conversor permanecem nos estados ligado e desligado em função da posição instantânea de um vetor espacial.

2.4.1.3 Conversor Matricial Indireto

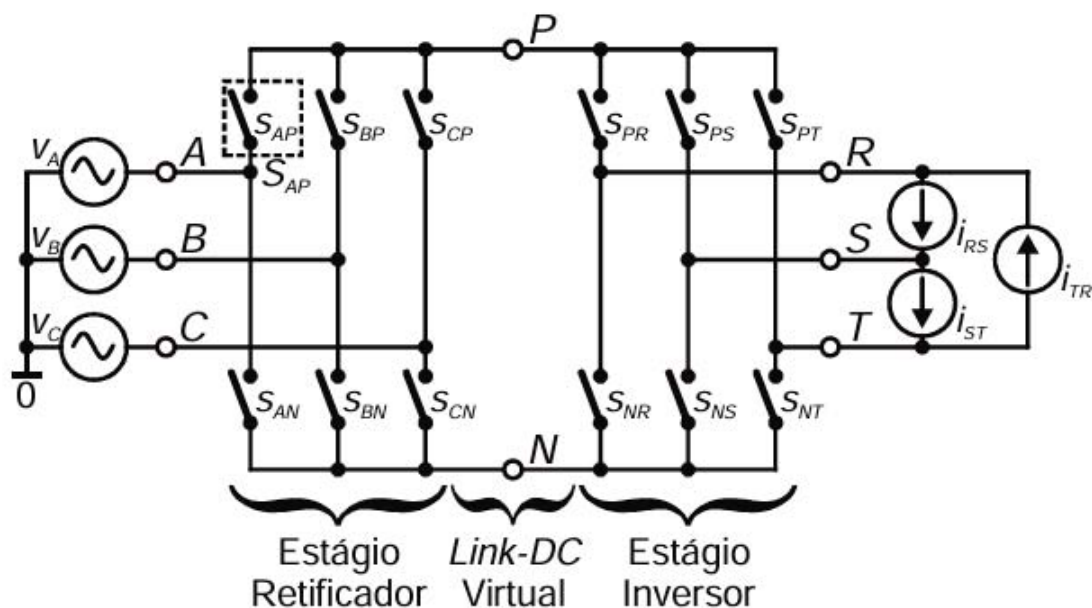
Para a conversão CA-CA de energia também pode ser usado um conversor matricial de dois estágios conhecido como Conversor Matricial Indireto - IMC (*Indirect Matrix Converter*), o

IMC apresenta desempenho similar com o CMC e apresenta as seguintes vantagens:

- Mesmas vantagens do CMC, como: fator de deslocamento unitário, formas de onda senoidais que apresentam harmônicas apenas de alta ordem;
- Para o estágio inversor, algoritmos PWM convencionais podem ser utilizados, simplificando a modulação;
- As comutações do estágio retificador ocorrem com corrente nula, com isso os problemas de comutação forçada entre as fases de entrada do CMC não acontece com o IMC;
- Não necessita de componentes volumosos para o armazenamento de energia. Apenas um filtro CA na entrada, para filtrar as componentes de alta frequência;

Como desvantagem em relação ao CMC, o IMC apresenta maiores perdas de condução. No CMC a corrente passa apenas por um interruptor e um diodo enquanto no IMC a corrente passa por dois interruptores e um diodo. Na Figura 6 é apresentado a topologia básica de um IMC.

Figura 6 – Conversor Matricial Indireto.



Fonte: [2].

Assim como o CMC, o IMC na sua configuração clássica tem três entradas e três saídas, porém possui dois estágios, sendo os estágios retificador e inversor.

O estágio retificador possui três entradas e duas saídas. Este estágio é totalmente controlado, ou seja, além de possuir a função de retificador, é possível sintetizar uma tensão média de saída, já que os interruptores operam com comutação forçada e em alta frequência. Este é também um retificador com reversibilidade no fluxo de energia.

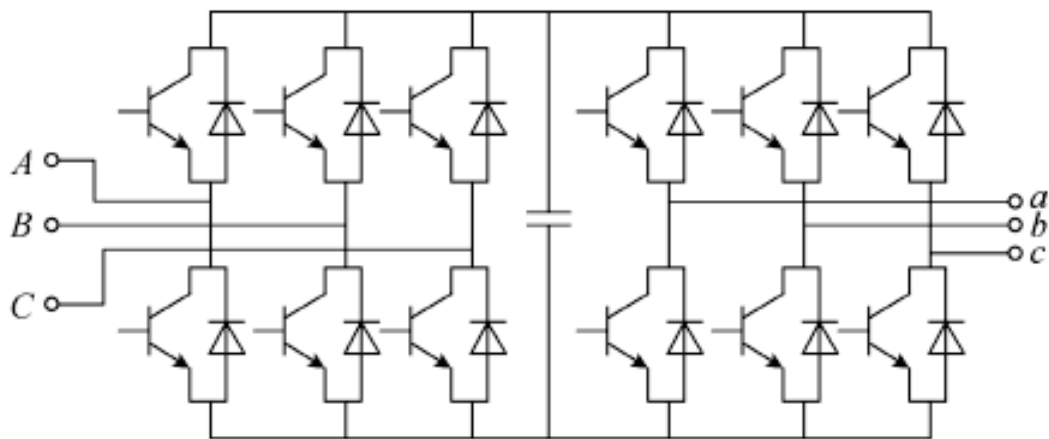
O estágio inversor possui duas entradas e três saídas. A comutação pode ser a mesma empregada em um VSI alimentado por uma fonte CC fixa, sendo a tensão média instantânea no barramento CC sintetizada pelo estágio retificador a entrada para o estágio inversor.

2.4.1.4 Conversor Back-to-Back

O conversor Back-to-Back é uma forma de conversor CA-CA indireto que, ao contrário dos conversores matriciais diretos, possui armazenamento de energia no seu barramento CC. Uma das principais vantagens do barramento CC é que ele elimina a necessidade de comunicação direta entre o controle do estágio retificador e o controle do estágio inversor, simplificando o design do controle e aumentando a robustez do sistema.

Na Figura 7, é possível observar a configuração típica de um conversor Back-to-Back. Este consiste em um retificador trifásico controlado na entrada, que converte a energia CA da rede em energia CC. Um capacitor é usado para representar o controle de tensão no barramento CC, fornecendo uma reserva de energia que ajuda a estabilizar a tensão e melhorar a qualidade da energia. Finalmente, um inversor trifásico na saída transforma a energia CC armazenada no barramento de volta em energia CA, ajustada para as necessidades específicas da carga ou da rede de saída.

Figura 7 – Conversor Back-to-Back.



Fonte: [11].

Essa configuração é amplamente utilizada em aplicações de sistemas de transmissão e distribuição de energia, bem como em sistemas de propulsão elétrica, como aqueles encontrados em More Electric Aircraft (MEA). Os conversores Back-to-Back permitem o controle preciso da tensão e da frequência da energia elétrica, oferecendo benefícios como redução de perdas e melhoria na qualidade da energia fornecida. Além disso, a presença do barramento CC proporciona uma maior flexibilidade no gerenciamento da energia, permitindo que os sistemas lidem melhor com variações de carga e instabilidades na rede, porém dependendo da energia que o conversor irá processar, o capacitor do barramento CC pode ser necessário uma capacitância

relativamente grande, aumentando o volume do conversor o que não é desejável em um sistema em que possui uma limitação de espaço.

2.4.2 Conversão CA-CC

Vários são os parâmetros a serem considerados quando se fala em conversão CA-CC para um MEA, entre eles estão a isolamento galvânica, complexidade, confiabilidade, filtro de interferência eletromagnética (EMI), perdas, temperaturas nos dissipadores e o número de semicondutores que serão empregados na conversão. O método mais simples para esse tipo de conversão é um retificador trifásico conhecido como Retificador ponte de Greatz, esse que possui seis pulsos na tensão de saída, porém possui alto conteúdo de harmônicas de corrente que não atendem aos requisitos de um MEA. Ainda pode ser empregado uma Unidade Transformador Retificador (TRU) ou uma Unidade Autotransformador Retificador (ATRU). Os valores nominais dos conversores CA-CC variam entre 1kW até 150kW. Para um MEA é preferível um retificador de doze ou dezoito pulsos na saída, ainda outras duas topologias podem ser usadas para a conversão CA-CC [5]. Retificador de Dois Níveis é um conversor PWM com a capacidade de processamento bidirecional de energia, dependendo da forma que é controlado.

Para evitar problemas de segurança e os efeitos adversos do efeito corona, que resultam do contato de um campo elétrico com partículas de ar ionizado e podem causar quedas de energia, é preferível empregar um retificador de três níveis NPC na indústria aeroespacial. Essa topologia reduz a amplitude das tensões aplicadas aos componentes, diminuindo a probabilidade de ionização do ar e, conseqüentemente, mitigando o efeito corona. Além disso, ao reduzir o estresse elétrico nos materiais isolantes, aumenta-se a confiabilidade e a segurança do sistema, resultando em uma conversão de energia mais eficiente e adequada para as exigências rigorosas das aplicações aeroespaciais. A sua ondulação de corrente na entrada CA é minimizada pela tensão em três níveis da saída fornecida pelo retificador. O NPC tem a capacidade de ser bidirecional e de diminuir os efeitos causados por EMI [12].

2.4.3 Conversão CC-CC

A conversão CC-CC pode ser fornecida por diferentes tipos de conversores de saída isolada com fluxo de potência bidirecional. Para um conversor CC-CC ser usado em aplicações aeronáuticas, é necessário cumprir alguns requerimentos, como alta densidade de potência, eficiência, confiabilidade e flexibilidade. Para garantir a segurança de um voo, é preciso que o conversor tenha uma rápida recuperação em caso de falha. Além disso o conversor precisa ser capaz de trabalhar em condições adversas, como trabalhar em ambientes com capacidade de resfriamento limitada, com quedas de pressão, vibrações mecânicas e interferências causadas por compatibilidade eletromagnética (EMC) ou raios. Os conversores CC-CC possuem valores nominais que variam de 300W até 15kW. As topologias mais simples de conversores CC-CC como o *flyback* ou *forward* não atendem os requisitos mínimos de eficiência para um MEA.

Como exemplo de conversores usados em aplicações aeronáutica, tem o Conversor Ressonante, o *Dual-Active Bridge* (DAB), o Conversor *Interleaved Boost* com indutor acoplado e o conversor multiportas [5].

2.4.4 Conversão CC-CA

Em caso de um MEA ser alimentado por distribuição CC, são necessários conversores CC-CA que irão disponibilizar uma saída com frequência controlada para as cargas. Alguns exemplos de conversores usados em aeronaves são a *Voltage Source Inverter* (VSI) de dois níveis, o *Neutral Point Clamped Inverter* (NPC) de três níveis e também mais recentemente vem sendo utilizado o *Current Source Inverter* (CSI). Em comparação entre ambos, o VSI possui uma estrutura mais simples, porém tem uma menor densidade de potência e eficiência, já o NPC precisa de filtros de EMI menores [5], o CSI precisa de um filtro capacitivo na saída e funciona muito bem em alta potência. Os inversores de um MEA possuem valores nominais que variam de 1kVA até 15kVA.

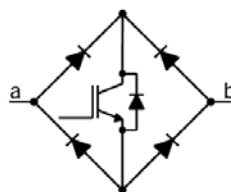
2.5 SEMICONDUTORES

Para a eletrônica de potência os dispositivos semicondutores são indispensáveis no que se trata de conversão de energia. Os dispositivos semicondutores de potência são capazes de lidar com correntes e tensões elétricas elevadas, e são utilizados em diversos sistemas de energia, como fontes de alimentação, inversores, conversores, acionamentos de motores, entre outros. Esses dispositivos são capazes de controlar o fluxo de energia elétrica com alta eficiência. Dentre os dispositivos semicondutores de potência mais comuns, destacam-se os diodos, os transistores e os circuitos integrados de potência. A eletrônica de potência é uma área em constante evolução, e o desenvolvimento de novos dispositivos semicondutores é essencial para a criação de sistemas de energia mais eficientes, confiáveis e sustentáveis [13], [14].

Em alguns casos é necessário que os interruptores permitam a passagem do fluxo de potência tanto da entrada para a saída, como o inversor. Para que cada interruptor seja bidirecional é necessário fazer um arranjo com os semicondutores [2].

A Figura 8 mostra um arranjo bidirecional composto de um interruptor IGBT e quatro diodos além do diodo intrínseco do IGBT.

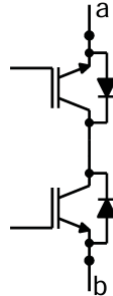
Figura 8 – Arranjo bidirecional com ponte de diodos.



Fonte: [2].

A Figura 9 mostra um arranjo bidirecional composto de dois interruptores IGBT conectados pelo terminal do coletor, essa configuração é conhecida por coletor comum.

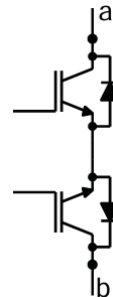
Figura 9 – Arranjo bidirecional coletor comum.



Fonte: [2].

A Figura 10 mostra um arranjo bidirecional composto de dois interruptores IGBT conectados pelo terminal do emissor, essa configuração é conhecida por emissor comum.

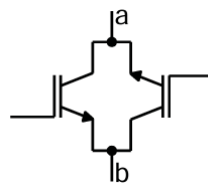
Figura 10 – Arranjo bidirecional emissor comum.



Fonte: [2].

E a Figura 12 mostra um arranjo bidirecional composto de dois interruptores IGBT conectados em anti paralelo.

Figura 11 – Arranjo bidirecional chaves em anti paralelo.



Fonte: [2].

Em uma aeronave os conversores de potência tem alguns desafios que ainda precisam ser superados, como por exemplo interferência por radiação solar, trabalhar em temperaturas

extremas, altitudes elevadas, tensões elevadas e com altas derivadas de tensão e corrente. De acordo com estudos mostrados em [13] [14], MOSFETs de SiC são mais confiáveis do que os MOSFETs de silício, quando a radiação do fluxo de neutrôns vem da Terra, porém quando a radiação vem do espaço onde a principal fonte de radiação são íons pesados, os MOSFETs de SiC não se mostraram tão confiáveis quantos os de silício. Em relação a altas temperaturas, é recomendado que os dispositivos operem com uma máxima temperatura de junção de 175°C ou menos, precisando assim de uma dissipação de calor ativa, ou seja, ventoinhas ou ainda utilizar de refrigeração a partir de gases como o nitrogênio.

2.5.1 Dispositivos de Silício

O silício também pode ser utilizado em sistemas de energia de aeronaves elétricas, como nos MEA. Embora o silício não tenha as mesmas propriedades superiores em relação ao SiC e GaN em aplicações de alta potência e alta frequência, ele ainda oferece vantagens significativas, como baixo custo, facilidade de processamento e ampla disponibilidade.

Os dispositivos de silício são amplamente utilizados em sistemas de energia de aeronaves elétricas, desde sistemas de iluminação e controle de temperatura, até em sistemas de controle de motores elétricos em aviões comerciais. No entanto, para aplicações de alta potência e alta frequência, os dispositivos de SiC e GaN apresentam vantagens significativas em relação ao silício.

2.5.2 Dispositivos de SiC e GaN

Os materiais semicondutores SiC e GaN estão sendo cada vez mais utilizados nos MEA, devido às suas propriedades superiores em relação ao silício em aplicações de alta potência e alta frequência.

O SiC, por exemplo, é capaz de operar em temperaturas mais elevadas do que o silício, o que o torna ideal para aplicações em sistemas de energia de aeronaves que operam em altas temperaturas, como motores e geradores elétricos. Além disso, o SiC tem uma capacidade de comutação mais rápida do que o silício, permitindo que os dispositivos de SiC operem em frequências mais altas, o que pode levar a sistemas mais compactos e eficientes em termos de energia.

O GaN também é um material semicondutor que oferece vantagens significativas em aplicações de alta frequência, sendo utilizado em sistemas de energia para aeronaves elétricas, como em inversores e conversores CC-CC. Os dispositivos de GaN são capazes de suportar maiores tensões e correntes com uma menor dissipação de calor se comparado com o silício. Isso pode ajudar a reduzir o peso e o volume dos sistemas de energia em aeronaves elétricas.

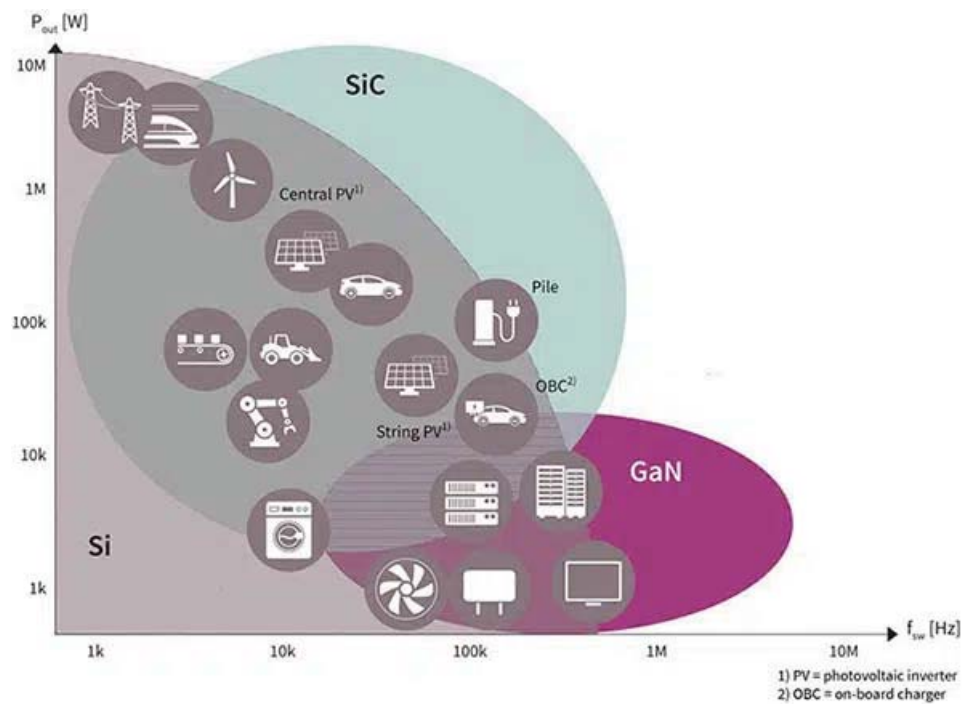
Portanto, os dispositivos semicondutores de SiC e GaN oferecem potencial para melhorar a eficiência, a capacidade de carga, o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de energia de aeronaves elétricas, tornando-os uma opção atraente para o desenvolvimento de MEA [13] [14].

2.5.3 Si x SiC x GaN

Em comparação, o silício consegue englobar mais aplicações, porém conforme a faixa de potência e frequência vão aumentando, o uso do silício começa a ser deixado de lado e a tendência é de utilizar SiC em altas potência e GaN quando é preciso comutar as chaves em altas frequências.

Na Figura 12, é possível observar que conforme a faixa de potência aumenta, os dispositivos de SiC se sobressaem aos de silício e conforme a faixa de frequência aumenta, os dispositivos de GaN se sobressaem os de silício. Também é possível observar as aplicações em cada faixa de potência e de frequência. Por exemplo, televisores trabalham com frequências elevadas e uma menor potência, enquanto a rede elétrica trabalha com potências elevadas e baixa frequência.

Figura 12 – Comparação entre Silício, Carbeto de Silício e Nitreto de Gálio.



Fonte: [15].

Hoje os dispositivos de silício ainda são os mais utilizados, porém com os avanços da tecnologia e o aumento dos estudos sobre SiC e GaN, a tendência é que surjam cada vez mais aplicações com SiC e GaN, das mais básicas até as mais avançadas.

Em resumo, embora o silício ainda seja uma opção viável para sistemas de energia em aeronaves elétricas, os dispositivos semicondutores de SiC e GaN oferecem potencial para melhorar a eficiência, o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de energia em aplicações de alta potência e alta frequência, tornando-os uma escolha preferencial para o desenvolvimento de sistemas de energia de aeronaves elétricas avançados [13], [14].

3 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste trabalho se dá por meio de simulações de três topologias de conversores CA-CA que podem estar presentes nos MEA, O sistema de geração escolhido para as simulações foi VSVF, onde a frequência de entrada é variável, enquanto a distribuição é a em frequência variável, pois o mesmo já possui conversores CA-CA. Os conversores abordados serão o conversor matricial direto, conversor matricial indireto e o conversor Back-to-Back.

Os algoritmos de modulação utilizados nos conversores matriciais foi a modulação por espaço vetoriais (*Space Vector Modulation - SVM*), que pode ser encontrada em detalhes em [1], [2] e [10].

3.1 PARÂMETROS DA NORMA MIL-STD

A norma MIL-STD-704F apresenta os parâmetros que devem ser cumpridos pelos conversores presentes em uma aeronave, seja ele CA-CC, CC-CC, CC-CA ou CA-CA, além de definir as características e operação normal ou anormal do sistema elétrico de aeronaves.

No parágrafo quatro do documento é abordado os requisitos gerais do sistema elétrico de potência da aeronave e no parágrafo cinco é onde se encontram as informações de operação dos conversores, como o objetivo é comparar o desempenho dos conversores o foco será nas características nominais do sistema e do conversor. Portanto os parâmetros utilizados nas simulações estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros Nominais de saída dos Conversores

Características	Limites
Tensão de saída	115 volts
Frequência de saída	400 Hz
Queda de Tensão Mínima	5 volts
Variação de Frequência Máxima	7 Hz

Fonte: Norma MIL-STD-704F.

3.2 MODULAÇÃO

Para os conversores matriciais foi utilizada a modulação por vetores espaciais (*SVM-Space Vector Modulation*). Ela permite o controle completo da tensão de saída dos conversores. Porém existe uma diferença entre a SVM utilizada no CMC e a utilizada no IMC. No CMC é utilizado uma estratégia de PWM com função de transferência direta (DTF - *Direct Transfer Function*), onde conversor é considerado como um único bloco e as tensões de saída são obtidas pela multiplicação das tensões de entrada por uma função de transferência direta [2].

Já para o IMC, foi utilizado a estratégia de PWM com função de transferência indireta (ITF - *Indirect Transfer Function*), onde o conversor é separado em dois blocos, um bloco retificador e um bloco inversor, e primeiramente as tensões de entrada são convertidas em um

Link-CC através da função de transferência de retificação. E depois essa tensão do *Link-CC* é convertida em tensões de saída, por meio de uma função de transferência de inversão [2].

Em ambos os conversores, o algoritmo SVM começa com a transformação das tensões de entrada trifásicas em um sistema bifásico através da transformada de Clarke. Essa transformada pode ser feita querendo preservar a amplitude de tensão entrada ou potência de entrada, vai depender do que é necessário na aplicação. Realizada a transformada de Clarke, é possível obter o setor em que o vetor de referência se encontra, o ângulo setorial, que varia entre 0° e 60° , as razões cíclicas, os instantes de comutação, selecionar o vetor a ser aplicado e a combinação de interruptores que devem ser aplicados naquele instante.

Para o conversor Back-to-Back, foram utilizadas duas modulações diferentes, para o estágio retificador foi utilizada a modulação PWM com correção de fator de potência e para o estágio inversor a SVM.

3.3 SIMULAÇÃO

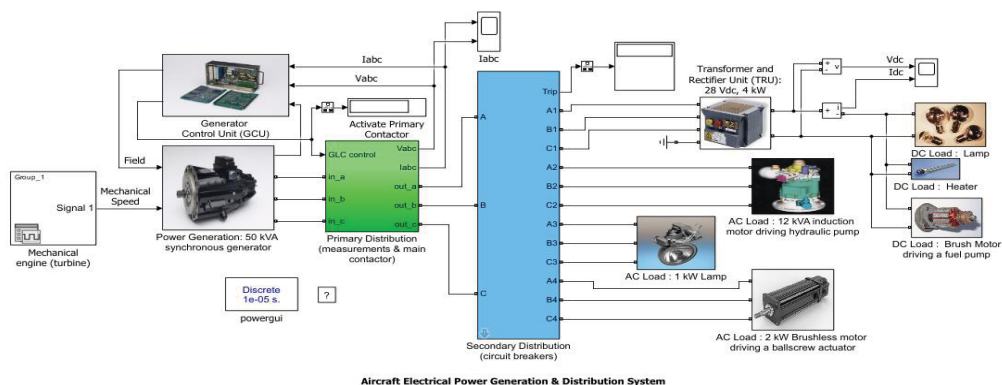
Nesta seção serão apresentados como as simulações dos conversores foram realizadas, apresentado os circuitos de potência e comando.

Serão demonstradas duas simulações para cada conversor, uma com a frequência de entrada em 400 Hz e uma em 800 Hz, esse foi o método para fazer a variação de frequência no *software* PSIM. Os interruptores utilizados nas simulações, eram interruptores ideais.

A frequência de chaveamento utilizada foi de 70 kHz, a escolha desse valor se deu por, após a leitura das referências e outros documentos, a faixa utilizada parte da dezena de quilohertz em aeronaves menores, até milhares de quilohertz em sistemas modernos de grande porte.

Os valores da carga foram obtidos de um exemplo de sistema VSVF simulado no *Matlab*, que pode ser encontrado em [16], utilizando a ferramenta do *simulink*, que apresenta várias cargas presentes na aeronave, então foi escolhido a bomba hidráulica de 12kVA de potência como carga. A Figura 13 mostra o esquemático dessa simulação.

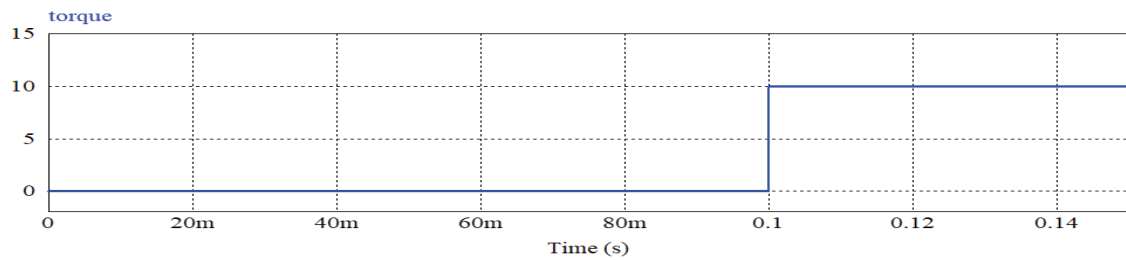
Figura 13 – Simulação de exemplo no *Simulink*.



Fonte: [16].

Para a simulação no PSIM foi utilizado um passo de $1\mu s$, com a inércia do motor perto da ideal, ou seja, quase zero, foi simulado um tempo total de 0,15 segundo, primeiramente com o motor a vazio e depois de um tempo foi aplicado um degrau de torque na carga em 0,1 segundo apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Degrau de torque.



Fonte: Autor.

Os parâmetros de simulação com os valores de tensão e frequência de entrada e tensão e frequência de saída são apresentados na Tabela 2.

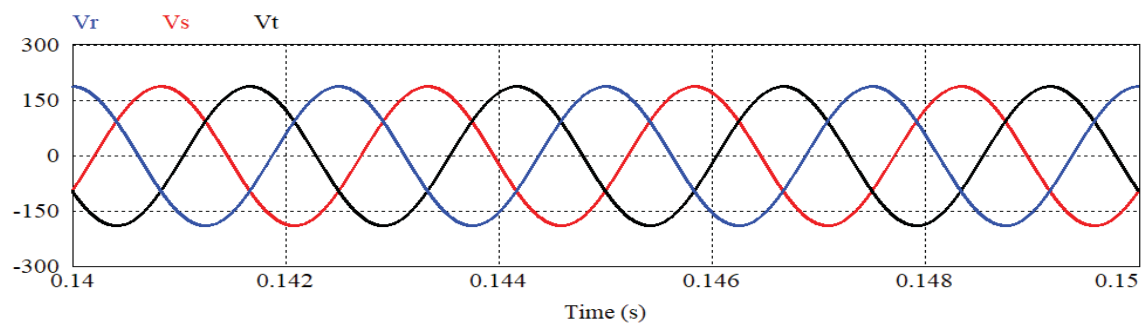
Tabela 2 – Parâmetros de Simulação

Parâmetros	Valores
Tensão de Entrada	230 Vrms
Frequência de Entrada	400-800 Hz
Tensão de Saída	115 Vrms
Frequência de Saída	400 Hz
Índice de Modulação	0,577
Frequência de Chaveamento	70 kHz

Fonte: Autor

A Figura 15 apresenta a tensão trifásica de fase em 400 Hz. Sendo a tensão da fase R em azul, da fase S em vermelho e da fase T em preto, mostrando um total de três períodos da rede.

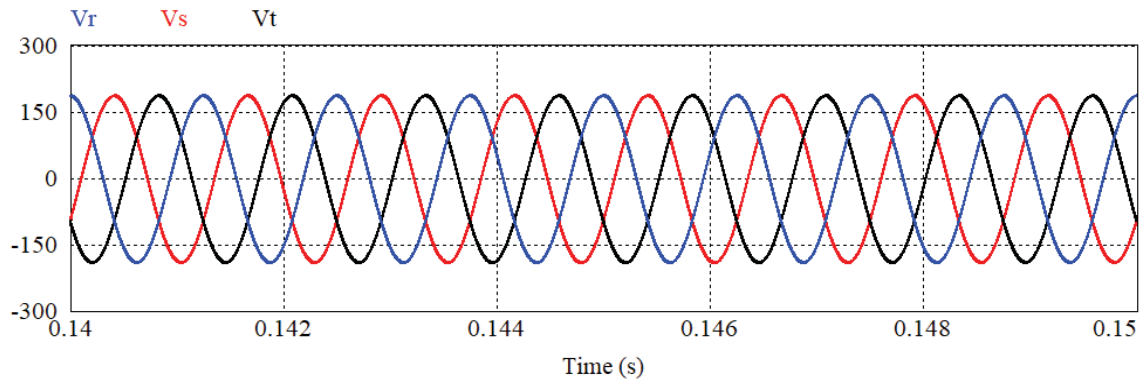
Figura 15 – Tensão de entrada em 400 Hz.



Fonte: Autor.

A Figura 16 apresenta a tensão trifásica de fase em 800 Hz. Sendo a tensão da fase R em azul, da fase S em vermelho e da fase T em preto, mostrando um total de seis períodos da rede.

Figura 16 – Tensão de entrada em 800 Hz.



Fonte: Autor.

O motor utilizado para a simulação foi um motor de indução do tipo gaiola de esquilo com os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de Simulação do motor

Parâmetros	Valores
Resistencia do Estator	0,2761 Ω
Indutância do Estator	219,1 μH
Resistencia do Rotor	0,16 Ω
Indutância do Rotor	219,1 μH
Indutância Magnetizante	114,21 mH
Número de Polos	16

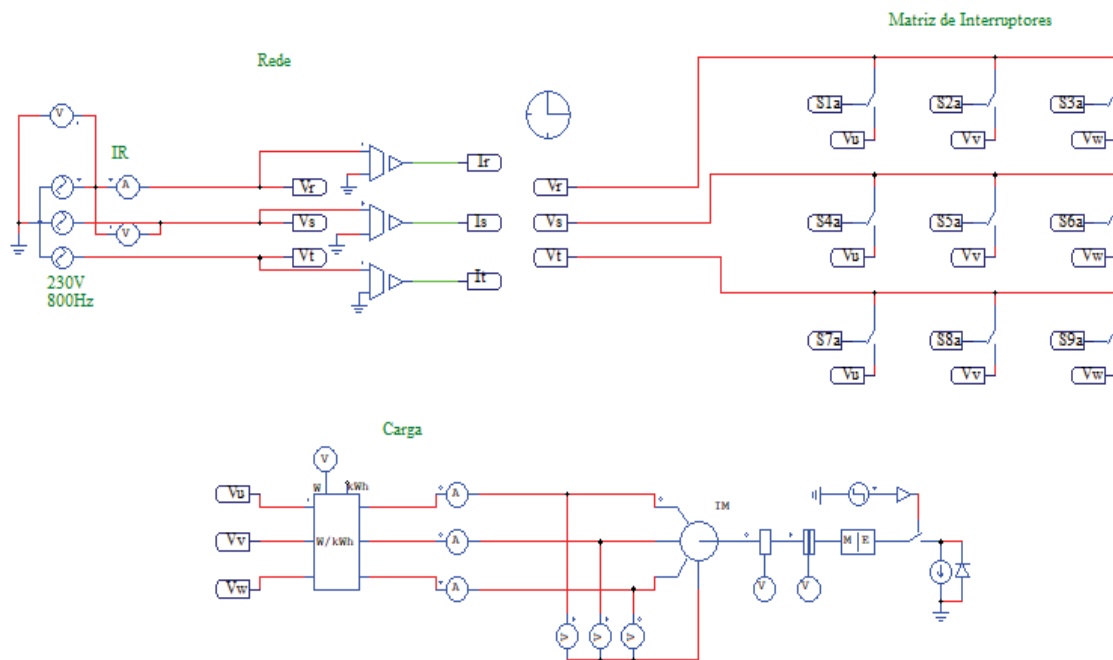
Fonte: [16]

3.3.1 Conversor Matricial Direto

Nesta seção será apresentado o esquema montado para a simulação do CMC. Na Figura 17 são apresentados os blocos da parte de potência do conversor. Sendo o bloco "Rede" a entrada trifásica do conversor, onde é medida as tensões de entrada, seguida da "matriz de interruptores", que faz a conexão da rede com a carga, e o bloco da "carga", onde se encontram as medições das tensões de fase de saída, das correntes de saída, da velocidade no eixo do motor e do torque no eixo do motor, além do motor de indução do tipo gaiola de esquilo utilizado na simulação para representar a bomba hidráulica de 12 kVA.

O algoritmo utilizado para a modulação do CMC foi o SVM e pode ser encontrada com mais detalhes em [1].

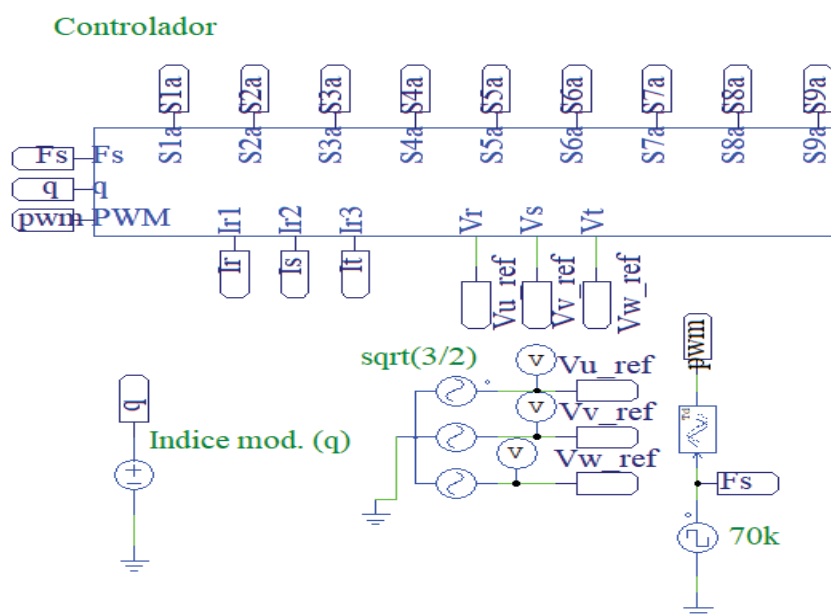
Figura 17 – Etapa de potência do CMC.



Fonte: Autor com base em [1].

Na Figura 18 é apresentado o bloco "controlador" e as entradas de referência de corrente e tensão, índice de modulação "q" e frequência de chaveamento "Fs".

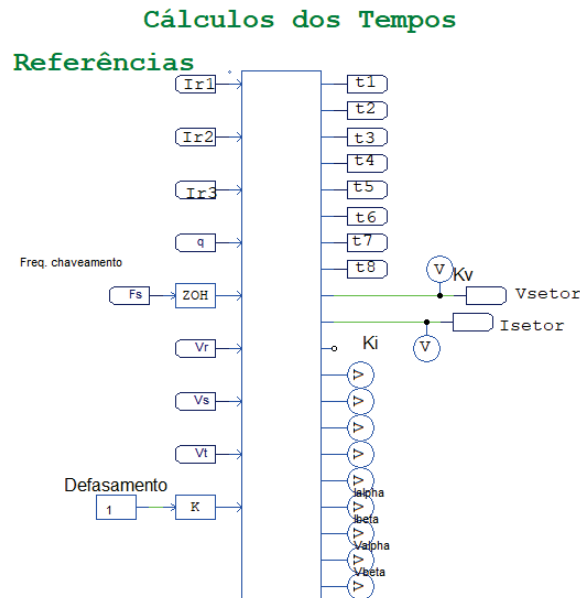
Figura 18 – Controlador.



Fonte: Autor com base em [1].

Dentro do controlador, existe dois blocos C, o primeiro que realiza os cálculos do tempos de aplicação de cada vetor, apresentado na Figura 19.

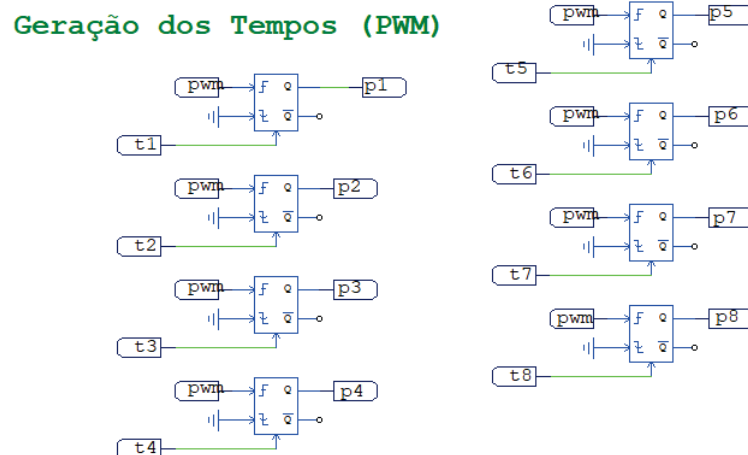
Figura 19 – Cálculo dos Tempos.



Fonte: Autor com base em [1].

As saídas t1 a t8 possuem os tempos que devem ser aplicados a cada combinação de interruptores em amplitude, então para transformar essas amplitudes em tempo, é utilizado um contador criado a partir de um arranjo de circuitos monoestáveis, a soma de suas saída vai criar uma nova variável que carregará a informação de qual vetor será aplicada e por quanto tempo será aplicado. Esse arranjo é mostrado na Figura 20.

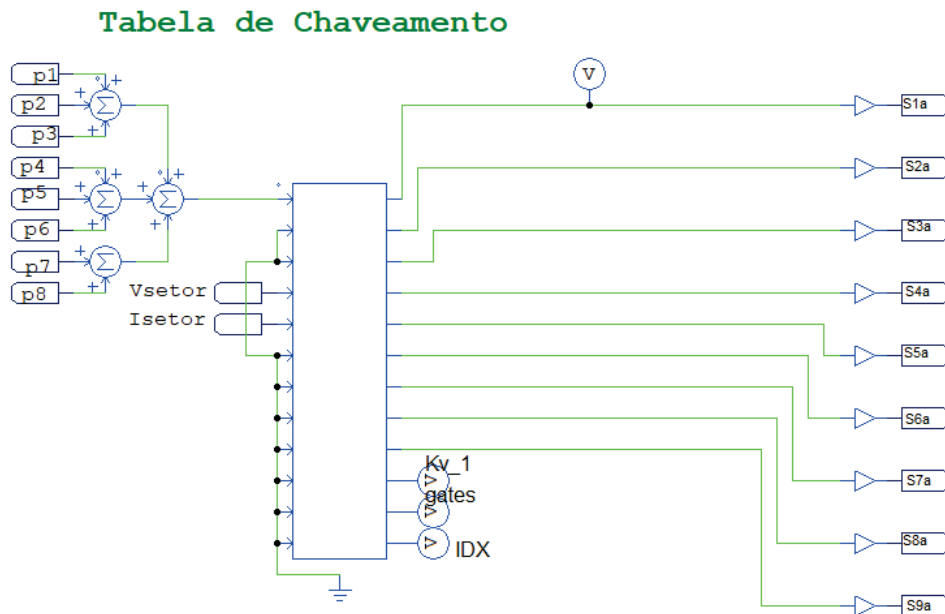
Figura 20 – Geração dos Tempos.



Fonte: Autor com base em [1].

O último bloco do controlador é onde é feita a seleção da combinação de interruptores que será aplicada e irá gerar os pulsos de comando para os interruptores. Nesse bloco é armazenado uma matriz com todas as combinações possíveis de interruptores. A Figura 21 apresenta esse bloco de comando.

Figura 21 – Geração dos Pulsos de comando.



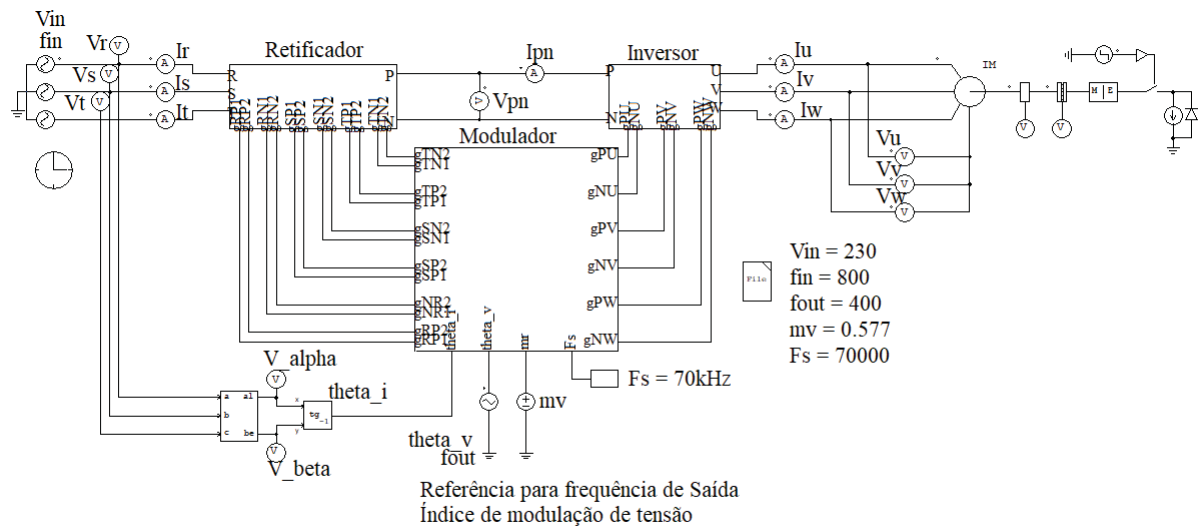
Fonte: Autor com base em [1].

3.3.2 Conversor Matricial Indireto

Nesta seção será apresentado o esquema montado para a simulação do IMC. O algoritmo SVM para o IMC possui algumas diferenças com o algoritmo utilizado para a modulação do CMC, primeiro é o fato de que o conversor pode ser separado em dois estágios, a retificadora e a inversora, sendo necessário sincronizar os tempos de ambas as etapas, para que a etapa retificadora comute apenas durante a aplicação dos vetores zero da etapa de inversão. O algoritmo de modulação pode ser encontrado com mais detalhes em [2].

Na Figura 22 é apresentado o IMC no *software* PSIM. Nela são apresentados a entrada de energia, nessa caso representada por uma fonte de tensão senoidal trifásica, o bloco que realiza a retificação, composto pela entrada trifásica, a entrada dos comandos dos interruptores e a saída do *Link-CC*, o bloco que realiza a inversão, composto pela entrada em corrente contínua, o bloco do controlador, composto pela saída dos comandos das etapas retificadora e inversora, o bloco da carga, composto pelo motor e o degrau de torque, e o bloco que contém os valores de tensão e frequência de entrada, frequência de saída, índice de modulação e a frequência de chaveamento.

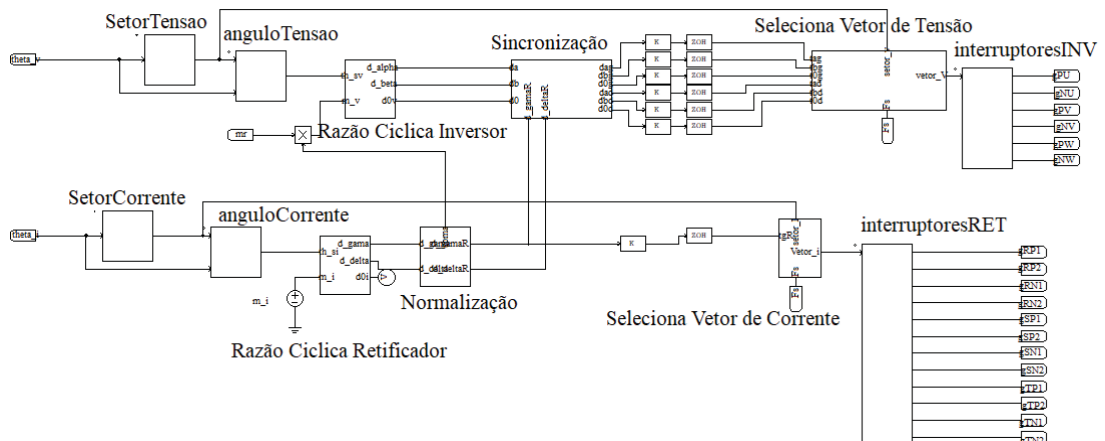
Figura 22 – Conversor Matrcial Indireto simulado no PSIM.



Fonte: Autor

A Figura 23 apresenta a estrutura de blocos interna do modulador, a parte inferior realiza os cálculos da modulação SVM para o estágio retificador e a parte superior os cálculos do estágio inversor.

Figura 23 – Sistema de blocos do Modulador.



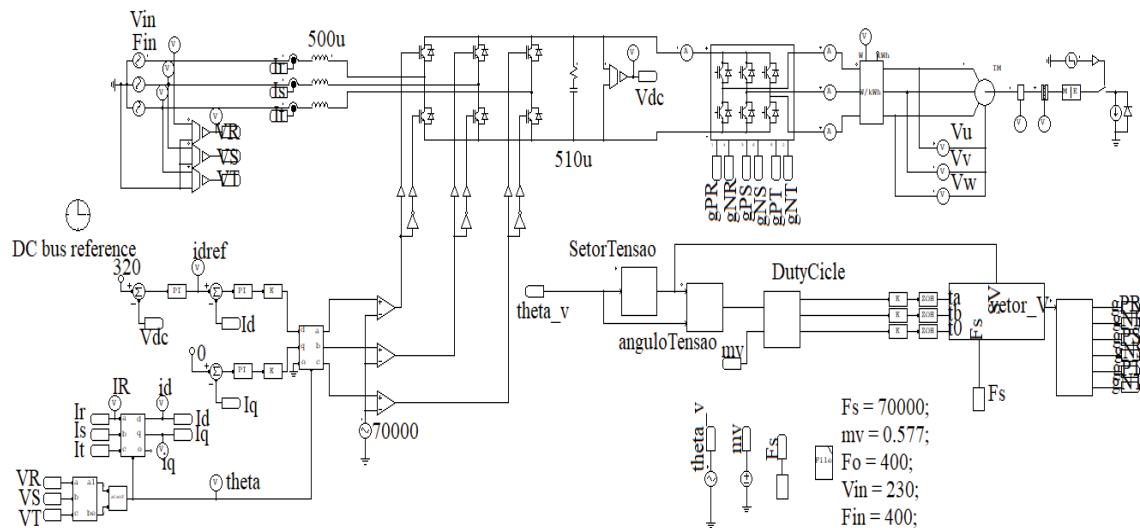
Fonte: Autor

3.3.3 Conversor Back-to-Back

Nesta seção será apresentado o esquema montado para a simulação do conversor Back-to-Back. Com esse conversor é possível conectar dois estágios com características independentes, então, para o estágio retificador foi utilizado um retificador controlado, e para o estágio inversor

foi utilizado o algoritmo SVM, além de um capacitor para o conectar os estágios por um barramento CC.

Figura 24 – Conversor Back-to-Back simulado no PSIM.



Fonte: Autor

3.4 RESULTADOS

Nesta seção serão analisados e comparados as figuras de mérito de cada conversor como fator de potência e corrente na entrada, tensão e corrente de saída, distorção na corrente de saída, a fim de mostrar as principais vantagens e desvantagens de cada conversor.

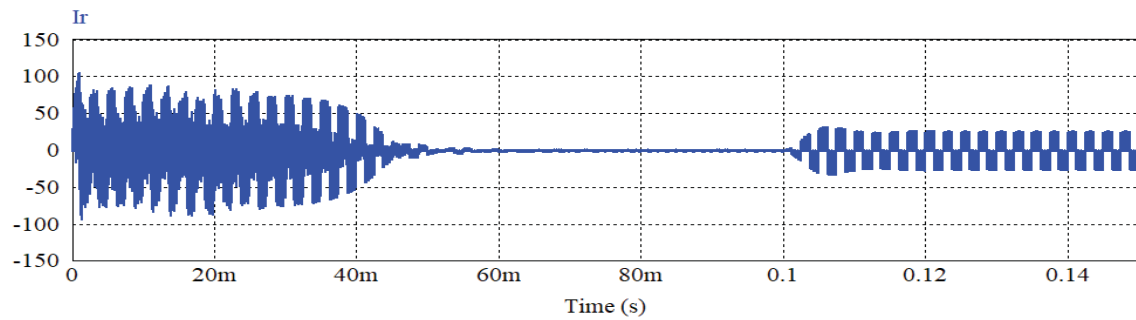
3.4.1 Entrada com 400 Hz

As correntes de entrada do CMC e do IMC apresentadas nas Figuras 25 e 26 respectivamente, os sinais possuem harmônicas de alta frequência, o que não acontece no conversor Back-to-Back na Figura 27. Nas três imagens é possível observar o comportamento da corrente durante o período transitório e em regime permanente.

A Figura 25 mostra a corrente de entrada na fase R do CMC, durante o período transitório a amplitude da corrente em 100 A, em aproximadamente 50 ms, a corrente entra em regime permanente com valor próximo de 0 A e em 0,1 ms acontece o degrau de torque e a corrente se estabiliza com o valor eficaz de aproximadamente 8,58 A.

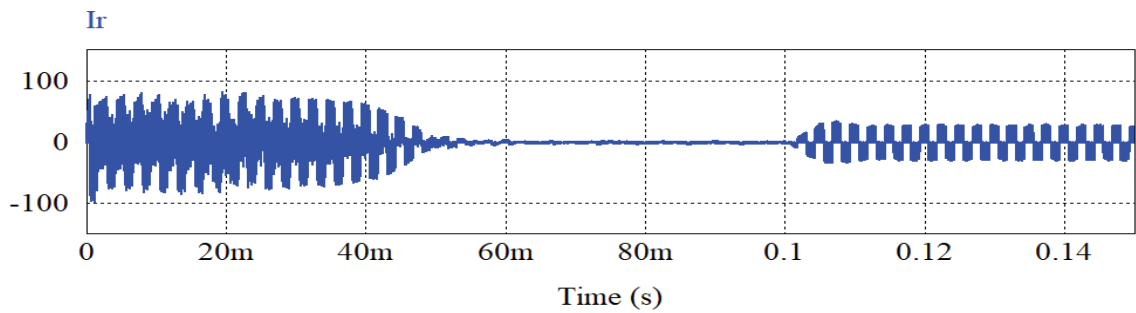
A Figura 26 mostra a corrente de entrada na fase R do IMC, durante o período transitório a amplitude da corrente em -100 A, em aproximadamente 50 ms, a corrente entra em regime permanente com valor próximo de 0 A e em 0,1 ms acontece o degrau de torque e a corrente se estabiliza com o valor eficaz de aproximadamente 8,79 A.

Figura 25 – Corrente de entrada do CMC.



Fonte: Autor

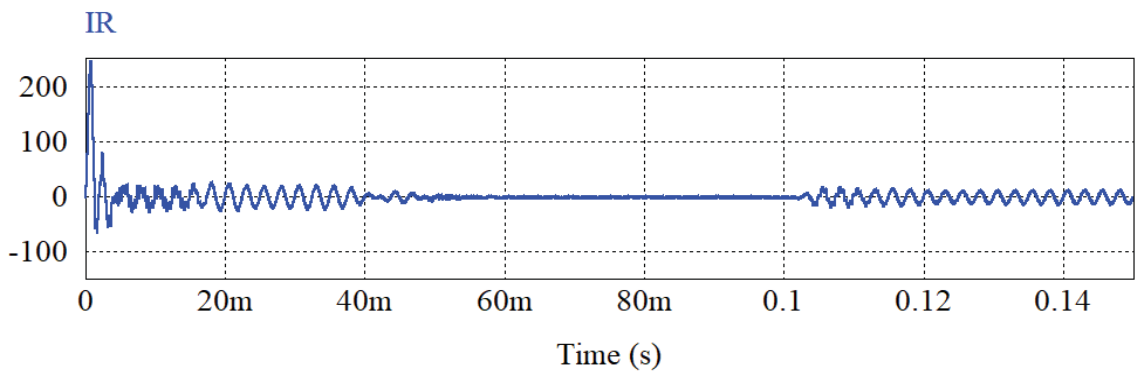
Figura 26 – Corrente de entrada do IMC.



Fonte: Autor

Já no conversor Back-to-Back, a Figura 27 mostra que a corrente de entrada chega a um pico de mais de 200 A durante o transitório, mas por possuir correção de fator de potência no retificador, logo se estabiliza em níveis menores do que os conversores matriciais e durante o regime permanente, a corrente possui o valor de 8,60 A.

Figura 27 – Corrente de entrada do conversor Back-to-Back.

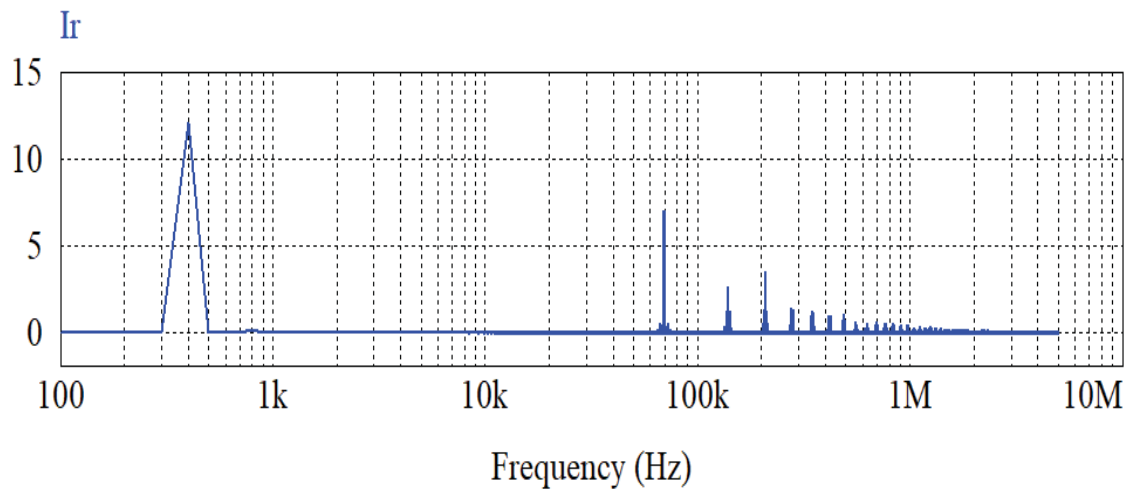


Fonte: Autor

Nas Figuras 28, 29 e 30 são apresentados os espectros de frequência da corrente de entrada dos conversores, nelas é possível observar a fundamental centrada em 400 Hz e no caso do CMC e do IMC as harmônicas de alta frequência se iniciando em 70 kHz, ou seja, a partir da frequência de chaveamento.

A Figura 28 mostra o espectro de frequência da corrente de entrada do CMC. O pico da fundamental é de 12,13 A, com as harmônicas de alta frequência aparecendo a partir de 70 kHz.

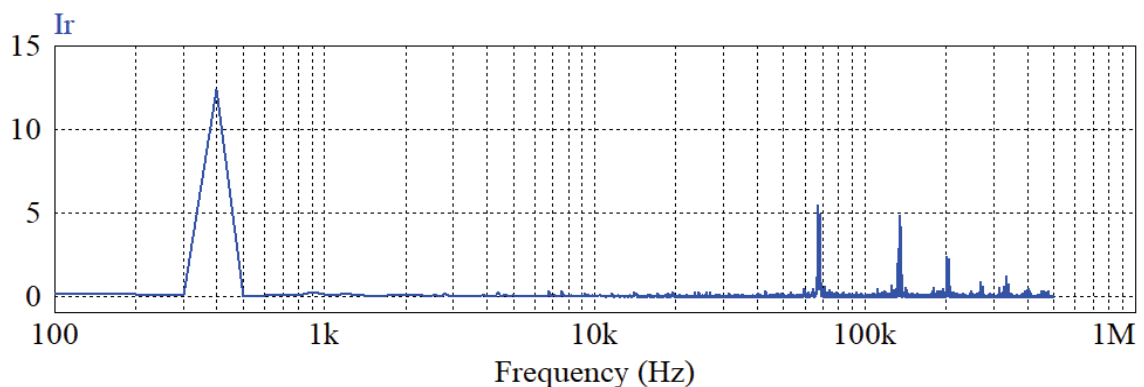
Figura 28 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do CMC.



Fonte: Autor

A Figura 29 mostra o espectro de frequência da corrente de entrada do IMC. O pico da fundamental é de 12,43 A, também com as harmônicas de alta frequência aparecendo a partir de 70 kHz.

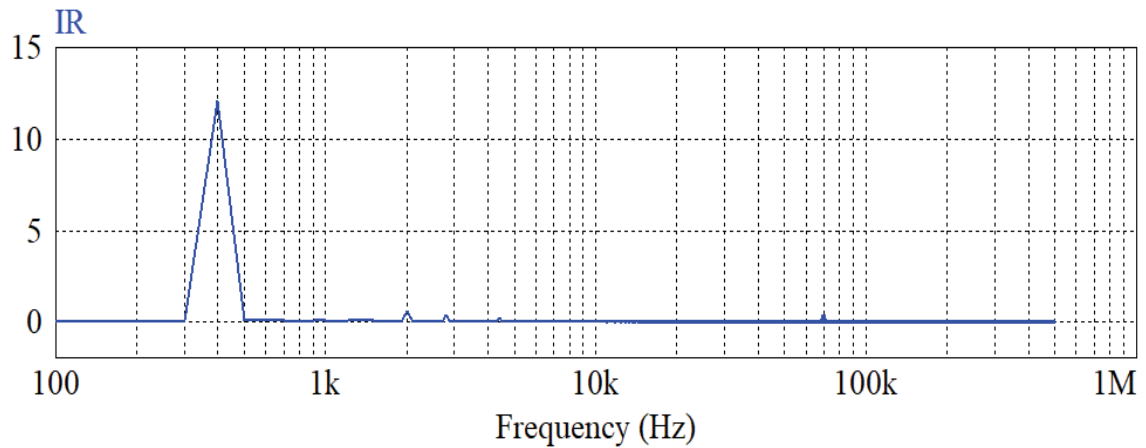
Figura 29 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do IMC.



Fonte: Autor

A Figura 30 mostra o espectro de frequência da corrente de entrada do conversor Back-to-Back. O pico da fundamental é de 12,16 A.

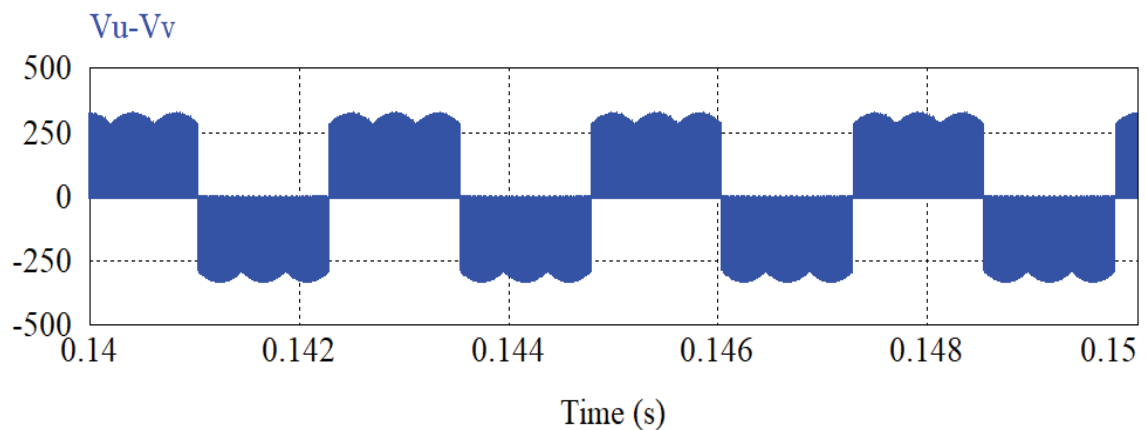
Figura 30 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do conversor Back-to-Back



Fonte: Autor

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam as tensões de saída de linha dos conversores, nas tensões dos matrículas é possível observar a envoltória das tensões de linha da entrada retificada, mesmo no CMC que não possui *Link CC*. Já a tensão do Back-to-Back é quadrada. Ainda é possível observar que o CMC possui a fase adiantada se comparado com os outros dois conversores, isso acontece, porque, por não possuir um *Link-CC*, a entrada é conectada diretamente a saída. A Figura 31 mostra a forma de onda da tensão de linha de saída do CMC. O valor de tensão eficaz quando em regime permanente é de 115,02 V.

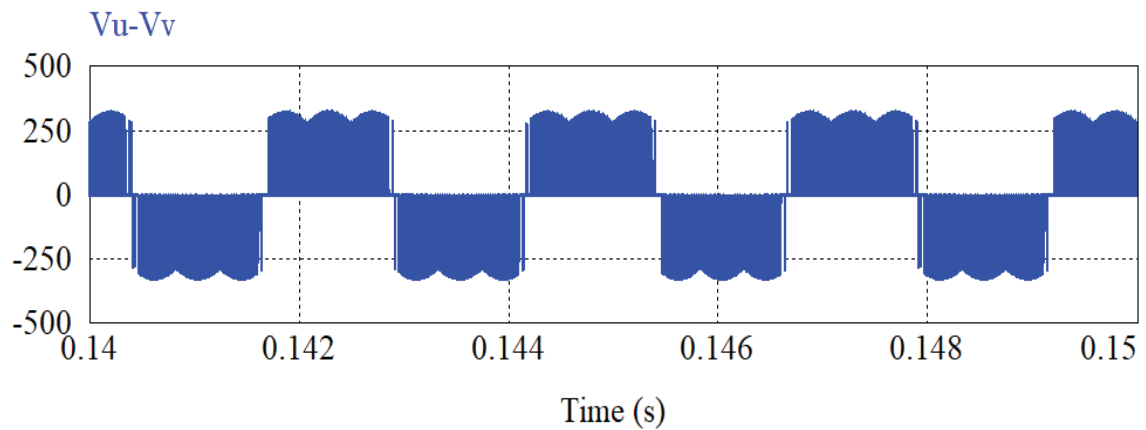
Figura 31 – Tensão de Linha de Saída do CMC.



Fonte: Autor

A Figura 32 mostra a forma de onda da tensão de linha de saída do IMC. O valor de tensão eficaz quando em regime permanente é de 109,92 V, um pouco abaixo do limite apresentado pela norma MIL-STD-704F.

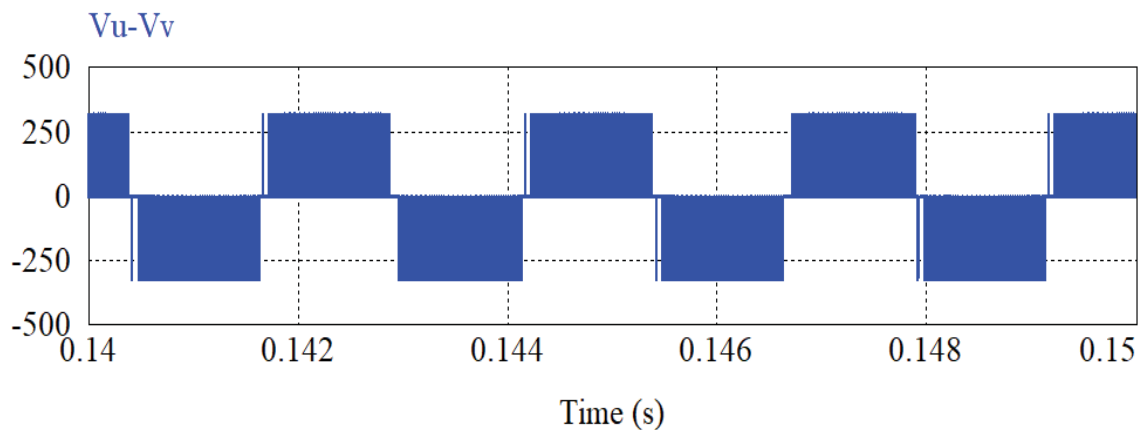
Figura 32 – Tensão de Linha de Saída do IMC.



Fonte: Autor

A Figura 33 mostra a forma de onda da tensão de linha de saída do conversor Back-to-Back. O valor de tensão eficaz quando em regime permanente é de 121,62 V.

Figura 33 – Tensão de Linha de Saída do conversor Back-to-Back.



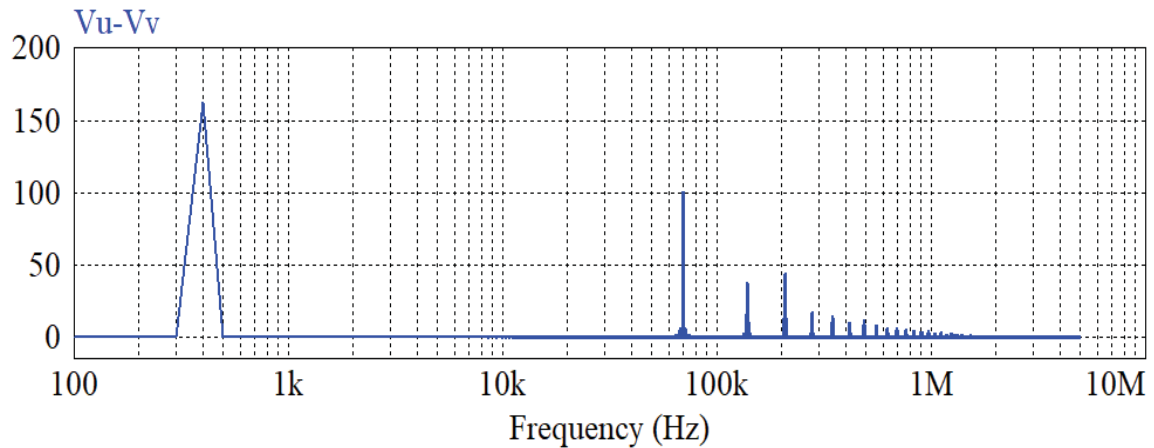
Fonte: Autor

Nas Figuras 34, 35 e 36 são apresentados os espectros de frequência das tensões de linha da saída dos conversores, nelas é possível observar a fundamental centrada em 400 Hz e as harmônicas de alta frequência se iniciando em 70 kHz, no CMC é possível observar que a harmônica de maior amplitude é a centrada em 70 kHz com amplitude de aproximadamente 100

V, enquanto no IMC e no Back-to-Back são as harmônicas centradas em 140 kHz, que no IMC possui amplitude de aproximadamente 50 V e no Back-to-Back algo em torno de 75 V.

A Figura 34 mostra o espectro de frequência da tensão de linha da saída do CMC. O valor de pico da tensão quando em regime permanente é de 162,66 V, com as harmônicas de alta frequência aparecendo a partir de 70 kHz.

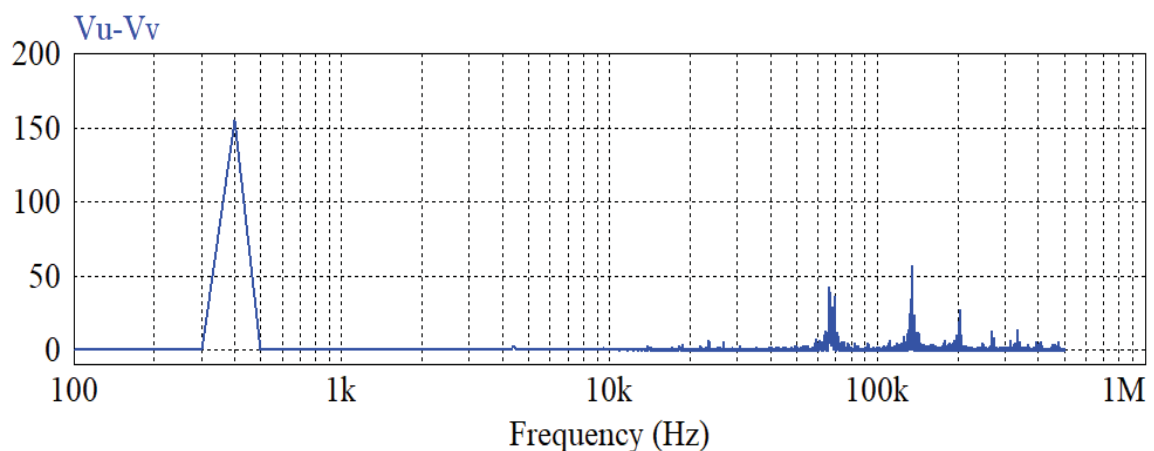
Figura 34 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do CMC.



Fonte: Autor

A Figura 35 mostra o espectro de frequência da tensão de linha da saída do IMC. O valor de pico da tensão quando em regime permanente é de 155,45 V, também com as harmônicas de alta frequência aparecendo a partir de 70 kHz.

Figura 35 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do IMC.

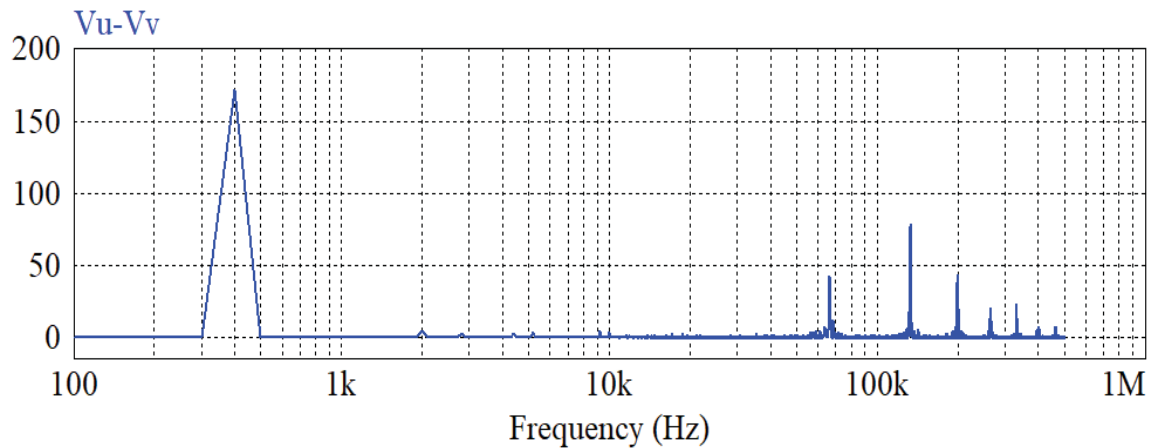


Fonte: Autor

A Figura 36 mostra o espectro de frequência da tensão de linha da saída do conversor

Back-to-Back. O valor de pico da tensão quando em regime permanente é de 171,99 V, também com as harmônicas de alta frequência aparecendo a partir de 70 kHz.

Figura 36 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do conversor Back-to-Back.

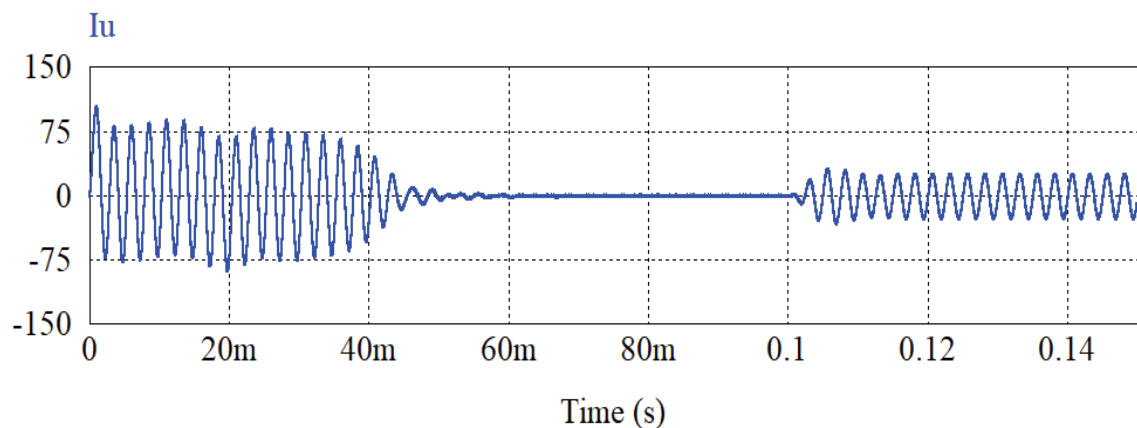


Fonte: Autor

As Figuras 37, 38 e 39 apresentam as correntes de saída dos conversores durante o período de aceleração do motor até a velocidade nominal sem carga e o degrau de torque na carga em 0,1 segundo, as três correntes apresentam uma senoide praticamente perfeita. O tempo para que o motor atinja velocidade nominal é similar nos três conversores.

A Figura 37 mostra a corrente de saída na fase U do CMC, durante o período transitório a corrente chega a aproximadamente 75 A de pico.

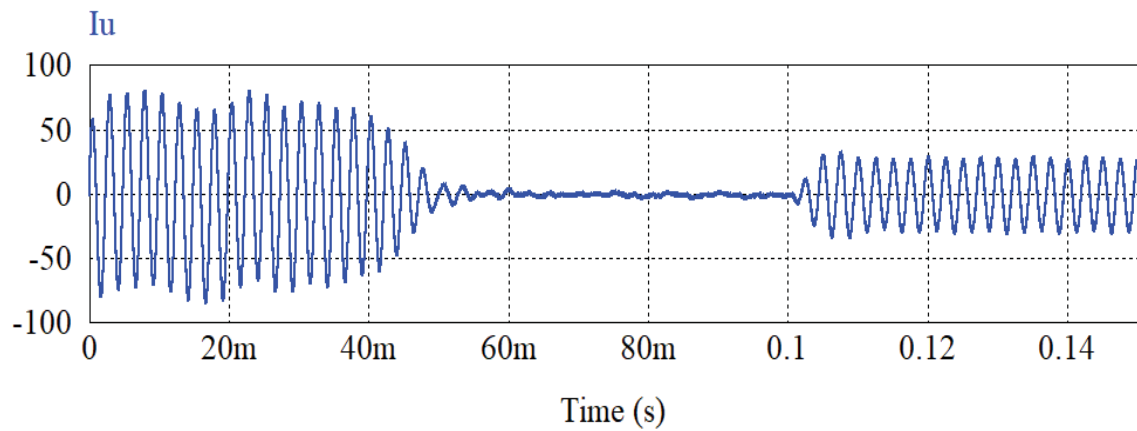
Figura 37 – Corrente de Saída do CMC.



Fonte: Autor

A Figura 38 mostra a corrente de saída na fase U do IMC, durante o período transitório a corrente chega a aproximadamente 75 A de pico.

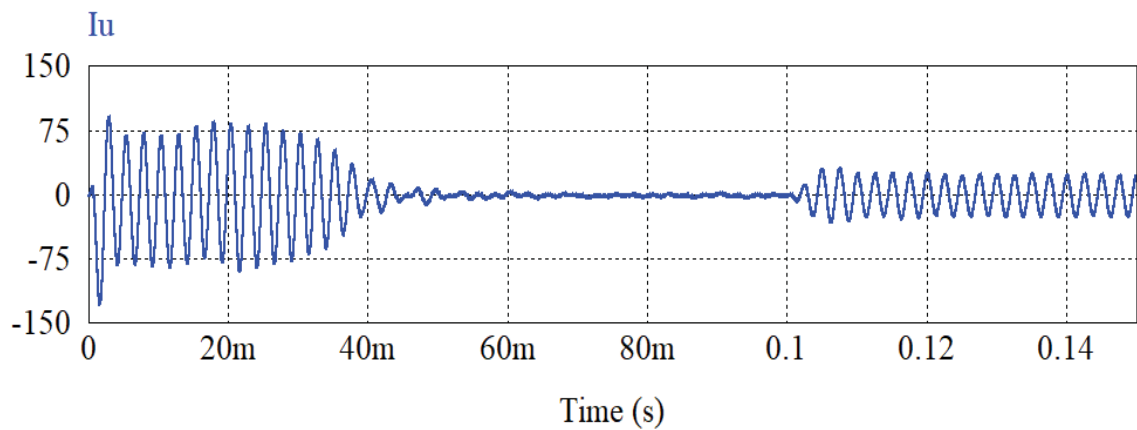
Figura 38 – Corrente de Saída do IMC.



Fonte: Autor

A Figura 39 mostra a corrente de saída na fase U do conversor Back-to-Back, durante o período transitório a corrente chega a aproximadamente -135 A de pico.

Figura 39 – Corrente de Saída do conversor Back-to-Back.



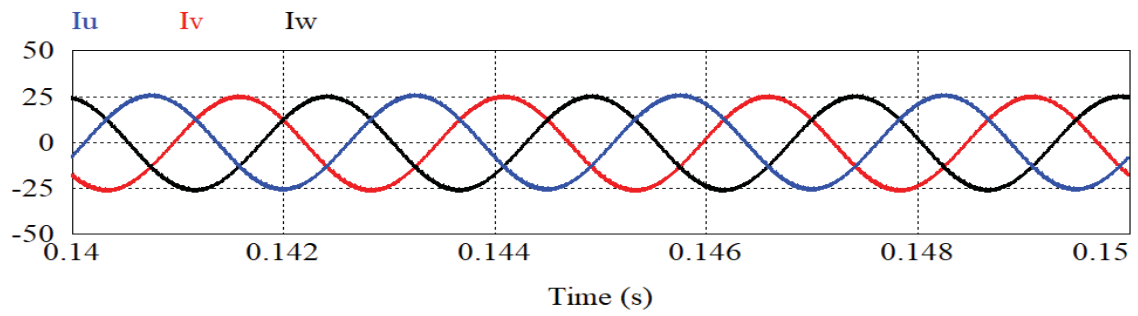
Fonte: Autor

Nas Figuras 40, 41 e 42 são apresentados as correntes em regime permanente. A amplitude das correntes são parecidas nos três conversores e assim como nas tensões de saída dos conversores, a corrente do CMC também está adiantada se comparada com a corrente dos outros dois conversores.

A Figura 40 mostra as correntes de saída do CMC em regime permanente, essa que possuem o valor eficaz de 18,05 A.

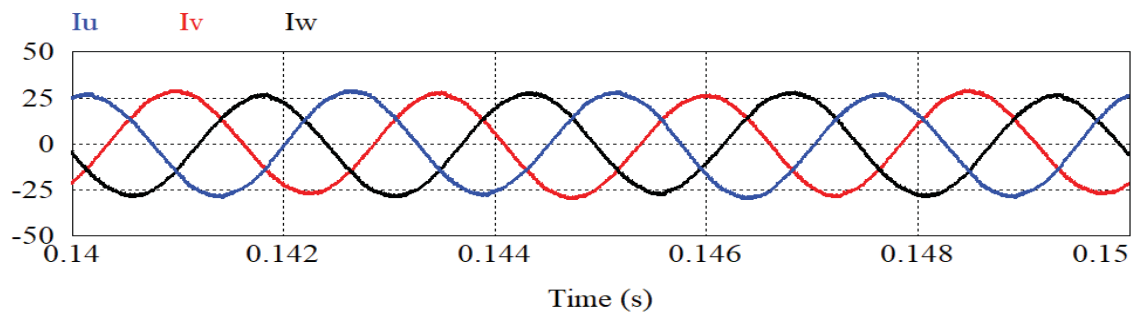
A Figura 41 mostra as correntes de saída do IMC em regime permanente, essa que possuem o valor eficaz de 19,70 A.

Figura 40 – Corrente de Saída do CMC em Regime Permanente.



Fonte: Autor

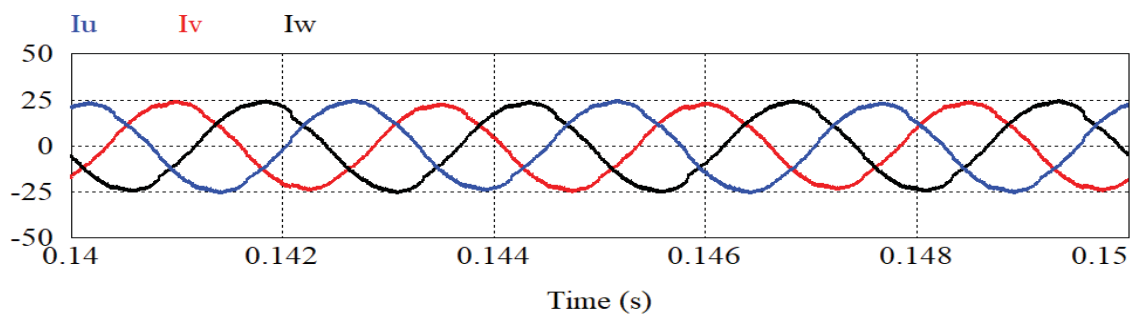
Figura 41 – Corrente de Saída do IMC em Regime Permanente.



Fonte: Autor

A Figura 42 mostra as correntes de saída do conversor Back-to-Back em regime permanente, essa que possuem o valor eficaz de 17,04 A.

Figura 42 – Corrente de Saída do conversor Back-to-Back em Regime Permanente.



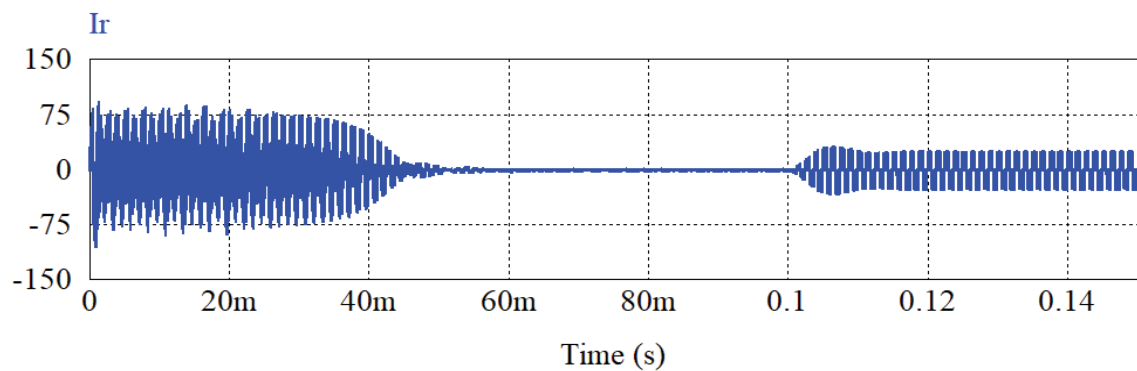
Fonte: Autor

3.4.2 Entrada com 800 Hz

As Figuras 43, 44 e 45 apresentam a corrente de entrada dos conversores quando a entrada está com a frequência em 800 Hz. Por possuir controle de corrente, o conversor Back-to-Back tem amplitudes menores de corrente durante o período transitório de operação.

A Figura 43 mostra a corrente de entrada na fase R do CMC, durante o período transitório a amplitude da corrente em -100 A, em aproximadamente 50 ms, a corrente entra em regime permanente com valor próximo de 0 A e em 0,1 ms acontece o degrau de torque e a corrente se estabiliza com o valor eficaz de aproximadamente 8,57 A.

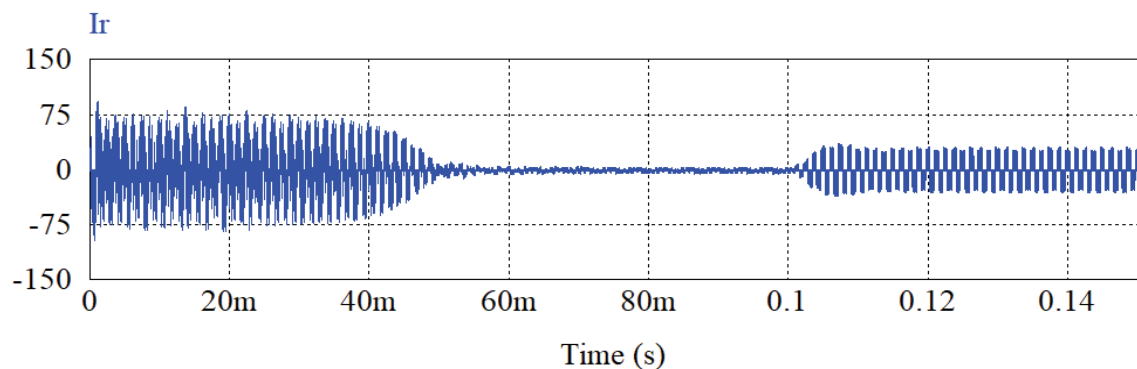
Figura 43 – Corrente de entrada do CMC.



Fonte: Autor

A Figura 44 mostra a corrente de entrada na fase R do IMC, durante o período transitório a amplitude da corrente em 75 A, em aproximadamente 50 ms, a corrente entra em regime permanente com valor próximo de 0 A e em 0,1 ms acontece o degrau de torque e a corrente se estabiliza com o valor eficaz de aproximadamente 8,77 A.

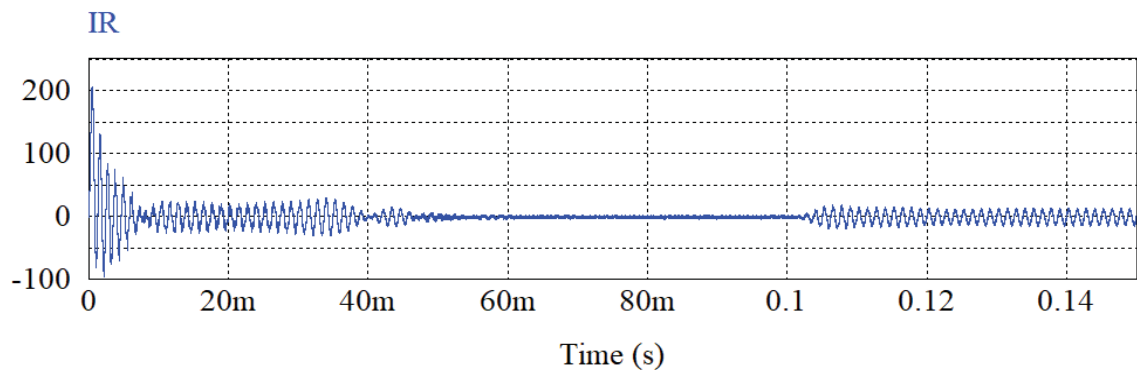
Figura 44 – Corrente de entrada do IMC.



Fonte: Autor

A Figura 45 mostra a corrente de entrada na fase R do conversor Back-to-Back, durante o período transitório a amplitude da corrente em 200 A, mas logo se estabiliza devido a etapa retificadora possuir controle de tensão e de corrente. O valor eficaz da corrente em regime permanente é de 8,53 A.

Figura 45 – Corrente de entrada do conversor Back-to-Back.

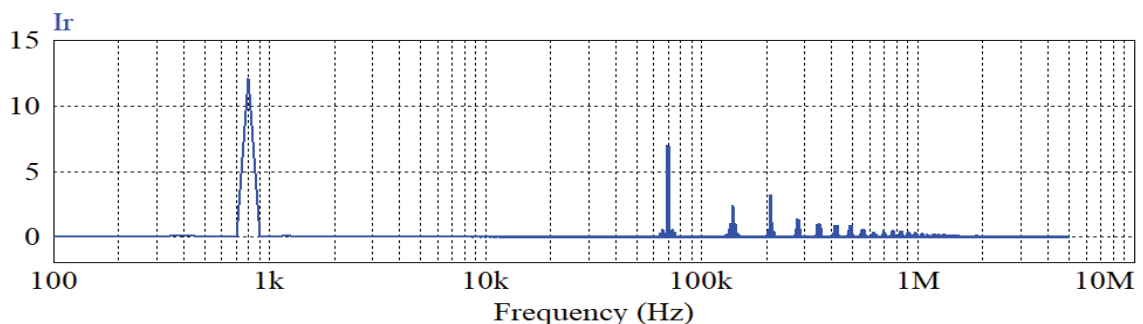


Fonte: Autor

Nas Figuras 46, 47 e 48 são apresentados os espectros de frequência das correntes de entrada dos conversores. As harmônicas de alta frequência estão presentes no CMC e IMC a partir de frequência de chaveamento dos conversores, com a amplitude da harmônica centrada em 70 kHz sendo a de maior intensidade, chegando a 7,5 A no CMC e 5,0 A no IMC.

A Figura 46 mostra o espectro de frequência da corrente de entrada do CMC. O pico da fundamental é de 12,12 A, com as harmônicas de alta frequência aparecendo a partir de 70 kHz.

Figura 46 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do CMC.

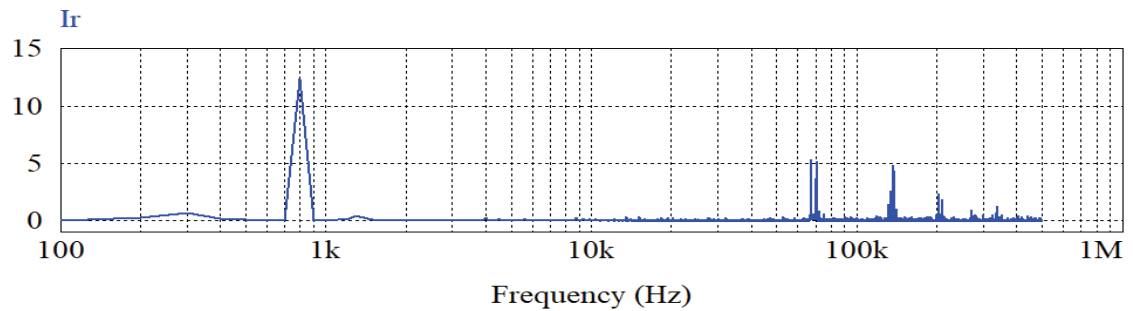


Fonte: Autor

A Figura 47 mostra o espectro de frequência da corrente de entrada do IMC. O pico da fundamental é de 12,40 A, com as harmônicas de alta frequência também aparecendo a partir de 70 kHz.

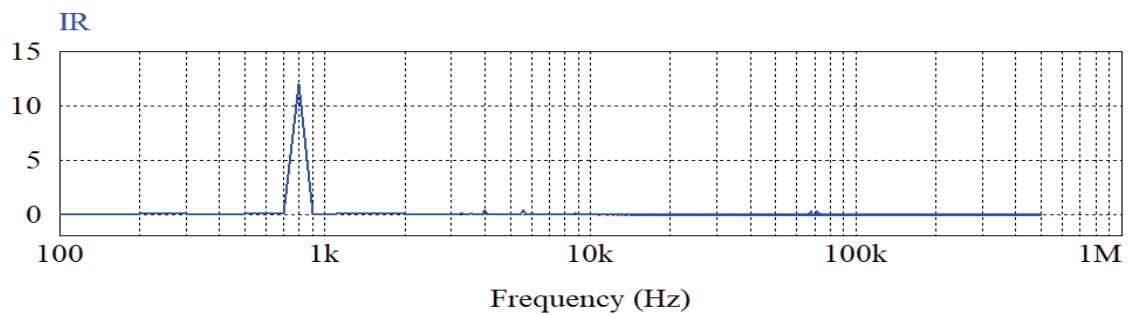
A Figura 48 mostra o espectro de frequência da corrente de entrada do conversor Back-to-Back. O pico da fundamental é de 12,06 A.

Figura 47 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do IMC.



Fonte: Autor

Figura 48 – Espectro de Frequência da Corrente de Entrada do conversor Back-to-Back

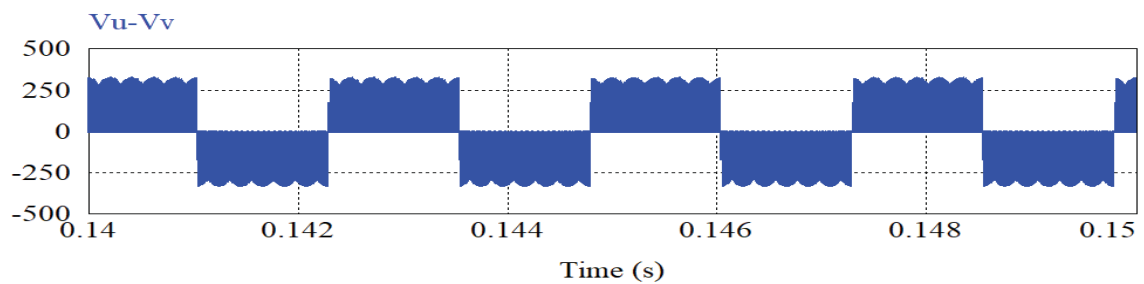


Fonte: Autor

As Figuras 49, 50 e 51 apresentam as tensões de saída de linha dos conversores, nas tensões dos matriciais é possível observar q a envoltória das tensões de linha da entrada retificada dobrou sua quantidade. Já a tensão do Back-to-Back permanece quadrada. Enquanto o CMC manteve a fase adiantada se comparado com os outros dois conversores.

A Figura 49 mostra a forma de onda da tensão de linha de saída do CMC. O valor de tensão eficaz quando em regime permanente é de 114,82 V.

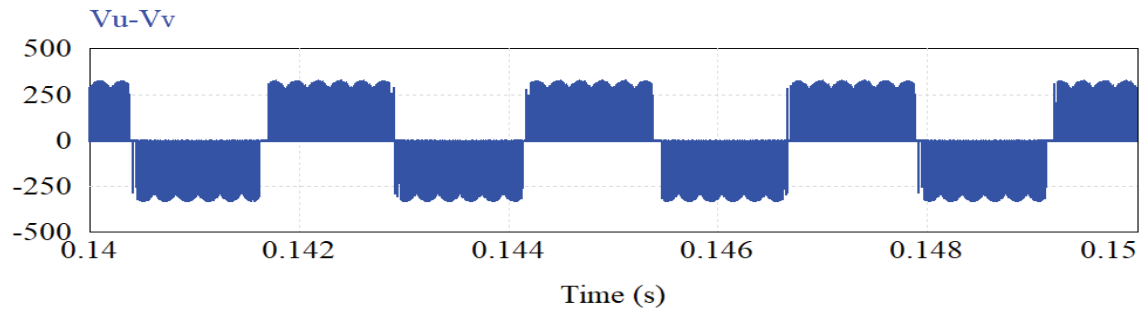
Figura 49 – Tensão de Linha de Saída do CMC.



Fonte: Autor

A Figura 50 mostra a forma de onda da tensão de linha de saída do IMC. O valor de tensão eficaz quando em regime permanente é de 108,96 V, assim como com a entrada em 400 Hz, também ficou abaixo da norma.

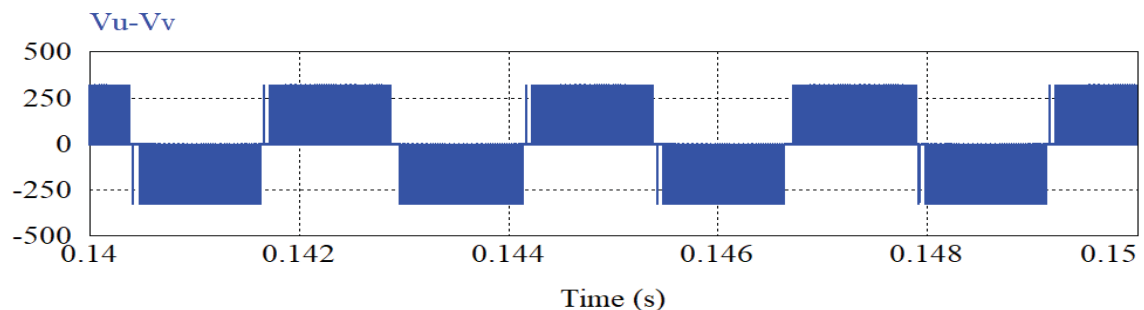
Figura 50 – Tensão de Linha de Saída do IMC.



Fonte: Autor

A Figura 51 mostra a forma de onda da tensão de linha de saída do conversor Back-to-Back. O valor de tensão eficaz quando em regime permanente é de 121,56 V.

Figura 51 – Tensão de Linha de Saída do conversor Back-to-Back.

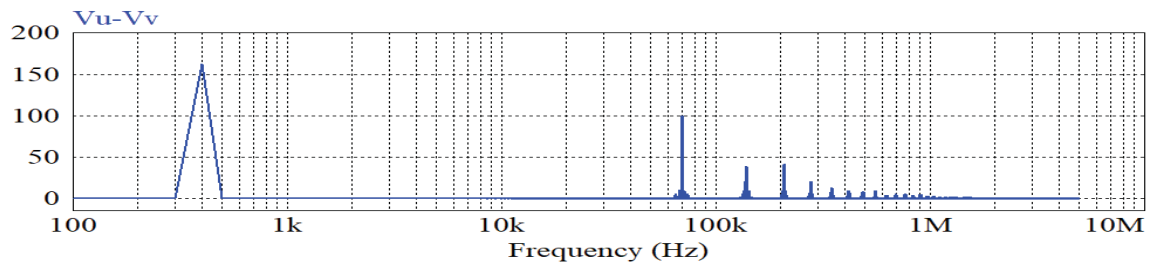


Fonte: Autor

Nas Figuras 52, 53 e 54 são apresentados os espectros de frequência das tensões de linha da saída dos conversores. As amplitudes não tiveram mudanças muito perceptíveis, enquanto as harmônicas mantiveram o padrão apresentado na seção anterior, sendo as de maior amplitude do CMC começando em 70 kHz e com amplitude de aproximadamente 100 A, as de maior amplitude do IMC centradas em 140 kHz e com amplitude de aproximadamente 60 A e no Back-to-Back as de maior amplitude também centradas em 140 kHz e com amplitude de aproximadamente 75 A.

A Figura 52 mostra o espectro de frequência da tensão de linha da saída do CMC. O valor de pico da tensão quando em regime permanente é de 162,38 V, com as harmônicas de alta frequência aparecendo a partir de 70 kHz.

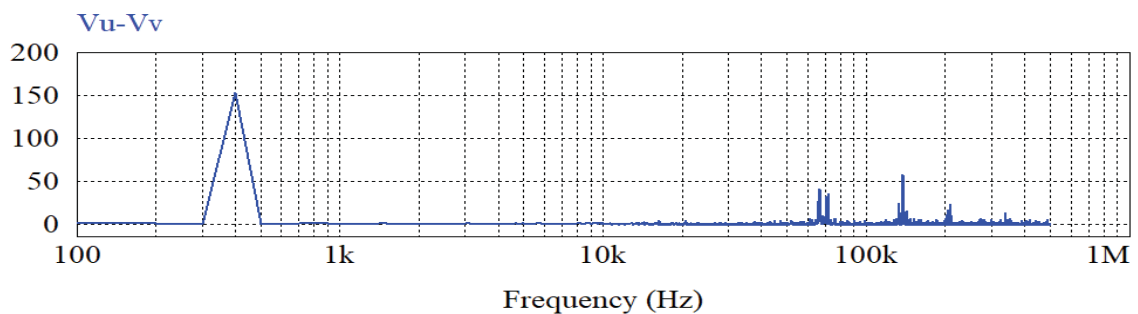
Figura 52 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do CMC.



Fonte: Autor

A Figura 53 mostra o espectro de frequência da tensão de linha da saída do IMC. O valor de pico da tensão quando em regime permanente é de 154,09 V, com as harmônicas de alta frequência também aparecendo a partir de 70 kHz.

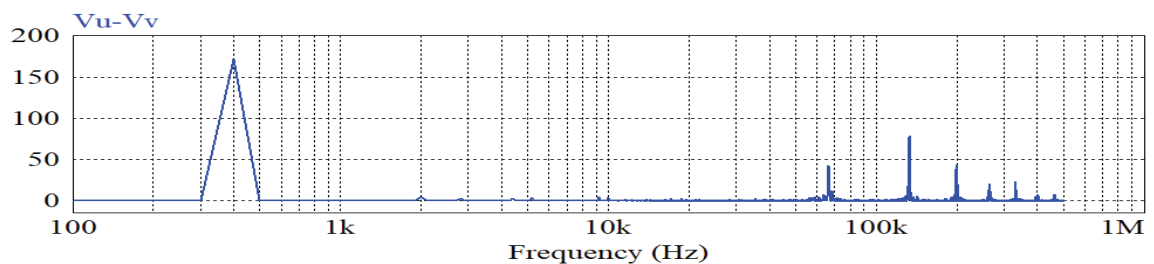
Figura 53 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do IMC.



Fonte: Autor

A Figura 54 mostra o espectro de frequência da tensão de linha da saída do conversor Back-to-Back. O valor de pico da tensão quando em regime permanente é de 171,91 V, com as harmônicas de alta frequência também aparecendo a partir de 70 kHz.

Figura 54 – Espectro de Frequência da Tensão de Linha de Saída do conversor Back-to-Back.



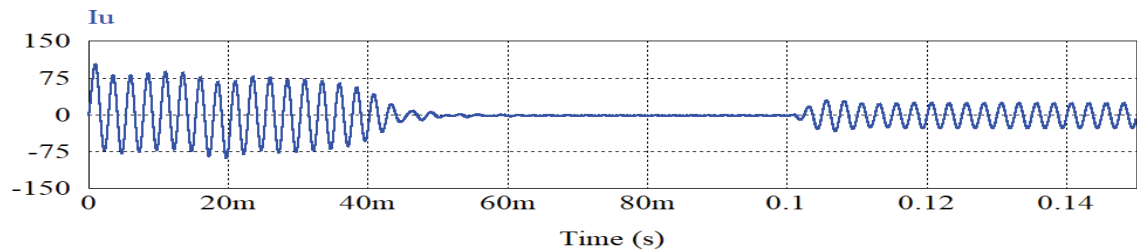
Fonte: Autor

As Figuras 55, 56 e 57 apresentam as correntes de saída dos conversores durante o período de aceleração do motor até a velocidade nominal sem carga e o degrau de torque na

carga.

A Figura 55 mostra a corrente de saída na fase U do CMC, durante o período transitório a corrente chega a aproximadamente 75 A de pico.

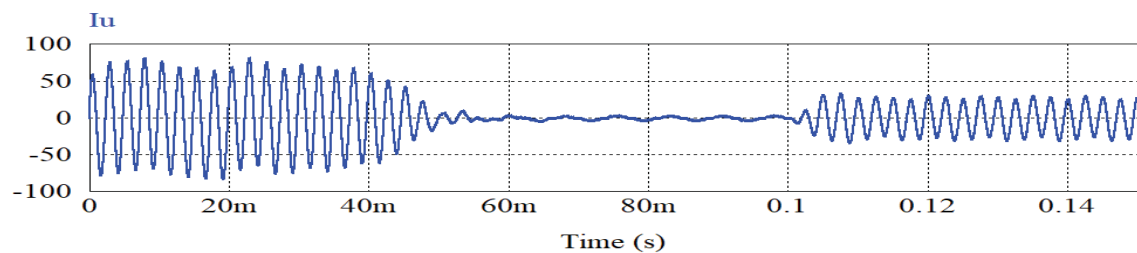
Figura 55 – Corrente de Saída do CMC.



Fonte: Autor

A Figura 55 mostra a corrente de saída na fase U do IMC, durante o período transitório a corrente chega a aproximadamente 100 A de pico.

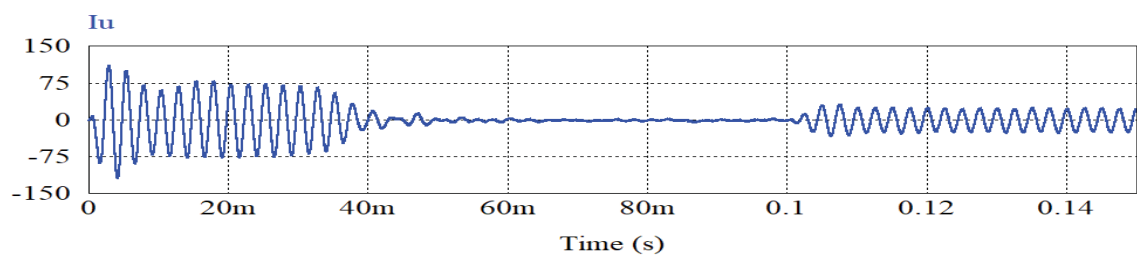
Figura 56 – Corrente de Saída do IMC.



Fonte: Autor

A Figura 55 mostra a corrente de saída na fase U do conversor Back-to-Back, durante o período transitório a corrente também chega a aproximadamente 100 A de pico.

Figura 57 – Corrente de Saída do conversor Back-to-Back.



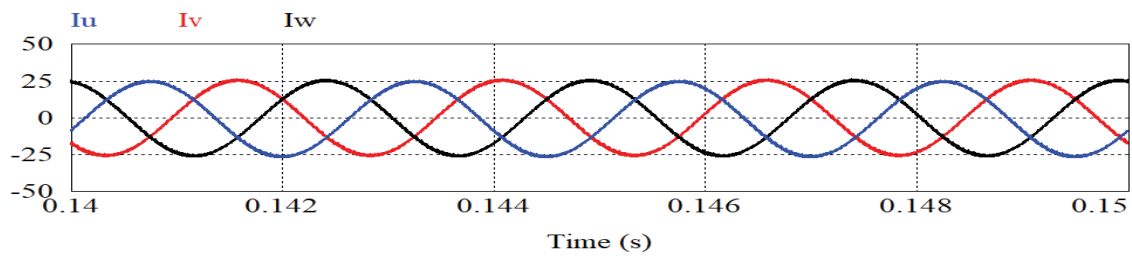
Fonte: Autor

Nas Figuras 58, 59 e 60 são apresentados as correntes em regime permanente. A amplitude das correntes são parecidas nos três conversores e assim como nas tensões de saída dos

conversores, a corrente do CMC também está adiantada se comparada com a corrente dos outros dois conversores.

A Figura 58 mostra as correntes de saída do CMC em regime permanente, essa que possuem o valor eficaz de 18,01 A.

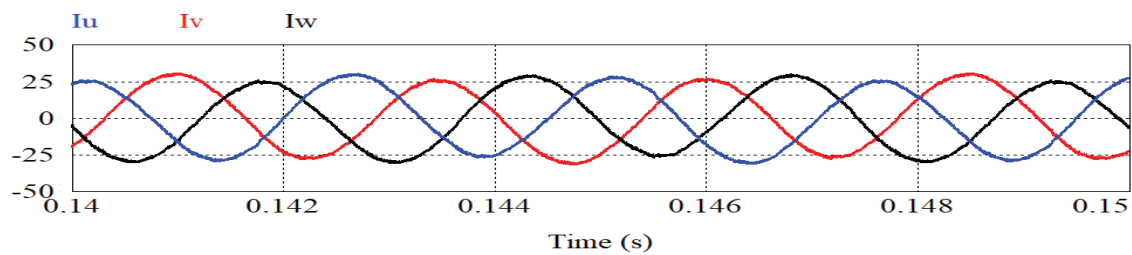
Figura 58 – Corrente de Saída do CMC em Regime Permanente.



Fonte: Autor

A Figura 58 mostra as correntes de saída do IMC em regime permanente, essa que possuem o valor eficaz de 19,75 A.

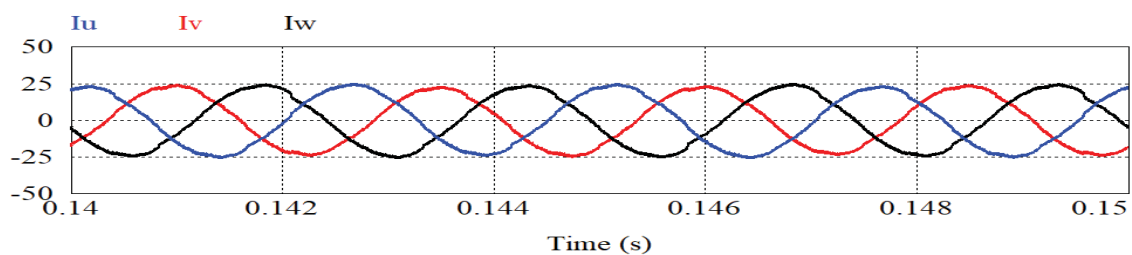
Figura 59 – Corrente de Saída do IMC em Regime Permanente.



Fonte: Autor

A Figura 58 mostra as correntes de saída do conversor Back-to-Back em regime permanente, essa que possuem o valor eficaz de 17,03 A.

Figura 60 – Corrente de Saída do conversor Back-to-Back em Regime Permanente.

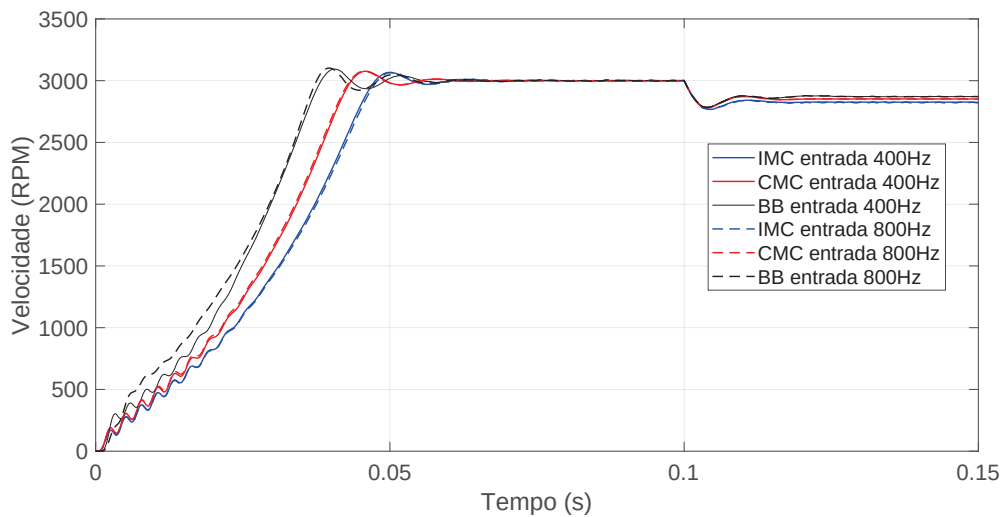


Fonte: Autor

3.4.3 Carga

A Figura 61 mostra a diferença do tempo de aceleração do motor e resposta ao degrau de torque na carga. Nela é possível observar que a diferença de frequência na entrada do conversor não teve muitas alterações para o mesmo conversor. Agora, comparando os conversores entre si, o conversor Back-to-Back apresentou o menor período de aceleração, enquanto o IMC foi o que apresentou o maior tempo de aceleração.

Figura 61 – Velocidade do motor.



Fonte: Autor

Após o degrau de torque na carga o conversor que teve a menor queda de velocidade foi o Back-to-Back e que apresentou a maior queda foi o IMC. Isso ocorre devido ao Back-to-Back possuir uma malha de controle de corrente e de tensão no estágio retificador, fazendo com que consiga manter um mesmo nível de potência para diferentes cargas.

Em relação ao rendimento do motor, foram realizados os seguintes cálculos:

Primeiro foi calculado a velocidade em rad/s.

$$\omega(\text{rad/s}) = v(\text{RPM}) * 0,1047 \quad (1)$$

Seguinte, foi calculado a potência no eixo do motor:

$$P_{mec} = \omega * \tau \quad (2)$$

Por último foi calculado o rendimento do motor, com a potência mecânica calculada e a potência elétrica medida na saída do conversor.

$$n = \frac{P_{mec}}{P_{elec}} \quad (3)$$

Os resultados são apresentados na Tabela 4. O conversor que apresentou os melhores resultados em relação ao rendimento foi o Back-to-Back, enquanto o pior ficou sendo o IMC.

Tabela 4 – Rendimento do Motor

Conversores	Rendimento
IMC entrada 400 Hz	0,851
IMC entrada 800 Hz	0.845
CMC entrada 400 Hz	0,876
CMC entrada 800 Hz	0.875
Back-to-Back entrada 400 Hz	0,885
Back-to-Back entrada 800 Hz	0.884

Fonte: Autor

3.5 DISCUSSÃO

Os resultados foram colocados em duas tabelas, uma apresentando os dados coletados dos conversores referentes a entrada e outra referente a saída.

A Tabela 5 apresenta os valores de corrente eficaz na entrada dos conversores e o fator de potência medido via PSIM. Como a corrente na entrada dos conversores matriciais é comutada, ou seja, apresentam harmônicas de alta frequência, e na simulação não foram utilizados filtros para os matriciais, o valor eficaz e o fator de potência foram medidos em relação a fundamental desses sinais, para que a comparação com o conversor Back-to-Back fosse mais justa.

Como pode ser observado na Tabela 5, os valores de corrente não tiveram muita diferença quando a frequência de entrada é alterada de 400 Hz para 800 Hz, assim como o fator de potência, que a diferença ficou nas casas decimais. Em 400 Hz o conversor que apresenta a menor valor de corrente é o CMC, enquanto o IMC apresenta o maior valor de corrente. No fator de potência, o CMC apresenta o maior valor e o IMC o menor valor. Quando a entrada é alterada para 800 Hz, o conversor que apresenta o maior valor de corrente continua sendo o IMC e o que apresenta o menor valor é o conversor Back-to-Back. Já no fator de potência a ordem continua a mesma, sendo o conversor que apresenta o maior fator de potência o CMC e o menor o IMC.

A Tabela 6 apresenta os valores de corrente eficaz de saída em regime permanente dos conversores, as tensões eficazes da fundamental, já que, assim como a corrente de entrada, as tensões de saída também são comutadas, e apresentam também valores de distorção elevados.

Em 400 Hz o conversor que apresentou o maior valor de corrente foi o IMC, o que ocorre devido ao menor valor de tensão, enquanto o Back-to-Back apresentou o menor valor de corrente

Tabela 5 – Dados referentes a entrada dos conversores.

Conversores	Corrente Eficaz		Fator de Potencia	
	400 Hz	800 Hz	400 Hz	800 Hz
CMC	8,58 A	8,57 A	0,9996	0,9994
IMC	8,79 A	8,77 A	0,9942	0,9892
BB	8,60 A	8,53 A	0,9966	0,9969

Fonte: Autor.

com o maior valor de tensão. Referente a distorção, o CMC possui a menor distorção, enquanto o Back-to-Back tem a maior distorção.

Já em 800 Hz, o IMC continuou com o maior valor de corrente e menor valor de tensão e o Back-to-Back também apresentou o menor valor de corrente e maior valor de tensão. Enquanto a distorção, o CMC ainda possui o menor valor de distorção e o IMC possui o maior valor de distorção.

Tabela 6 – Dados referentes a saída dos conversores.

Conversores	corrente (rms)		Tensão (rms)		THD da corrente (%)	
	400 Hz	800 Hz	400 Hz	800 Hz	400 Hz	800 Hz
CMC	18,05 A	18,01 A	115,02 V	114,82 V	2,68	3,16
IMC	19,70 A	19,72 A	109,92 V	108,96 V	3,68	5,98
BB	17,04 A	17,03 A	121,62 V	121,56 V	4,72	4,78

Fonte: Autor.

Analisando os resultados em um primeiro momento, qualquer um dos conversores pode ser escolhido para fazer o controle do barramento CA de uma aeronave. Porém a vida útil do capacitor do barramento CC do conversor Back-to-Back deve ser levado em consideração, além de que a parte retificadora do Back-to-Back por ser controlada, ela garante uma melhor gestão de energia do conversor, porém, como não é permitida a entrega de energia no sentido da carga para a rede, em alguns casos ela pode ser substituída por uma ponte retificadora a diodo ou até mesmo um ATRU criando um barramento CC.

Devido a limitação teórica dos conversores matriciais, eles são de grande usabilidade em sistemas que necessitam de um barramento menor que a tensão de entrada, não possuem um capacitor que diminui a vida útil do conversor, também acaba sendo um fator positivo a favor dos matriciais, além do menor volume do que o Back-to-Back, porém existe uma complexidade maior em termos de controle dos conversores.

Pela norma MIL-STD são necessários filtros de alta frequência tanto na entrada como na saída, além de filtros de EMI, portanto é necessário realizar um estudo mais detalhado dos conversores, como por exemplo realizar a modelagem matemática deles, definição de cargas, projetar os filtros necessários e refazer todas as simulações, a fim de obter uma melhor avaliação dos conversores.

Os níveis de tensão e corrente foram semelhantes entre os conversores, portanto um mesmo dispositivo semicondutor poderia ser utilizado no projeto dos conversores, como a carga

é feita para potências 12 kVA e a frequência de chaveamento utilizada na simulação foi de 70 kHz, se for observar a Figura 12, apresentada na fundamentação teórica, o semiconductor ideal para ser utilizado estaria justamente em um ponto onde tanto silício, carbeto de silício ou nitreto de gálio atenderiam as especificações.

Mesmo que os três conversores tenham apresentado resultados semelhantes, ainda é necessário fazer a indicação de apenas um deles, e dado o que foi apresentado anteriormente nesta seção de discussão e os resultados simulados, com um ajuste de índice de modulação no IMC seria o suficiente para cumprir com os valores da norma MIL-STD-704F, e o filtro de alta frequência na entrada do conversor não seria muito volumoso, se em comparação com o conversor Back-to-Back, o IMC não possui o capacitor de barramento para armazenar energia, o que implica também, que não necessita de um circuito auxiliar para fazer a carga do capacitor antes do circuito entrar em operação, o que faz com que o IMC possua o volume reduzido em comparação com o Back-to-Back. Já em comparação com o matricial direto, as diferenças se dão por conta de perdas nos semicondutores, já que direto o caminho da corrente se dá por duas chaves interruptoras, enquanto no indireto é por duas chaves interruptoras e um diodo, mas com a eliminação da bidirecionalidade do estágio retificador, as perdas seriam semelhantes, e também por conta do controle, que por ter dois estágios bem definidos, o IMC seria mais simples de controlar.

4 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo investigar a aplicação de conversores CA-CA em More Electric Aircrafts (MEA). Por meio de uma revisão da literatura e da análise de dados obtidos por meio das simulações apresentadas nesse trabalho, foi possível identificar as principais vantagens e desafios associados ao uso desses conversores em aeronaves elétricas.

Os principais achados indicam que os conversores CA-CA apresentaram resultados condizentes com os parâmetros da norma MIL-STD. Além disso, a modularidade e a flexibilidade dos conversores CA-CA permitem uma maior adaptabilidade aos diferentes sistemas elétricos das aeronaves, menos em sistemas de distribuição em corrente contínua, onde para fazer o controle de um motor seria necessário um conversor CC-CA.

No entanto, o estudo também identificou algumas limitações, como a necessidade de um controle mais complexo e os desafios na integração com o gerador elétrico da aeronave, já que não é permitido a regeneração de energia em aeronaves. Essas limitações sugerem que, embora promissores, os conversores CA-CA ainda requerem um desenvolvimento tecnológico adicional para superar esses obstáculos e alcançar uma implementação mais ampla.

Houve ainda uma tentativa de definir um interruptor IGBT para as simulações, porém, apesar de ser uma ferramenta muito boa para as simulações, o PSIM apresentou alguns problemas quando aplicado um modelo não ideal de interruptor em conversores com muitas chaves.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos experimentais mais abrangentes e a investigação de novas técnicas de controle que possam aprimorar o desempenho dos conversores CA-CA. Além disso, a análise da integração desses conversores com outras tecnologias emergentes em aeronaves elétricas pode fornecer *insights* valiosos para a evolução deste campo. Também é recomendado avaliar outras opções de *softwares* para realizar simulações mais precisas e aplicar não idealidades.

Recomenda-se também a exploração de novos materiais semicondutores, como o nitreto de gálio (GaN) e o carbeto de silício (SiC), que podem oferecer melhorias significativas no desempenho dos conversores. Estudos experimentais complementares, além das simulações, seriam valiosos para validar os resultados obtidos e identificar possíveis dificuldades na aplicação real.

Em suma, este estudo contribui para a compreensão das potencialidades e desafios dos conversores CA-CA em MEAs, destacando sua importância para o avanço das aeronaves elétricas. Espera-se que os resultados obtidos possam orientar futuras pesquisas, promovendo um desenvolvimento sustentável e eficiente da aviação elétrica.

REFERÊNCIAS

- 1 GILI, C. *Conversor Matricial Direto Para Acionamento de Motor de Indução Trifásico*. Dissertação (Mestrado) — FURB, Blumenau, 2012. Citado 8 vezes nas páginas 16, 23, 24, 32, 35, 36, 37 e 38.
- 2 BOTTENBERG, A. L. *Conversor Matricial Indireto Para Acionamento de Motor de Indução Trifásico*. Dissertação (Mestrado) — FURB, Blumenau, 2010. Citado 7 vezes nas páginas 16, 25, 28, 29, 32, 33 e 38.
- 3 NASCIMENTO, S. O. et al. Modeling and control of a back-to-back system for turboelectric propulsion. *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, IEEE, p. 1–6, 2019. Acesso em: 10 mai. 2023. Citado na página 16.
- 4 KARIMI, K. Future aircraft power systems: Integration challenges. 2007. Citado na página 17.
- 5 RAHROVI, B. A review of the more electric aircraft power electronics. *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, IEEE, p. 1–6, 2019. Acesso em: 10 abr. 2023. Citado 9 vezes nas páginas 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27 e 28.
- 6 EMADI, K.; EHSANI, M. Aircraft power systems: technology, state of the art, and future trends. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, v. 15, n. 1, p. 28–32, 2000. Acesso em: 30 abr. 2023. Citado na página 18.
- 7 MADONNA, V.; GIANGRANDE, P.; GALEA, M. Electrical power generation in aircraft: review, challenges, and opportunities. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, v. 4, n. 3, p. 646–659, 2018. Acesso em: 30 abr. 2023. Citado na página 18.
- 8 ZHANG, J.; LI, L.; DORRELL, D. G. Control and applications of direct matrix convertes: A review. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, v. 4, n. 2, p. 18–27, 2018. Acesso em: 30 abr. 2023. Citado na página 22.
- 9 RAFIN SAJJAD HOSSAIN., I. R. A review of power electronic converters for electric aircrafts. *2023 Fourth International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM)*, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/368911074_A_Review_of_Power_Electronic_Converters_for_Electric_Aircrafts>. Acesso em: 10 mai. 2024. Citado na página 23.
- 10 FRIEDLI, T. *Comparative Evaluation of Three-Phase Si and SiC AC-AC Converter Systems*. Tese (Doutorado) — ETH ZURICH, Zurich, 2010. Disponível em: <https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/Friedli_PhD_thesis_ETH.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 32.
- 11 PALADINO, A. Curso sobre conversores diretos de energia ac para ac: Evolução da tecnologia e diferentes abordagens. 2022. Citado na página 26.
- 12 GONG, G. et al. Comparative evaluation of three-phase high power factor ac-dc converter concepts for application in future more electric aircrafts. *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04.*, v. 2, p. 1152–1159, 2004. Acesso em: 30 abr. 2023. Citado na página 27.

- 13 WANG, J. Wide bandgap semiconductor-based power electronics for aerospace applications. *IEEE Power Electronics Magazine*, v. 9, n. 3, p. 16–25, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 28, 30 e 31.
- 14 WANG, F. F.; CHEN, R.; RAJASHEKARA, K. Wide bandgap semiconductor-based power electronics for aviation. *IEEE Power Electronics Magazine*, v. 9, n. 3, p. 26–36, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 28, 30 e 31.
- 15 SEMICONDUTORES Wide-Bandgap: O futuro da tecnologia sic e gan. *Embarcados*, 2022. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/wide-bandgap/>>. Acesso em: 30 abr. 2023. Citado na página 31.
- 16 TREMBLAY, L.-A. D. O. Aircraft electrical power generation and distribution. 2006. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/sps/ug/aircraft-electrical-power-generation-and-distribution.html>>. Acesso em: 20 jun. 2024. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 35.