

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

PAULO CEZAR VENTURA JUNIOR

**ANÁLISE E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DA INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA APLICADAS AO BARCO SOLAR DO IFSC**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

PAULO CEZAR VENTURA JUNIOR

**ANÁLISE E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DA INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA APLICADAS AO BARCO SOLAR DO IFSC**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro
Eletrônico.

Orientador:

Prof. Dr. Luis Carlos Martinhago Schlichting

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Ventura Junior, Paulo Cezar
ANÁLISE E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DA INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA APLICADAS AO BARCO SOLAR DO IFSC / Paulo Cezar
Ventura Junior; orientação de Luis Carlos Martinhago
Schlichting. - Florianópolis, SC, 2025.
89 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico
de Eletrônica.
Inclui Referências.

1. Compatibilidade eletromagnética. 2. Embarcação
solar. 3. Interferência eletromagnética. 4. Conversores
chaveados. I. Martinhago Schlichting, Luis Carlos .
II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. ANÁLISE
E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA
APLICADAS AO BARCO SOLAR DO IFSC.

ANÁLISE E ESTRATÉGIA DE MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM EMBARCAÇÕES MOVIDAS A ENERGIA SOLAR

PAULO CEZAR VENTURA JUNIOR

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico em março de 2025 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 27 de março, 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LUIS CARLOS MARTINHAGO SCHLICHTING**
Data: 08/04/2025 16:02:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr.

Documento assinado digitalmente
 **JOABEL MOIA**
Data: 08/04/2025 16:27:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Joabel Moia, Dr.

Documento assinado digitalmente
 **FLABIO ALBERTO BARDEMAKER BATISTA**
Data: 08/04/2025 16:42:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Flávio Alberto Bardemaker Batista, Dr.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina, onde aprendi muito ao longo dos anos em que fui aluno.

Aos professores do Departamento Acadêmico de Eletrônica, que sempre me auxiliaram com tudo que precisei durante o curso.

Ao meu orientador, professor Schlichting (Espirro), por toda a paciência, apoio, conselhos e conhecimentos transmitidos durante essa jornada.

Aos professores membros da banca, que aceitaram o convite de participar deste trabalho e com quem tive a honra de ter aulas incríveis.

Aos meus pais, Laurita e Ventura, que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões e que são a base da minha vida.

À Luiza, minha companheira de vida, com quem tenho a felicidade de compartilhar a vida e crescer junto, e que, como família, me apoia em cada passo.

E, por fim, aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nessa caminhada, e que com certeza me ajudaram a chegar até aqui.

"Nunca desista, nunca desista"
(Michael Schumacher)

RESUMO

Neste trabalho, investigou-se a compatibilidade eletromagnética em uma embarcação naval movida a energia solar, desenvolvida para competições acadêmicas, com ênfase na identificação e mitigação de interferências eletromagnéticas geradas por conversores chaveados e demais módulos eletrônicos. A pesquisa combinou uma revisão bibliográfica aprofundada com a análise de um estudo de caso da embarcação Guarapuvu II, considerando os desafios inerentes à integração de sistemas de alta frequência e os efeitos adversos decorrentes da proximidade de componentes críticos, como os MOSFETs e circuitos de controle. Foram avaliados aspectos do layout das placas, o dimensionamento dos caminhos de retorno e a eficácia de técnicas como filtragem, blindagem e redução da área de loop. Os resultados demonstraram que pequenas inadequações no projeto podem amplificar a emissão de ruídos, comprometendo a estabilidade e o desempenho do sistema. Em vista disso, o trabalho propõe estratégias de mitigação que enfatizam a importância das boas práticas de EMC na fase de projeto, contribuindo para a robustez e eficiência operacional em ambientes marítimos.

Palavras-chave: Compatibilidade Eletromagnética. Embarcação Solar. Interferência Eletromagnética. Conversores Chaveados.

ABSTRACT

This study investigates the electromagnetic compatibility aspects of a solar-powered naval vessel designed for academic competitions, with a focus on identifying and mitigating electromagnetic interference caused by high-frequency switching converters and other onboard electronic modules. A comprehensive literature review was complemented by a case study of the Guarapuvu II vessel, analyzing circuit schematics, PCB layouts, and practical feedback from the engineering team. The findings reveal that even minor design imperfections, such as inadequate shielding or excessive loop areas, can significantly increase EMI, thereby affecting system stability and overall performance. The proposed mitigation strategies, which include enhanced filtering, optimized component placement, and improved grounding techniques, underscore the critical role of EMC best practices in the early stages of design. Ultimately, the study contributes to the advancement of robust and efficient maritime systems by offering viable solutions for reducing interference in complex electronic environments.

Keywords: Electromagnetic Compatibility. Solar-Powered Vessel. Electromagnetic Interference. Switched Converters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Decomposição em diagrama de blocos de um problema de EMC	19
Figura 2 - Exemplos de EMI conduzida e radiada.....	19
Figura 3 – Linha de transmissão de três condutores representando <i>crosstalk</i>	23
Figura 4 - <i>Ferrite Bead</i> de uso comercial	26
Figura 5 - <i>Choke</i> de modo comum	26
Figura 6 – Possíveis áreas de loop em um conversor estático	29
Figura 7 - Princípio básico de um conversor CC-CC genérico	33
Figura 8 – Entrada (a) e bloqueio (b) de um diodo em corrente e tensão	34
Figura 9 – Entrada (a) e bloqueio (b) de um transistor bipolar em corrente e tensão	34
Figura 10 - Oscilações que acontecem na comutação de um sinal	37
Figura 11 - Comparação entre espectros harmônicos de sinais com tempos de subida e descida nulo (esquerda) e não nulo (direita)	38
Figura 12 - Forma de onda evidenciando a oscilação juntamente com sua análise harmônica.....	38
Figura 13 - Embarcação Guarapuvu II	41
Figura 14 - Representação geral do posicionamento dos componentes do sistema.....	44
Figura 15 – Compartimento da eletrônica da embarcação Zênite Solar	45
Figura 16 - Foco no compartimento da eletrônica evidenciando os cabos de sinal ..	46
Figura 17 - Diagrama do fluxo de energia da embarcação	49
Figura 18 – Visualização 3D frente e verso da placa MCB, com os MOSFETs circulados.....	51
Figura 19 – Visualização 3D da placa MFP, frente e verso.....	53
Figura 20 – Corte do esquemático da placa MFP	54
Figura 21 – Visualização 3D da placa MCC.....	55
Figura 22 - Gráfico da simulação para encontrar o ponto de máxima eficiência do MCC.....	56
Figura 23 – Adaptações na placa do MCC.....	57
Figura 24 – Recorte do <i>layout</i> de uma das camadas internas da placa do MCC.....	59
Figura 25 - Recorte do compartimento da eletrônica evidenciando o MCS, MAM e banco de capacitores	60
Figura 26 – Inconsistência na blindagem de cabos pela equipe	62
Figura 27 - Comparação entre conectores RJ45 com e sem blindagem.....	63
Figura 28 - Cabo de rede CAT-7	64
Figura 29 – <i>Layout</i> e esquemático das conexões utilizadas no RJ45 da rede CAN	65
Figura 30 – Trilha do Gate possível de fazer a redução para diminuir a área do sinal crítico	71
Figura 31 - Possíveis aplicações de blindagem localizada na placa do MCC	73
Figura 32 – Esquemático da placa MFP separado em estágios	76
Figura 33 – Blindagem local aplicada a uma PCI.....	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Plano de ação proposto.....	80
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Módulos instalados na embarcação	49
Tabela 2 – Comparações entre as menores harmônicas entre placas com e sem mudança de frequência nas placas.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	Circuito Integrado
DTFT	<i>Discrete Time Fourier Transform</i> (Transformada Discreta de Fourier)
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> (Compatibilidade Eletromagnética)
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> (Interferência Eletromagnética)
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i> (Resistência Série Equivalente)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
MA	Modulação em Amplitude
MCB	Módulo de Carregamento da Bateria
MCC	Módulo de Controlador de Carga
MCS	Módulo de Carregamento do Sistema
MDE	Módulo da Direção Elétrica
MF	Modulação em Frequência
MFP	Módulo da Fonte Principal
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RF	Radiofrequência
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmônica Total)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère – Unidade de corrente elétrica
dI/dt	Taxa de variação de corrente elétrica (A/s)
dV/dt	Taxa de variação de tensão elétrica (V/s)
Hz	Hertz – Unidade de frequência
V	Volt – Unidade de potencial elétrico
W	Watt – Unidade de potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Definição do Problema	16
1.3	Objetivo Geral	16
1.4	Objetivos Específicos	16
1.5	Estrutura do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Compatibilidade Eletromagnética	18
2.1.1	Interferência Conduzida	20
2.1.2	Interferência Radiada	20
2.1.3	Susceptibilidade	21
2.1.4	Ruídos de Modo Comum	21
2.1.5	Ruídos de Modo Diferencial	22
2.1.6	<i>Crosstalk</i>	23
2.1.7	Frequências de batimento	24
2.2	Técnicas de Mitigação de Interferências	25
2.2.1	Filtros e Blindagem	25
2.2.2	Eficiência e Descontinuidade da Blindagem	27
2.2.3	Redução da área de Loop	28
2.2.4	Acoplamento Capacitivo e Indutivo	29
2.2.5	Par trançado como técnica para Mitigação de EMI	30
2.3	Placas de circuito impresso	31
2.4	Conversores Estáticos	32
2.4.1	Topologias comuns de conversores CC-CC	32
2.4.2	Comutação	33
2.4.2.1	<i>Conteúdo harmônico nas comutações</i>	35
2.4.2.2	<i>Oscilação</i>	36
2.4.3	PWM	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	Métodos aplicados	42
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	44
4.1	Compartimento da Eletrônica	45
4.1.1	Análise do MCB	50
4.1.2	Análise do MFP	52
4.1.3	Análise do MCC	55
4.1.4	Análise do MCS	59
4.2	Problemas gerais da embarcação	61
4.2.1	Análise da blindagem	62
4.2.2	Análise dos conectores dos módulos	65
4.2.3	Análise do funcionamento da rede CAN	67
4.2.4	Análise dos sistemas auxiliares	68
4.3	Análise e discussão dos resultados	69
4.3.1	Soluções para o MCC	70
4.3.1.1	<i>Soluções em Hardware</i>	70
4.3.1.2	<i>Soluções em Firmware</i>	74

4.3.2	Soluções para o MCB	75
4.3.3	Soluções para o MFP	76
4.3.4	Soluções para o MCS	77
4.3.5	Soluções para o restante da embarcação	78
4.3.6	Plano de ação para a equipe	79
4.3.6.1	<i>Primeira etapa</i>	81
4.3.6.2	<i>Segunda etapa</i>	81
4.3.6.3	<i>Terceira etapa</i>	82
4.3.6.4	<i>Quarta etapa</i>	82
4.3.6.5	<i>Quinta e sexta etapas</i>	82
4.3.6.6	<i>Sétima etapa</i>	83
4.3.6.7	<i>Etapa final</i>	84
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	86
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se observado um crescimento significativo no interesse por fontes de energia renovável, impulsionado pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os impactos das mudanças climáticas. Nesse contexto, a energia solar desponta como uma alternativa promissora, oferecendo não apenas uma fonte limpa e abundante de energia, mas também a possibilidade de aplicação em diversos setores, incluindo o transporte marítimo.

As embarcações navais, como importantes meios de transporte de cargas e pessoas, têm enfrentado desafios consideráveis para se tornarem mais sustentáveis e eficientes. A integração de sistemas de propulsão baseados em energia solar surge como uma solução inovadora para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar o impacto ambiental dessas embarcações.

No entanto, a implementação bem-sucedida de sistemas com energia solar em embarcações navais requer não apenas a consideração dos aspectos técnicos e operacionais, mas também a avaliação cuidadosa da compatibilidade eletromagnética (*Electromagnetic Compatibility* - EMC). A EMC refere-se à capacidade de diferentes sistemas eletrônicos e elétricos operarem de forma eficaz e segura no mesmo ambiente, sem causar interferências prejudiciais uns nos outros.

Portanto, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise detalhada da compatibilidade eletromagnética aplicada a uma embarcação desenvolvida no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) para competições acadêmicas movida a energia solar. Serão abordados aspectos relacionados à concepção do sistema de propulsão solar, à integração de dispositivos eletrônicos e elétricos a bordo, bem como à mitigação de possíveis interferências eletromagnéticas.

Por meio desta análise, busca-se oferecer conhecimentos valiosos para o desenvolvimento de embarcações navais mais sustentáveis e eficientes, contribuindo para o avanço da tecnologia marítima e para a preservação do meio ambiente.

1.1 Justificativa

Ao projetar uma embarcação naval, especialmente para competições acadêmicas, é crucial garantir a robustez do sistema, sua capacidade de operar em condições adversas e a obtenção de um desempenho satisfatório. No entanto, dado que a eletrônica do barco foi construída e desenvolvida inteiramente por alunos da instituição, algumas diretrizes importantes de compatibilidade eletromagnética foram inadvertidamente negligenciadas, em grande parte devido à falta de familiaridade com tais práticas.

Essa lacuna resultou em uma série de problemas operacionais, cuja origem se revela obscura. É possível que esses problemas estejam relacionados à interferência eletromagnética (*Electromagnetic Interference* - EMI), ocasionada pela proximidade entre sistemas emissores e componentes sensíveis.

Diante deste cenário, propõe-se realizar uma análise abrangente da embarcação, seguindo as boas práticas, a fim de analisar o funcionamento geral do ponto de vista da EMC.

1.2 Definição do Problema

Diante do cenário apresentado, a pergunta fundamental que guiará este trabalho é: Quais estratégias e medidas podem ser adotadas para garantir a compatibilidade eletromagnética em embarcações navais movidas a energia solar, a fim de mitigar interferências prejudiciais entre os sistemas eletrônicos e elétricos embarcados?

1.3 Objetivo Geral

Analisar a embarcação Guarapuvu II da equipe Zênite Solar, pelo ponto de vista de EMC.

1.4 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo previamente descrito, os seguintes objetivos específicos necessitam ser destacados:

- a) Realizar a fundamentação teórica do conteúdo que será utilizado como base para o presente trabalho.
- b) Realizar uma análise detalhada da embarcação Guarapuvu II da equipe Zênite Solar, identificando os sistemas eletrônicos e elétricos embarcados.
- c) Identificar as possíveis fontes de EMI que podem afetar o funcionamento da embarcação.
- d) Avaliar a EMC da embarcação, considerando a proximidade entre sistemas emissores e componentes sensíveis.
- e) Propor medidas e estratégias para mitigar as interferências eletromagnéticas identificadas, levando em conta as boas práticas de design relacionados à EMC.
- f) Elaborar um plano de ação para implementar as medidas de mitigação propostas.

1.5 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho está organizada em cinco capítulos que se articulam de maneira a proporcionar uma compreensão progressiva e integrada do tema. No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, na qual são contextualizados o problema, a justificativa e os objetivos da pesquisa. Em seguida, o segundo capítulo dedica-se à fundamentação teórica, onde são abordadas as principais teorias e conceitos relativos à compatibilidade eletromagnética e às tecnologias de energia solar aplicadas a embarcações. Posteriormente, o terceiro capítulo expõe a metodologia utilizada, detalhando os métodos, os procedimentos adotados e os critérios para a identificação dos pontos críticos do sistema analisado. O quarto capítulo reúne a apresentação dos resultados, acompanhada de uma análise crítica que evidencia as implicações práticas dos achados e os desafios enfrentados. Por fim, o quinto capítulo traz as considerações finais, nas quais são sintetizadas as conclusões do estudo e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

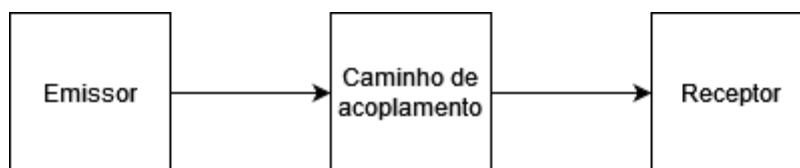
Este capítulo tem como objetivo apresentar as teorias e práticas fundamentais para a compreensão dos temas abordados neste trabalho. Inicialmente, são discutidos os conceitos de EMC, seguidos pelas principais técnicas de mitigação de ruído. Em seguida, são abordadas as boas práticas no design de placas de circuito impresso (PCI), com foco na integridade do sinal e na redução de interferências eletromagnéticas, visando garantir um funcionamento eficiente e confiável dos circuitos. Por fim, é abordado o conceito de conversores estáticos, necessários para compreender o motivo das decisões sobre medidas de mitigação de EMI.

2.1 Compatibilidade Eletromagnética

A EMC é uma área essencial na engenharia elétrica e eletrônica, focada em garantir que equipamentos e sistemas operem de forma eficaz em seu ambiente eletromagnético, sem causar ou sofrer perturbações intoleráveis de outros dispositivos no mesmo ambiente. De acordo com Paul (2006), o sucesso na projeção de sistemas eletrônicos depende de sua compatibilidade eletromagnética com o ambiente em que operam. Montrose (2000) complementa, afirmando que a EMC assegura que os dispositivos funcionem dentro de margens de segurança definidas e sem causar degradações inaceitáveis devido à EMI. Para alcançar essa compatibilidade, um sistema deve atender a três critérios fundamentais: não interferir em outros sistemas, não ser suscetível a emissões externas e não gerar interferências em si mesmo.

Paul (2006) discute a complexidade de identificar os três elementos fundamentais de um problema de EMC – fonte, caminho de acoplamento e receptor – uma vez que esses elementos podem se comportar de maneira intencional ou não, dependendo das condições. A figura 1 mostra esses três elementos fundamentais, onde o emissor é o que gera a emissão de EMI, o caminho de acoplamento pode ser um cabo ou até mesmo o ar, e o receptor é o sistema que é afetado pela EMI do emissor.

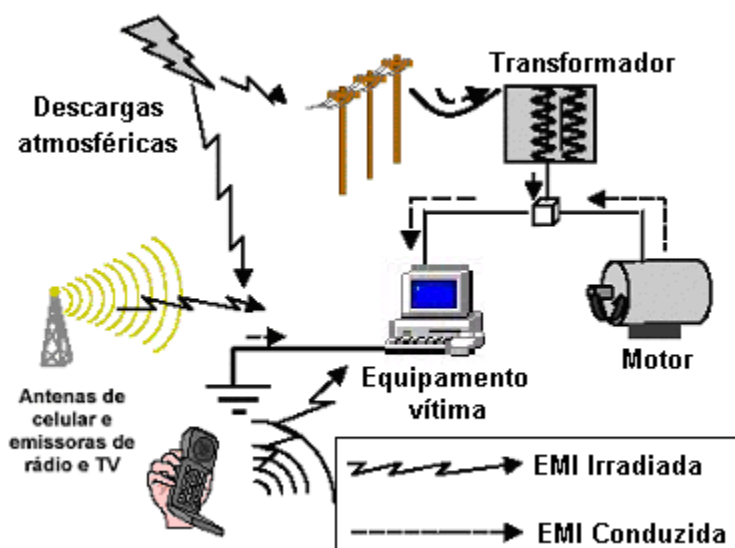
Figura 1 - Decomposição em diagrama de blocos de um problema de EMC



Fonte: Adaptado de Paul (2006, p. 3).

Montrose (2000) destaca que a EMI é o resultado da falta de compatibilidade, ocorrendo quando a energia eletromagnética disruptiva é transmitida de um dispositivo eletrônico para outro por meio de caminhos **radiados** ou **conduzidos**. Essa interferência pode ser particularmente prejudicial no caso de emissões de radiofrequência (RF), que são transmitidas como campos eletromagnéticos ou ondas propagadas por cabos e interconexões. A figura 2 ilustra um exemplo de vários sinais gerando interferências tanto radiadas como conduzidas.

Figura 2 - Exemplos de EMI conduzida e radiada



Fonte: Sanches (2010).

Dado esse contexto, Paul (2006) sugere três abordagens principais para prevenir interferências: suprimir a emissão na fonte, tornar o caminho de acoplamento o menos eficiente possível e reduzir a suscetibilidade do receptor à emissão. Montrose (2000) reforça a importância da imunidade, definida como a

capacidade de um dispositivo ou sistema de resistir à exposição à EMI enquanto mantém um nível de desempenho predefinido. Essas medidas são essenciais para garantir que sistemas eletrônicos operem de forma compatível com seu ambiente, minimizando as chances de interferência e assegurando o bom funcionamento em diversas condições eletromagnéticas.

2.1.1 Interferência Conduzida

De acordo com Schlichting (2003), a interferência conduzida é um fenômeno onde as interferências eletromagnéticas são transmitidas através de condutores metálicos ou elementos parasitas, levando ruídos tanto para dentro quanto para fora de um sistema. Tradicionalmente, a maior preocupação com a interferência por condução estava relacionada ao ruído injetado na rede de alimentação elétrica, que atua como meio de propagação desse ruído. Contudo, à medida que os sistemas eletrônicos se tornam mais complexos e variados, a rede de alimentação continua sendo uma via crítica para a propagação de interferências, exigindo maior atenção no estudo e na modelagem desses efeitos para garantir a compatibilidade eletromagnética.

2.1.2 Interferência Radiada

De acordo com Schlichting (2003), a interferência radiada é um fenômeno em que o ruído eletromagnético é transmitido para dentro ou fora de um sistema por meios não metálicos, como o ar. Esses ruídos são gerados por correntes que circulam em trilhas, cabos e terminais de semicondutores, formando *loops* que criam campos eletromagnéticos. A intensidade desses campos depende de fatores como a amplitude e frequência da corrente, o comprimento das trilhas e cabos, e a área do caminho fechado. A previsão e a redução das interferências radiadas são desafios complexos que exigem um profundo conhecimento do comportamento eletromagnético dos materiais envolvidos e das características do sistema como um todo.

2.1.3 Susceptibilidade

A susceptibilidade, no contexto da EMC, refere-se à capacidade de um sistema ou dispositivo de manter seu desempenho adequado mesmo quando exposto a interferências provenientes de fontes externas. De acordo com Schlichting (2003), um sistema deve atender a três critérios fundamentais para ser considerado eletromagneticamente compatível: não emitir interferência, não ser afetado (ou seja, não ser susceptível) à interferência proveniente de outros sistemas e, ainda, não sofrer degradação em seu próprio funcionamento devido às perturbações internas.

Um ponto crucial destacado por Schlichting (2003) é a reciprocidade entre emissão e susceptibilidade. Segundo essa abordagem, se um equipamento gera uma determinada faixa de EMI, ele tende a ser suscetível a interferências na mesma faixa de frequência. Dessa forma, estratégias que visam reduzir as emissões, como o emprego de filtros, blindagens e ajustes no *layout* dos circuitos, podem também contribuir para diminuir a susceptibilidade do sistema.

Portanto, conforme Schlichting (2003), o estudo da susceptibilidade é fundamental para uma compreensão completa dos mecanismos de EMC, permitindo o desenvolvimento de soluções que atendam às exigências normativas e assegurem a operação estável dos equipamentos, mesmo em ambientes com elevados níveis de perturbação eletromagnética.

2.1.4 Ruídos de Modo Comum

De acordo com Paul (2006), ruído de modo comum refere-se à interferência que afeta simultaneamente ambos os condutores de um sistema de transmissão, produzindo um potencial comum em relação à referência do sistema. Esse tipo de ruído pode ser causado por acoplamento eletromagnético, imperfeições no aterramento ou emissões externas que afetam de maneira igual ambos os condutores.

Segundo Bogatin (2018), um sinal pode ser decomposto em componentes diferenciais e comuns, sendo o componente comum definido como a média das tensões nos condutores. Esse conceito é essencial para entender a forma como o ruído de modo comum se propaga e impacta os circuitos eletrônicos.

Segundo Paul (2006), para mitigar o ruído de modo comum, diversas técnicas podem ser aplicadas, como o uso de filtros, aterramento adequado, pares trançados e blindagem eficiente. O correto dimensionamento do sistema de transmissão e a escolha de materiais adequados também desempenham um papel crucial na redução desse tipo de interferência.

2.1.5 Ruídos de Modo Diferencial

Os ruídos de modo diferencial são aqueles que circulam entre os condutores fase e neutro, sem envolver o fio terra, e estão diretamente relacionados às correntes funcionais do circuito (Paul, 2006). Esses ruídos são frequentemente gerados por fontes como retificadores, fontes chaveadas e harmônicos de *clock*, podendo causar interferências tanto em emissões conduzidas quanto irradiadas. De acordo com Paul (2006), diferentemente dos ruídos de modo comum, os ruídos diferenciais são mais previsíveis, pois seguem o caminho intencional do circuito, mas ainda assim podem exceder os limites regulatórios se não forem adequadamente controlados.

Para a supressão eficaz desses ruídos, Paul (2006) recomenda o uso de capacitores X (linha-linha) em filtros de alimentação, que desviam as correntes de alta frequência antes que elas atinjam a rede elétrica. O autor também destaca a importância de indutores de vazamento em *chokes* de modo comum, que, apesar de serem projetados principalmente para modo comum, apresentam uma pequena indutância residual que ajuda a atenuar ruídos diferenciais. Paul (2006) ressalta que o projeto desses componentes deve considerar a impedância do sistema para garantir uma filtragem eficiente ao longo de toda a faixa de frequência de interesse.

Além dos filtros, Paul (2006) sugere técnicas de *layout* de PCI e roteamento adequado de cabos para minimizar a geração e o acoplamento de ruídos diferenciais. O autor explica que *loops* de corrente mal controlados e trilhas longas podem agravar esses ruídos, aumentando as emissões conduzidas. Portanto, conforme Paul (2006), a combinação de filtragem ativa, boas práticas de projeto e um correto aterramento é essencial para manter os níveis de ruído diferencial dentro dos limites.

2.1.6 Crosstalk

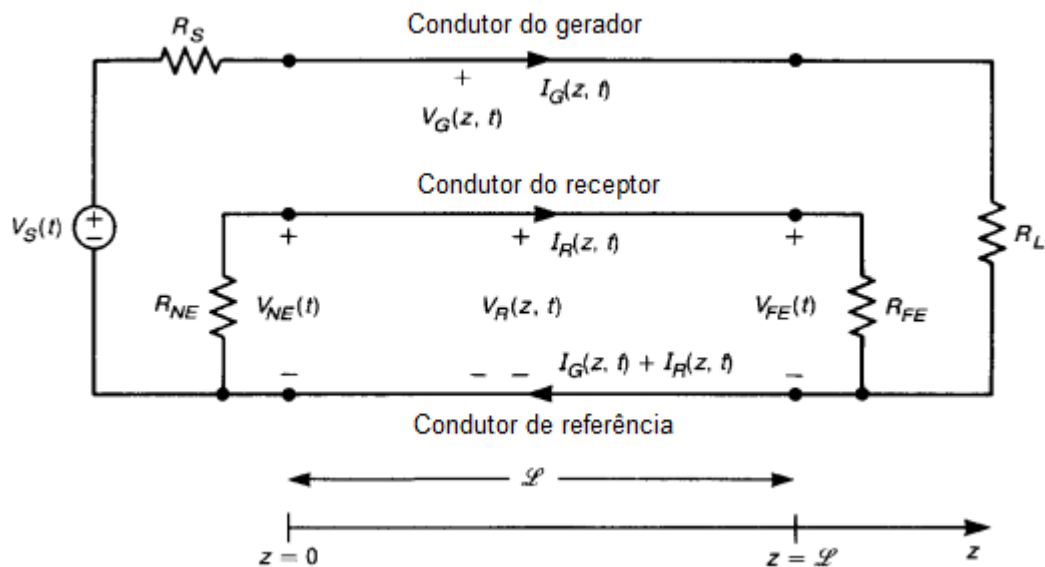
Segundo Bogatin (2018), “*Crosstalk* é uma das formas típicas de criação de correntes comuns em um par diferencial. Mesmo que o par diferencial seja projetado com perfeita simetria, o *crosstalk* pode causar a criação de tensões comuns nesse par”. Ele também fala que a distribuição do material dielétrico ao redor dos condutores deve ser uniforme e homogêneo para garantir que o acoplamento capacitivo seja o mesmo que o acoplamento indutivo relativo. Dessa forma, é garantido que não haverá *crosstalk* na extremidade oposta.

O autor também destaca que o aumento do acoplamento entre linhas de sinal resulta diretamente no crescimento do ruído no extremo receptor do circuito.

Morrison (2007) reforça que, quanto mais próximo a trilha está do plano de referência do circuito, menor é o *crosstalk* resultante.

Por fim, Paul (2006) fala que “O *crosstalk* no domínio do tempo é a soma das contribuições de acoplamento indutivo e capacitivo devido à indutância mútua e capacitância entre os circuitos gerador e receptor.”. A figura 3 mostra a representação de uma linha de transmissão de três condutores, ilustrando *crosstalk* entre o circuito gerador e receptor.

Figura 3 – Linha de transmissão de três condutores representando *crosstalk*



Fonte: Adaptado de Paul (2006).

O modelo da figura 3 consiste em dois condutores paralelos (o circuito gerador e o circuito receptor) que compartilham um condutor comum de retorno. O *crosstalk* ocorre devido ao acoplamento eletromagnético entre os condutores, resultado da capacitância mútua (acoplamento elétrico) e indutância mútua (acoplamento magnético). Quando o circuito gerador transmite um sinal, parte dessa energia é acoplada ao circuito receptor, manifestando-se como uma interferência indesejada. A figura demonstra como a proximidade física entre os condutores e a configuração do retorno comum contribuem para a interação entre os campos eletromagnéticos.

2.1.7 Frequências de batimento

De acordo com Oppenheim (2009), o fenômeno das frequências de batimento (*beat frequencies*) ocorre quando dois sinais senoidais com frequências próximas são somados, resultando em um padrão de modulação na amplitude do sinal resultante. Essa modulação é observada como uma variação periódica na amplitude, cuja frequência corresponde à diferença entre as frequências originais. Em termos espectrais, a soma dessas senoides gera novas componentes localizadas nas frequências de soma e diferença, o que aumenta a complexidade do espectro.

No contexto da EMC, esse fenômeno assume particular relevância em sistemas eletrônicos onde múltiplas fontes chaveadas ou sinais de alta frequência coexistem. Em tais sistemas, a presença de frequências de batimento pode resultar na geração de componentes espectrais adicionais, potencialmente localizadas em faixas de frequência críticas para o funcionamento de outros circuitos ou para a conformidade com padrões de EMC. Essas novas componentes de frequência podem atuar como fontes não intencionais de EMI, uma vez que podem propagar ruído em regiões espectrais onde a mitigação não foi previamente considerada.

Além disso, Oppenheim (2009) destaca que, para diferenciar frequências muito próximas utilizando métodos tradicionais, como a Transformada Discreta de Fourier (DTFT), seriam necessárias janelas de tempo longas, o que pode não ser viável em análises rápidas ou em tempo real. Isso representa um desafio adicional em EMC, pois frequências de batimento de baixa amplitude e longa duração podem

passar despercebidas em testes convencionais, mas ainda assim interferir em sistemas sensíveis.

Entretanto, ainda segundo Oppenheim (2009), utilizando modelos paramétricos, como o modelo *all-pole* e o método de covariância, é possível identificar com precisão essas frequências de batimento, mesmo em segmentos curtos de sinal. Essa abordagem analítica se mostra essencial em EMC para diagnosticar e mitigar problemas relacionados à interferência espectral, garantindo o desempenho estável e confiável dos sistemas eletrônicos.

2.2 Técnicas de Mitigação de Interferências

Como abordado anteriormente, a EMC preocupa-se com a geração, transmissão e recepção de energia eletromagnética, portanto, a mitigação de interferências se dá nesses três pontos citados. Para Schlichting (2003), um sistema pode ser considerado interferente quando sua energia eletromagnética consegue afetar outro sistema, causando problemas de funcionamento. Esse ruído transferido pode ocorrer tanto por condutores como pelo ar. Para reduzir a interferência entre dois sistemas é necessário reduzir a emissão gerada pela fonte principal de interferência, diminuir a eficácia do meio de acoplamento entre a fonte do ruído e o receptor, e por fim deixar o receptor o menos susceptível possível a interferência gerada pelo sistema fonte. Para isso, são aplicadas diversas técnicas de mitigação de interferências.

2.2.1 Filtros e Blindagem

Uma das técnicas aplicadas de mitigação de EMI é a de aplicar filtros e blindagens, tanto no sistema emissor como no sistema receptor da EMI. De acordo com Schlichting (2003), cada tipo de interferência possui um filtro ideal, sendo a interferência conduzida utilizado filtros com capacitores e indutores, e a interferência radiada utilizado blindagem nos equipamentos. Ele ainda complementa informando que, apesar de possuírem a mesma função, os filtros e blindagens atuam em frequências e meios diferentes, por isso é necessário o conhecimento do sistema para se aplicar a técnica correta. A figura 4 mostra um *ferrite bead*, que, segundo

Altium (2017), converte energia de alta frequência em calor por meio de perdas magnéticas, atuando como um filtro para ruídos de alta frequência.

Figura 4 - Ferrite Bead de uso comercial



Fonte: Altium (2017).

Outra aplicação de filtro é a de um *choke* de modo comum. De acordo com Altium (2021), os *chokes* de modo comum são fundamentais para a filtragem de ruídos em sistemas de energia, atuando para suprimir as correntes de modo comum que podem interferir no desempenho dos circuitos. A figura 5 mostra um *choke* de modo comum.

Figura 5 - Choke de modo comum



Fonte: Altium (2021).

Além disso, Paul (2006) destaca que a blindagem de circuitos eletrônicos é uma estratégia essencial para controlar a emissão de radiação, prevenindo que a eletrônica do produto cause interferência em outros dispositivos ou que receba sinais externos que possam comprometer seu funcionamento. A eficácia de uma blindagem é diretamente relacionada à sua capacidade de bloquear campos

eletromagnéticos, sendo a ausência de pontos de entrada, como furos ou fios, crucial para garantir a proteção. A presença de aberturas ou falhas na blindagem pode reduzir drasticamente sua eficiência, permitindo a passagem de campos externos que afetam a performance do sistema.

Por fim, Paul (2006) também alerta que os efeitos de uma blindagem podem ser comprometidos quando cabos passam por furos na estrutura, permitindo que campos eletromagnéticos penetrem ou escapem, o que compromete a eficácia da proteção. Mesmo que uma blindagem seja eficiente, sua efetividade pode ser drasticamente reduzida por falhas desse tipo, como no caso de cabos que não são devidamente tratados em suas entradas ou saídas. Esses detalhes, frequentemente negligenciados, podem gerar radiação indesejada e interferência, destacando a importância de uma análise minuciosa do projeto do sistema para garantir que todos os pontos de penetração sejam corretamente tratados.

2.2.2 Eficiência e Descontinuidade da Blindagem

A eficiência de blindagem eletromagnética é um fator fundamental para a redução da interferência eletromagnética em sistemas eletrônicos, sendo diretamente relacionada à capacidade de um material em atenuar sinais indesejados. Segundo Paul (2006), a eficiência da blindagem depende de diversos parâmetros, como a condutividade e a permeabilidade do material, bem como a geometria e a espessura da blindagem. Blindagens mais eficientes são aquelas que apresentam menor resistência ao fluxo de corrente induzida pelas ondas eletromagnéticas, o que reduz a transmissão de energia através do material.

No entanto, a eficácia de uma blindagem não é apenas uma questão de escolha do material, mas também da forma como é implementada. Paul (2006) ressalta que as descontinuidades na blindagem, como aberturas, falhas no revestimento ou conexões inadequadas, podem comprometer drasticamente a eficiência do sistema. Mesmo que o material da blindagem tenha boas propriedades, a presença de descontinuidades pode criar pontos de passagem para as ondas eletromagnéticas, permitindo que a interferência ultrapasse a barreira de proteção. Tais descontinuidades podem ocorrer, por exemplo, em torno de conectores, janelas, portas ou outros pontos de entrada, criando caminhos de baixa resistência para as ondas eletromagnéticas.

Dessa forma, a efetividade da blindagem não depende exclusivamente da escolha do material, mas também da precisão na implementação e na manutenção das condições ideais de integridade estrutural. Paul (2006) destaca que, para garantir uma blindagem eficiente, é essencial minimizar as descontinuidades e garantir que as conexões entre diferentes partes da blindagem sejam firmemente estabelecidas, evitando, assim, que a interferência passe por pontos vulneráveis do sistema.

Bogatin (2018) complementa dizendo que a eficiência da blindagem também é afetada pela presença de capacitâncias parasitas entre os componentes da placa de circuito, o chassi da caixa e a referência. Essas capacitâncias podem fornecer um caminho de retorno indesejado para a corrente comum, o que diminui ainda mais a eficácia da blindagem. À medida que o sinal comum viaja ao longo do cabo, a corrente de retorno é acoplada continuamente a condutores próximos, o que pode aumentar a radiação de EMI em frequências elevadas. Dessa forma, a eficiência da blindagem e o controle de EMI dependem não apenas da qualidade do cabo em si, mas também do design e da gestão adequados dos caminhos de retorno de corrente.

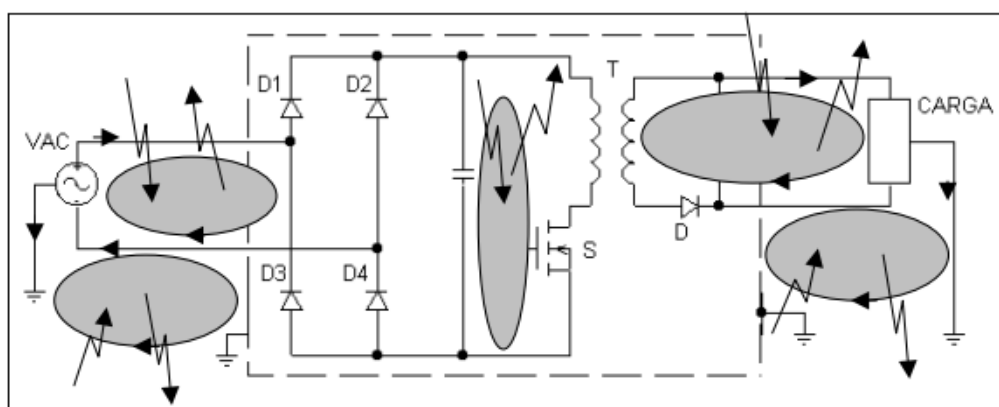
2.2.3 Redução da área de Loop

A redução da área de loop é um fator crucial no projeto de sistemas de aterramento e PCIs para minimizar as emissões radiadas e melhorar a integridade do sinal. De acordo com Paul (2006), as correntes retornam ao seu ponto de origem ao longo dos caminhos de menor impedância, e a impedância total do caminho é determinada pela indutância de loop completa (trilha de ida e volta) e pela área de loop. Quanto menor for a área do loop, menor será a impedância total do caminho, e, conseqüentemente, a corrente escolherá retornar pela trajetória com a área de loop menor, minimizando as emissões radiadas (Paul, 2006). Em designs de PCI, quando as opções de caminhos de retorno são limitadas, a corrente tende a criar grandes áreas de loop, aumentando as emissões. Portanto, o uso de vias de aterramento distribuídas ao longo da PCI, formando uma malha de aterramento “trançada”, pode reduzir a área do loop ao fornecer múltiplos caminhos de retorno para a corrente (Paul, 2006). Dessa forma, projetar PCIs com áreas de *loop*

reduzidas é uma prática fundamental para a redução de ruído e emissões indesejadas.

Schlichting (2003) complementa, tendo em vista que toda corrente possui um retorno, é importante que as trilhas de propagação do sinal e do retorno fiquem sempre o mais próximas uma da outra, para dessa forma reduzir a área de loop.

Figura 6 – Possíveis áreas de loop em um conversor estático



Fonte: Schlichting (2003).

A figura 6 mostra possíveis áreas de loop em um conversor chaveado. De acordo com Schlichting (2003), esses laços podem agir como antenas, emitindo e recebendo EMI, prejudicando o sistema. Ou seja, ao longo de todo um projeto de conversores estáticos, por exemplo, deve-se ter essa preocupação com possíveis entradas e saídas de ruído no sistema.

2.2.4 Acoplamento Capacitivo e Indutivo

Para Schlichting (2003), o acoplamento capacitivo e indutivo nada mais é do que um caminho não intencional que a EMI conduzida pode se propagar. É necessário conhecer todos os caminhos que o ruído pode percorrer, e o caminho dos acoplamentos pode ser um dos mais complexos.

Além disso, Paul (2006) destaca que o acoplamento capacitivo ocorre devido à interação do campo elétrico entre condutores próximos, sendo influenciado pela capacitância mútua, enquanto o acoplamento indutivo é resultado da variação do campo magnético gerado por correntes em circuitos adjacentes. No modelo de acoplamento indutivo-capacitivo, a interferência é descrita por meio da indutância e

capacitância mútuas, onde a corrente e a tensão induzidas no circuito receptor dependem das características do circuito gerador e da separação entre as linhas condutoras. Para reduzir esse tipo de interferência, estratégias como o aumento da distância entre os condutores e o uso de blindagens podem ser adotadas, minimizando os efeitos da indução eletromagnética não desejada.

Por fim, para minimizar os efeitos do acoplamento capacitivo e indutivo, Bogatin (2018) sugere duas abordagens principais: aumentar o espaçamento entre as trilhas de sinal e reduzir a distância entre as trilhas de sinal e os planos de retorno. O aumento do espaçamento reduz a sobreposição dos campos elétricos e magnéticos entre os condutores, diminuindo a capacitância e a indutância mútua. Já a aproximação dos planos de retorno confina melhor os campos na região próxima às trilhas de sinal, limitando sua propagação para trilhas adjacentes. Essas estratégias são essenciais para mitigar a diafonia e garantir a integridade do sinal, especialmente em circuitos de alta velocidade, onde a interferência entre linhas pode comprometer a performance do sistema.

2.2.5 Par trançado como técnica para Mitigação de EMI

Bogatin (2018) diz que o cabeamento que sai de um sistema com blindagem é, geralmente, uma das causas mais comuns de emissão de EMI.

Além de ser um meio eficiente para transmissão de sinais diferenciais, o par trançado desempenha um papel fundamental na mitigação de EMI. De acordo com Bogatin (2018), sua estrutura reduz significativamente a radiação eletromagnética associada aos sinais diferenciais, tornando-o um radiador ineficiente para esse tipo de sinal. A torção dos fios contribui para o cancelamento dos campos eletromagnéticos gerados, o que diminui a emissão de ruídos indesejados. No entanto, correntes comuns presentes no cabo ainda podem contribuir para a EMI, pois essas correntes utilizam caminhos de retorno com alta impedância, muitas vezes dominados por capacitâncias parasitas. A mitigação desse tipo de emissão pode ser alcançada ao minimizar assimetrias nos pares diferenciais e ao empregar estratégias que reduzam o acoplamento de sinais comuns.

De forma complementar, Paul (2006) destaca que o par trançado reduz acoplamentos indutivos e capacitivos entre condutores, minimizando o *crosstalk* e, consequentemente, as emissões de EMI. Cada torção no cabo faz com que as

tensões induzidas em cada laço tenham polaridades alternadas, o que leva ao cancelamento das forças eletromotrizes induzidas nos laços adjacentes. Esse mecanismo é particularmente eficaz para reduzir o acoplamento indutivo, pois o fluxo magnético gerado por uma corrente em um fio é cancelado pelo fluxo oposto na torção seguinte. No entanto, a eficácia na redução do acoplamento capacitivo depende do balanceamento nas terminações do cabo em relação ao condutor de referência.

Por fim, Bogatin (2018) sugere técnicas complementares para minimizar a emissão de EMI em pares trançados, como o uso de cabos blindados e a inserção de filtros de modo comum. O uso de blindagem permite que a corrente comum retorne pelo interior da blindagem, formando uma configuração coaxial que impede a radiação de campos elétricos e magnéticos. Já os filtros de modo comum aumentam a impedância do caminho da corrente comum, reduzindo ainda mais as emissões irradiadas.

2.3 Placas de circuito impresso

As PCIs e os circuitos integrados (CIs) passaram por uma evolução significativa para atender às demandas dos sistemas digitais modernos. Hoje em dia, é comum encontrar sistemas com CIs que operam em frequências superiores a 1 GHz. A complexidade do design das PCIs exige que os engenheiros equilibrem a integridade do sinal com o desempenho elétrico, enquanto também consideram aspectos como transferência de calor e engenharia mecânica (Bogatin, 2018). O método tradicional de construção de protótipos e testes pós-construção tornou-se ineficaz frente à necessidade de reduzir o tempo de mercado e otimizar custos e desempenho desde o início do processo de design (Bogatin, 2018).

No contexto atual, onde trilhas de PCI, vias e conectores não são mais eletricamente transparentes, é necessário adotar uma metodologia de design que se baseie em previsibilidade e simulação. Segundo Bogatin (2018), essa abordagem envolve a utilização de diretrizes de design estabelecidas e a avaliação do desempenho esperado através de ferramentas analíticas e simulações numéricas. Esses métodos permitem que os engenheiros avaliem antecipadamente os *trade-offs* entre desempenho e custo, resultando em economias significativas de tempo e risco ao longo do ciclo de design (Bogatin, 2018).

Além disso, o design de PCIs se beneficia da compreensão intuitiva dos princípios e mecanismos envolvidos, bem como da aplicação de ferramentas de medição e análise (Bogatin, 2018). A utilização de modelos de circuitos equivalentes e medições precisas é crucial para identificar e solucionar problemas de integridade de sinal, garantindo o correto funcionamento do produto desde a primeira versão. A combinação de simulações precisas e uma abordagem prática são essenciais para criar soluções robustas e eficientes em sistemas digitais de alta velocidade (Bogatin, 2018).

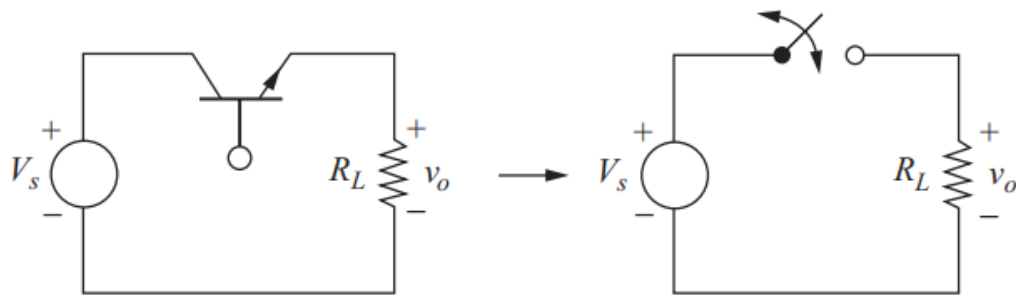
2.4 Conversores Estáticos

Os conversores estáticos desempenham um papel fundamental na eletrônica moderna, pois, de acordo com Hart (2011), permitem a conversão eficiente de energia elétrica em diferentes formas, como CA-CC, CC-CC, CA-CA e CC-CA. De acordo com Schlichting (2003), esses dispositivos transferem energia por meio da comutação de tensões e correntes em altas frequências, geralmente entre 20 kHz e 300 kHz. Essa técnica resulta em menores perdas energéticas e contribui para a redução do tamanho e peso dos equipamentos, o que os torna ideais para aplicações em telecomunicações, informática e sistemas industriais. No entanto, essa operação em altas frequências também introduz desafios relacionados à geração de EMI, exigindo o estudo aprofundado de suas fontes e modos de propagação para assegurar a EMC dos sistemas.

2.4.1 Topologias comuns de conversores CC-CC

Segundo Hart (2011), a conversão CC-CC é útil quando uma carga necessita de uma tensão CC específica, porém a fonte de energia opera em uma tensão CC diferente ou sem regulação. Para obter eficiência, são utilizados conversores chaveados, onde um transistor opera como uma chave, e a tensão média na saída é a tensão final.

Figura 7 - Princípio básico de um conversor CC-CC genérico



Fonte: Hart (2011).

A figura 7 ilustra o princípio básico de um conversor CC-CC chaveado, onde um interruptor é utilizado para modular o tempo de condução, permitindo a transferência eficiente de energia para a carga. Em contraste com os reguladores lineares, que operam na região ativa e apresentam perdas significativas de potência, essa abordagem possibilita que o transistor funcione predominantemente como um chaveador, minimizando as perdas associadas à operação contínua. Segundo Hart (2011), essa estratégia resulta em uma eficiência muito superior, tornando o conversor chaveado uma solução ideal para aplicações que demandam alta eficiência na conversão de energia.

2.4.2 Comutação

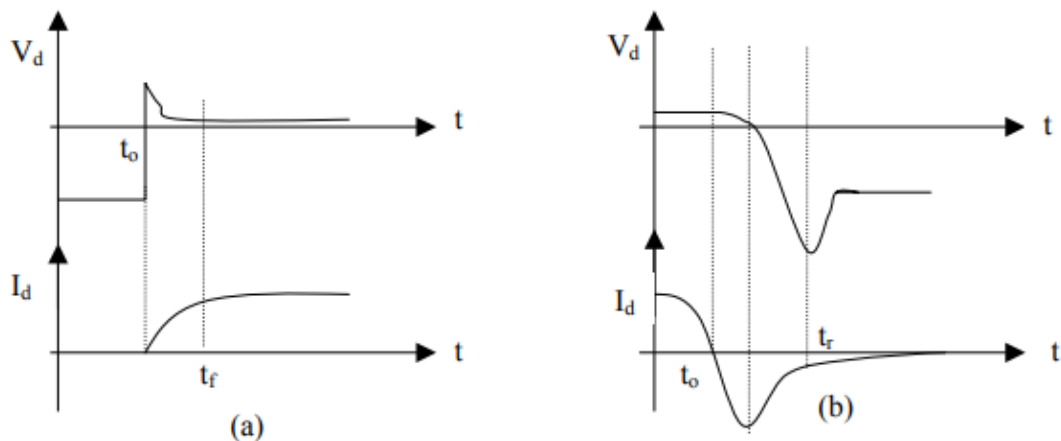
Ao falarmos dos conversores estáticos, um dos conceitos mais comuns sobre o tema é o da comutação da chave para gerar a tensão de saída. Essa comutação, ocasionada por um semicondutor, acontece na faixa dos kHz, e pode ser uma fonte de geração de EMI. De acordo com Schlichting (2003), o comportamento não linear causado pelas comutações produz ruído em alta frequência, que por consequência produz EMI tanto de forma radiada como conduzida.

De acordo com Schlichting (2003), a comutação desempenha um papel central na geração de EMI em conversores estáticos. Esse processo, realizado por semicondutores no estágio de retificação e no conversor CC-CC, envolve a comutação de tensões e correntes em altas frequências. Essa característica não linear das comutações gera distúrbios de alta frequência que podem se propagar pelo equipamento, pela carga, pela rede de alimentação e até mesmo pelo ar.

Outro ponto abordado por Schlichting (2003) é que a EMI gerada durante a comutação resulta da ocorrência simultânea de tensões e correntes nos semicondutores, o que leva a picos de energia instantânea. Esse fenômeno está associado a elevadas taxas de variação de tensão (dV/dt) e corrente (dI/dt), tornando o entendimento dessas características essencial para o desenvolvimento de técnicas eficazes de mitigação da EMI.

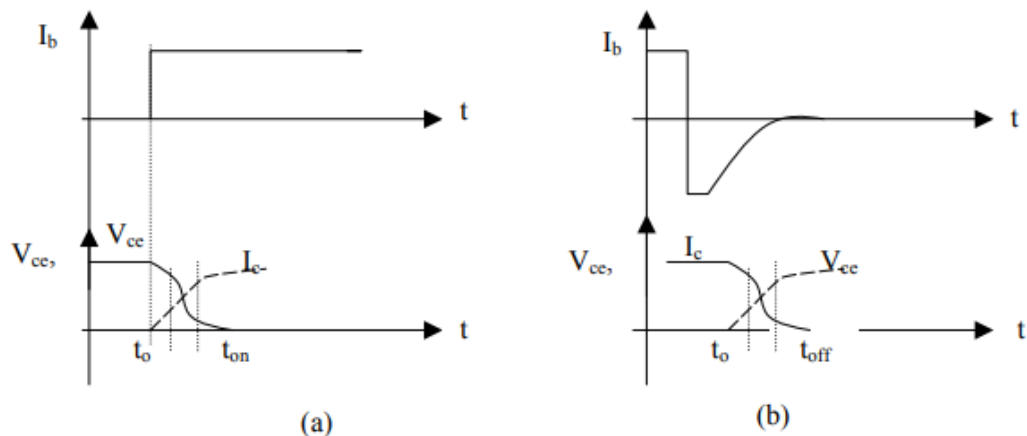
Por fim, Schlichting (2003) enfatiza que diferentes semicondutores, como diodos e transistores, apresentam perfis distintos de geração de EMI. Nos diodos, os picos de corrente e tensão durante o bloqueio são mais pronunciados, enquanto nos transistores, as elevadas dV/dt durante as comutações fazem com que sejam fontes significativas de ruído de tensão.

Figura 8 – Entrada (a) e bloqueio (b) de um diodo em corrente e tensão



Fonte: Schlichting (2003).

Figura 9 – Entrada (a) e bloqueio (b) de um transistor bipolar em corrente e tensão



Fonte: Schlichting (2003).

As figuras 8 e 9 ilustram, conforme Schlichting (2003), o comportamento típico de corrente e tensão durante a entrada em condução e o bloqueio em diodos e transistores bipolares.

Na Figura 8, observa-se que, na condução do diodo (a), ocorre um pico de tensão (V_d) e aumento rápido da corrente (I_d). No bloqueio (b), picos de corrente e tensão reversas surgem, com elevadas taxas de variação (di/dt). Segundo o autor, essas características tornam o diodo uma fonte de ruído de corrente.

Na Figura 9, durante a condução do transistor (a), há aumento da corrente de coletor (I_c) e redução de V_{ce} . No bloqueio (b), a ocorrência simultânea de tensões e correntes, aliada a altas dv/dt , caracteriza o transistor como uma fonte de ruído de tensão.

2.4.2.1 Conteúdo harmônico nas comutações

Nas operações de comutação dos conversores estáticos, a forma de onda resultante é tipicamente não senoidal, o que gera um espectro composto por múltiplas harmônicas. Segundo Schlichting (2003), a decomposição de sinais através da série de Fourier revela que as componentes harmônicas presentes são fundamentais para a caracterização dos efeitos de interferência eletromagnética, fornecendo uma base teórica para a mitigação destes fenômenos.

Schlichting (2003) destaca que o fenômeno do *ringing*, decorrente das rápidas transições de comutação, intensifica determinadas harmônicas, elevando a densidade espectral em faixas críticas. Essa amplificação das harmônicas, embora transitória, pode agravar a emissão de interferências, comprometendo a compatibilidade eletromagnética dos sistemas.

A análise do conteúdo harmônico, conforme abordada por Schlichting (2003), demonstra que não apenas a componente fundamental, mas também as harmônicas superiores possuem relevância prática. Essa distribuição espectral, sensível aos parâmetros do circuito e aos tempos de comutação, permite a identificação de picos de energia que devem ser tratados por meio de técnicas específicas de filtragem e controle.

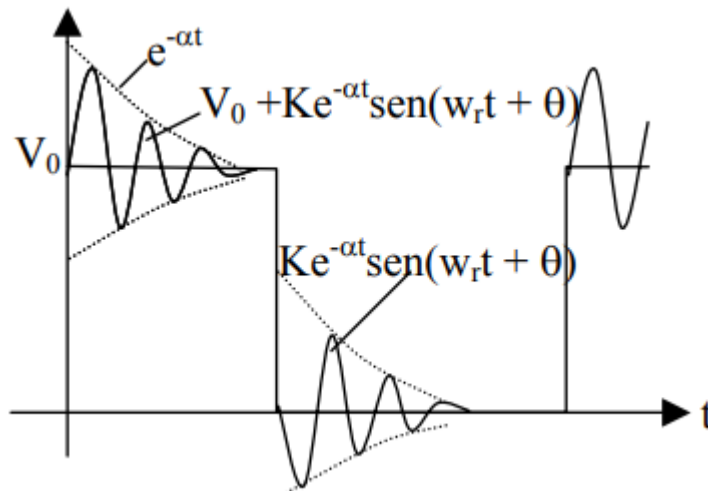
Ademais, Schlichting (2003) observa que a intensidade e a posição das harmônicas são diretamente influenciadas pelas condições de operação dos conversores, especialmente pela ocorrência de ressonâncias parasitas. Essa constatação enfatiza a importância do ajuste fino dos tempos de transição e da implementação de circuitos *snubber* para a redução dos picos harmônicos que podem causar distúrbios indesejados.

A integração dos conceitos de conteúdo harmônico e de comutação é essencial para o desenvolvimento de projetos de conversores com alta compatibilidade eletromagnética. Conforme Schlichting (2003), o controle das harmônicas geradas durante as transições não só melhora o desempenho do conversor, como também assegura que as emissões se mantenham dentro dos limites normativos, servindo de diretriz para um design mais robusto e confiável.

2.4.2.2 Oscilação

No contexto dos conversores estáticos, o fenômeno da oscilação (*ringing*) é caracterizado por oscilações transitórias na forma de onda durante as rápidas transições de comutação, decorrentes da ressonância entre indutâncias e capacitâncias parasitas presentes nas trilhas de PCB e interconexões. Segundo Schlichting (2003), tais oscilações, embora de curta duração, são intrínsecas ao processo de comutação e podem acentuar componentes específicas do espectro harmônico, aumentando o potencial para a geração de interferência eletromagnética. Essas oscilações são diretamente influenciadas pelas altas taxas de dI/dt e dV/dt . A figura 10 mostra uma ilustração de oscilações que acontecem quando há comutação.

Figura 10 - Oscilações que acontecem na comutação de um sinal

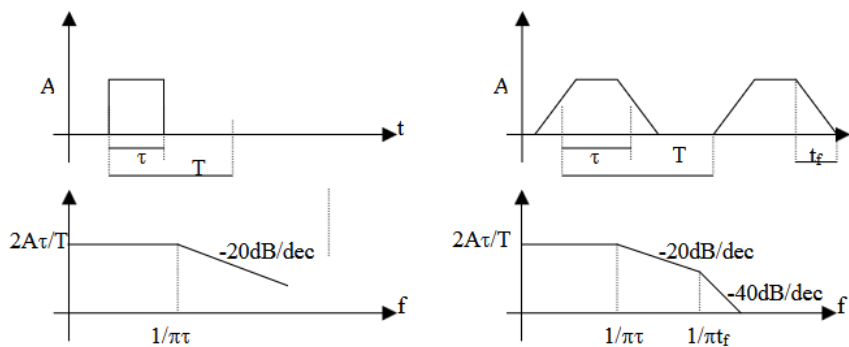


Fonte: Schlichting (2003).

O *ringing* tem origem nas características não ideais dos circuitos, onde a combinação de elementos parasitas gera um comportamento ressonante indesejado. Schlichting (2003) destaca que essa ressonância ocorre justamente pela interação entre as indutâncias e capacitâncias parasitas, as quais, em um ambiente de alta frequência e altas taxas de di/dt e dV/dt , podem intensificar as oscilações após cada comutação. O autor também demonstra que a presença do *ringing* intensifica determinadas harmônicas, justamente na frequência da oscilação que ocorre na comutação.

Schlichting (2003) também complementa falando que, em uma comutação, quanto menor o tempo de subida ou de descida, ou seja, quanto maior o valor de di/dt e dV/dt , maior é a amplitude do espectro harmônico gerado pela dada comutação. A figura 11 exemplifica isso, comparando o espectro harmônico de sinais ideais e reais, deixando claro como os tempos reduzidos de transição ampliam o espectro gerado.

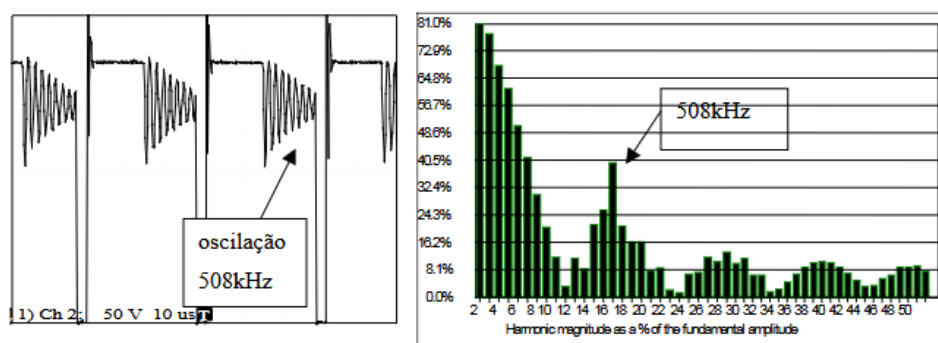
Figura 11 - Comparação entre espectros harmônicos de sinais com tempos de subida e descida nulo (esquerda) e não nulo (direita)



Fonte: Schlichting (2003).

Segundo Schlichting (2003), essas transições não lineares provocam a dispersão da energia em múltiplas frequências, configurando um espectro que reflete diretamente os picos de energia gerados durante a comutação. O autor apresenta também estudos sobre a oscilação em um MOSFET, onde há uma oscilação na comutação que possui frequência de 508 kHz, e, ao se fazer a análise harmônica daquele sinal, é observado que nessa frequência específica há um aumento da energia da EMI desse sinal. A figura 12 mostra, lado a lado, a oscilação, retirada do trabalho de Schlichting, juntamente com a análise harmônica feita do sinal.

Figura 12 - Forma de onda evidenciando a oscilação juntamente com sua análise harmônica



Fonte: Schlichting (2003).

O impacto do *ringing* não se restringe apenas ao aumento do conteúdo harmônico, mas também pode comprometer a integridade dos dispositivos semicondutores. Conforme Schlichting (2003), os picos de tensão resultantes dessas oscilações podem causar sobretensões momentâneas, submetendo os

semicondutores a estresses que, cumulativamente, reduzem sua vida útil e comprometem a confiabilidade do sistema.

Para mitigar os efeitos adversos do *ringing*, estratégias como a implementação de circuitos *snubber* e a otimização dos tempos de comutação são essenciais. Schlichting (2003) recomenda o uso de *snubbers* RC para amortecer as oscilações, confinando o ruído a faixas de frequência menos críticas, enquanto a extensão marginal do tempo de transição (redução do dV/dt e dI/dt) contribui para uma distribuição mais gradual da energia, reduzindo os picos de tensão indesejados.

Por fim, a compreensão e o controle do fenômeno do *ringing* são fundamentais para assegurar a conformidade com as normas de compatibilidade eletromagnética e garantir a robustez dos conversores estáticos. Segundo Schlichting (2003), a análise detalhada das variações de dI/dt e dV/dt permite aos engenheiros adotarem medidas de design que não só minimizam a interferência gerada, mas também aprimoram o desempenho e a durabilidade dos sistemas, evidenciando a importância de abordar essa questão desde as fases iniciais do projeto.

2.4.3 PWM

A modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) desempenha um papel essencial no controle de conversores eletrônicos, permitindo a regulação da amplitude e da frequência da tensão de saída. Hart (2011) observa que o PWM é eficaz para reduzir a distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion* - THD) da corrente de carga, facilitando o atendimento aos requisitos de qualidade de energia.

Além disso, ele destaca que, embora o sinal PWM não filtrado apresente um THD relativamente alto, os harmônicos estão concentrados em frequências elevadas, o que simplifica sua remoção por meio de filtros passa-baixa.

Hart (2011) também diferencia os esquemas de comutação bipolar e unipolar. O esquema bipolar alterna a saída entre os valores positivos e negativos da tensão de alimentação contínua, enquanto o esquema unipolar alterna entre níveis positivos e zero ou negativos e zero, reduzindo as perdas e o estresse nos componentes do circuito.

Essa diferenciação é fundamental para aplicações em que a eficiência e a robustez do sistema são prioritárias.

Schlichting (2003) complementa ao explicar que o uso de PWM também influencia a geração de EMI. Segundo ele, a comutação rápida e não linear das chaves semicondutoras, característica do PWM, gera ruídos em alta frequência que podem ser conduzidos ou irradiados. Dessa forma, o projeto de circuitos PWM deve considerar medidas para mitigar os efeitos de EMI, como o uso de filtros e técnicas de blindagem.

3 METODOLOGIA

Este trabalho visa analisar a embarcação Guarapuvu II do ponto de vista da EMC, para obter uma melhor performance do sistema. Para isso, foi feito uma fundamentação teórica sobre boas práticas de montagem de placas e sistemas eletrônicos do ponto de vista da EMC, juntamente com os problemas que geralmente acontecem montando esse tipo de cenário. A figura 13 mostra a embarcação Guarapuvu II, montada com nove painéis solares, configuração que a equipe utiliza atualmente.

Figura 13 - Embarcação Guarapuvu II



Fonte: Zênite Solar (2025).

Após toda a fundamentação teórica, foi estudado primeiramente o diagrama elétrico da embarcação, onde foi feito o levantamento de pontos críticos de funcionamento do sistema.

Foi levado em conta também o *feedback* dos integrantes da equipe, em especial do setor da eletrônica, que já possuíam experiência no projeto.

Após a análise da embarcação como um todo, foi necessário definir quais os pontos de maior interesse para ser feita a análise de EMC do sistema. Com os pontos críticos, foi feita uma visualização detalhada dos possíveis problemas que poderiam ocorrer em cada ponto.

A partir dos problemas que seriam possíveis de ocorrer em cada parte da embarcação juntamente com problemas que já acontecem atualmente, chegou-se a uma estratégia distinta para cada um, de forma a reduzir a interferência em cada ponto analisado para que o sistema como um todo melhore sua eficiência.

Por fim, foi elaborada uma estratégia visando os pontos de maior interesse, de forma que a maioria dos problemas de compatibilidade fossem resolvidos da melhor maneira possível para evitar retrabalho da equipe.

3.1 Métodos aplicados

A presente pesquisa adota uma abordagem qualitativa e descritiva, enquadrando-se na modalidade de estudo de caso, para investigações que buscam compreender fenômenos complexos em ambientes reais. Neste trabalho, o foco recai sobre a análise da compatibilidade eletromagnética na embarcação Guarapuvu II da equipe Zênite Solar, considerando os desafios inerentes à integração de sistemas eletrônicos e elétricos em ambientes náuticos.

A coleta de dados foi realizada por meio de duas estratégias complementares. Primeiramente, efetuou-se uma revisão bibliográfica e documental, que abrangeu estudos teóricos, normas técnicas e boas práticas relacionadas à EMC, à montagem de placas de circuito impresso e aos conversores estáticos. Em paralelo, realizou-se o levantamento de dados práticos por meio da análise detalhada do diagrama elétrico da embarcação, inspeção dos *layouts* das placas e entrevistas não estruturadas com os integrantes do setor de eletrônica, que contribuíram com experiências e feedback sobre os problemas operacionais identificados em campo.

A população deste estudo compreende o conjunto dos sistemas eletrônicos e elétricos embarcados na Guarapuvu II, sendo a amostra constituída pelos módulos que se destacaram pelo potencial de geração de interferências eletromagnéticas – em especial, os módulos MCB, MFP e MCC –, os quais operam com chaveamento em alta frequência e apresentam evidências de EMI. A seleção

destes componentes foi realizada de forma criteriosa, a partir da análise dos esquemáticos e da identificação dos pontos críticos apontados pela equipe.

Para a análise dos dados, adotou-se uma abordagem integrada que combina técnicas qualitativas – através da análise de conteúdo dos dados coletados e do cruzamento das informações provenientes do repositório da equipe e das entrevistas – com procedimentos quantitativos simples, como a verificação das frequências operacionais e a identificação das harmônicas associadas aos sinais PWM. Esse conjunto de métodos permitiu a interpretação dos fenômenos de EMI observados e fundamentou a proposição de medidas para mitigar as interferências identificadas.

Dessa maneira, os métodos aplicados neste trabalho não apenas sustentam a investigação sobre a compatibilidade eletromagnética na embarcação Guarapuvu II, mas também contribuem para a elaboração de um plano de ação que visa otimizar o desempenho dos sistemas eletrônicos embarcados, atendendo aos rigorosos requisitos técnicos e operacionais demandados em competições acadêmicas de alta performance.

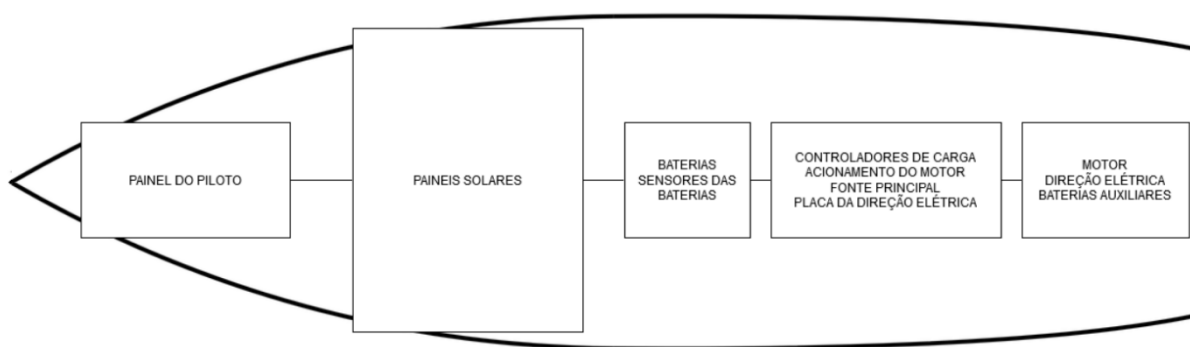
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Ao analisar a embarcação da equipe Zênite Solar, é possível abordar a situação sob duas perspectivas distintas. A primeira considera a equipe como um grupo acadêmico, o que significa que, mesmo que as placas apresentem diversos problemas, sempre há uma oportunidade de aprendizado e aprimoramento contínuo do sistema como um todo. Este processo de constante evolução é visível na Zênite Solar, onde vários trabalhos acadêmicos e artigos foram produzidos durante o desenvolvimento de novas funcionalidades e melhorias significativas na embarcação.

A segunda perspectiva é que, apesar de ser uma equipe acadêmica, seu objetivo final é competir em alto nível, o que requer desempenho robusto e confiável em todos os componentes do sistema. Problemas relacionados a EMC podem prejudicar severamente o funcionamento do sistema, resultando em baixo desempenho e, eventualmente, falhas durante as competições.

Iniciando a análise da embarcação, é possível traçar uma representação em blocos indicando a disposição física das partes que compõem o sistema. A figura 14 mostra um esquema ilustrativo da posição dos componentes do barco.

Figura 14 - Representação geral do posicionamento dos componentes do sistema



Fonte: Elaboração própria (2024).

Na figura 13 é feito um breve demonstrativo dos sistemas elétricos e eletrônicos que compõem a embarcação, em função de seu posicionamento. Detalhando melhor o sistema, tem-se no painel do piloto os sistemas de interface do piloto, composto por um display com informações de energia e diversos

acionamentos, como acionamento do motor, acionamento das bombas de porão, marcha ré e os potenciômetros de velocidade do motor. Há também o volante, botão de emergência e o rádio utilizado pelo piloto. Desses sistemas, os que mais drenam energia são o módulo de interface do piloto e o rádio, o último tendo para si uma bateria auxiliar exclusiva.

Seguindo pela posição do barco vem os painéis solares, os quais são utilizados nove ao todo. Por ser um equipamento sem chaveamento, os painéis solares não serão abordados neste trabalho, devido a sua baixa complexidade eletrônica.

4.1 Compartimento da Eletrônica

Após os painéis vem o compartimento final do barco, que possui três divisórias: bateria, módulos eletrônicos e motor. A figura 15 mostra o compartimento final. A primeira divisória (lado direito da imagem) é onde fica o compartimento das baterias, onde hoje são utilizadas três baterias de chumbo ácido de 12 V cada uma, conectadas em série, tendo tensão total de 36 V no sistema. Junto com as baterias há o sensoriamento delas, para servir de informação ao piloto sobre o consumo elétrico do barco durante as provas das competições.

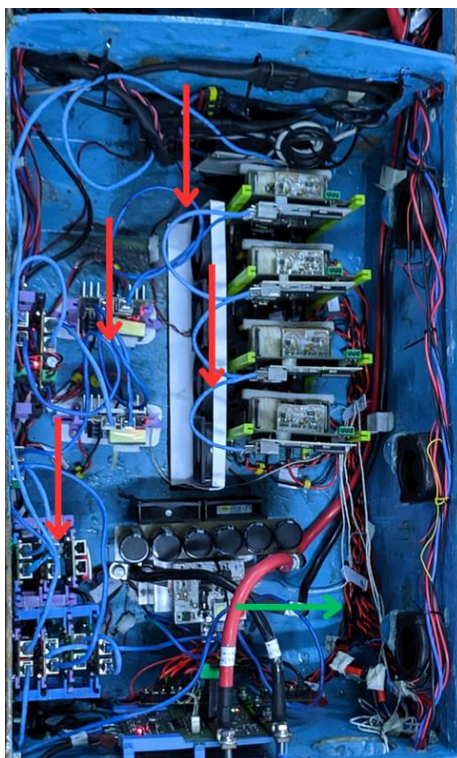
Figura 15 – Compartimento da eletrônica da embarcação Zênite Solar



Fonte: Zênite Solar (2020).

Pela figura 15 é possível observar, além da posição de cada placa, também a disposição do cabeamento do sistema. É importante destacar que nesse compartimento existem cabos de potência e de sinal. A figura 16 aborda o posicionamento do cabeamento presente na figura do compartimento da eletrônica, sendo um recorte da figura anterior com foco no compartimento da eletrônica.

Figura 16 - Foco no compartimento da eletrônica evidenciando os cabos de sinal



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2020).

Na figura 16, evidenciado por setas vermelhas, é possível notar cabos azuis. Esses cabos são a comunicação da rede CAN do barco, juntamente com a alimentação de 18 V de cada módulo que compartilha desse cabeamento, e é por ele que passa toda a comunicação da embarcação. Além desses cabos, é possível notar também, dessa vez em seta verde, pares de cabos trançados, vermelhos e pretos, que são os cabos que vem dos painéis solares. A configuração do barco na figura é de 2020, portanto, existem mais cabos atualmente do que na época, visto que hoje são utilizados nove painéis solares ao invés de 4, como era antigamente, portanto, hoje existem 9 pares desses cabos ao invés de somente 4.

Além desses cabos, outros que aparecem na figura, mas que não são evidenciados, são os cabos de alimentação de ventoinhas e sensores, que passam

logo acima dos cabos trançados que vêm dos painéis, e os cabos de alimentação do motor, que são os cabos vermelho e preto grossos que passam da parte inferior da imagem e seguem junto aos cabos trançados.

É no compartimento do meio, o da eletrônica, que há a maior concentração de ruídos no sistema todo. É aqui que ficam as placas dos Módulos de Controlador de Carga (MCC), Módulo da Fonte Principal (MFP), Módulo do Carregamento do Sistema (MCS), Módulo do Carregamento da Bateria (MCB) e outras, como placas de sensoramento, da direção elétrica e de alguns acionamentos, responsáveis pelo funcionamento do barco.

Cada placa nesse compartimento tem uma função, e as que serão mais faladas neste trabalho serão explicadas.

O MCC serve para gerenciar o carregamento da bateria e garantir que o painel solar entregue sempre a maior potência possível ao sistema, por meio de uma técnica chamada Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT). Além disso, há nele um conversor *Ćuk*, responsável por fazer a conversão de tensão do painel para a bateria do sistema. É um módulo essencial para o funcionamento da embarcação e possui um conversor chaveado, o que abre a possibilidade de análise para essa placa.

O MFP entrega 18 V para todos os módulos que estão na rede CAN do barco. Ele faz isso por meio de um conversor Buck que recebe a tensão da bateria e entrega os 18 V responsáveis por alimentar os outros módulos.

O MCS é responsável pelo carregamento do sistema, por meio de um relé de alta potência entre as baterias e o restante do sistema, controlado via rede CAN, e possui um banco de capacitores com um circuito para limitar picos de corrente durante o carregamento do banco.

O MCB carrega e gerencia as baterias auxiliares da embarcação, que servem para o funcionamento das bombas de porão, do rádio e da direção elétrica. Para isso, é utilizado um conversor Buck que recebe a tensão da bateria principal do barco e entrega a tensão necessária para as baterias auxiliares, definida hoje próximo a 15 V.

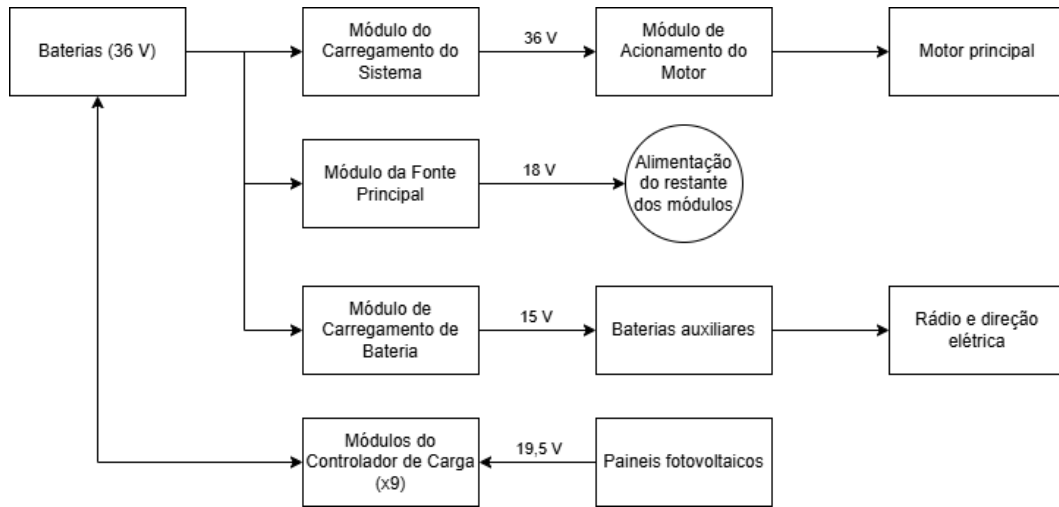
Esses são os principais módulos da embarcação do ponto de vista de alto chaveamento. Todas essas placas possuem um conversor estático, com exceção do MCS, que possui diversos capacitores em constante processo de carga e descarga.

Além dos módulos de potência mencionados, a embarcação conta com diversos sensores para garantir o monitoramento constante e eficiente das condições do sistema durante as provas. Entre os principais sensores estão aqueles que monitoram corrente e tensão das baterias, temperatura do sistema, funcionamento individual dos painéis solares, nível das bombas de porão e velocidade de rotação do motor.

Esses sensores comunicam-se com o resto do sistema por meio da rede CAN, escolhida justamente por sua robustez frente à EMI. Contudo, dada a sensibilidade inerente aos sensores, esses componentes são especialmente vulneráveis às interferências eletromagnéticas, podendo apresentar leituras incorretas e falhas operacionais caso não sejam adequadamente blindados e filtrados, portanto, são um dos pontos críticos para o sistema, já que uma coleta de dados afetada por ruídos pode levar a tomada de decisões incorreta pelo piloto durante as provas.

Após essa divisória, chega-se na divisória final, onde fica o motor do barco, a direção elétrica e as baterias auxiliares. Aqui também existe geração de ruído, pois o motor em si, com suas escovas, gera ruído.

A partir do diagrama elétrico existente no repositório oficial da equipe (Zênite Solar, 2025), foi possível também montar um diagrama do fluxo da energia do sistema. A figura 17 mostra o caminho que faz a alimentação do sistema, começando pelas baterias, alimentando o MCS, o MFP, os 9 MCCs e o MCB. Esses 4 módulos recebem diretamente a tensão das baterias. A partir deles, há algumas ramificações: o Módulo de Acionamento do Motor (MAM) recebe tensão diretamente do MCS, e é a placa que alimenta o motor principal do barco. O MFP é responsável pela tensão que é enviada para todas as outras placas do sistema que utilizam da rede CAN, onde envia 18 V para todo o resto do sistema. Isso acontece pois todos os módulos que utilizam a rede CAN possuem um conector RJ45 que recebe nele os 18 V que tem origem no MFP, juntamente com o barramento da rede CAN. Os 9 MCCs atuam recebendo a tensão vinda dos painéis fotovoltaicos, e por fim o MCB atua nas baterias auxiliares, e são essas baterias auxiliares que alimentam diretamente o rádio, direção elétrica e bombas de porão. Vale destacar, aqui, que todas as placas que recebem os 18 V do MFP possuem seus próprios conversores (como um LM7812 para saída em 12 V, um LM7805 para saída em 5V, e assim por diante).

Figura 17 - Diagrama do fluxo de energia da embarcação

Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2025).

No repositório oficial da equipe, é possível visualizar o *firmware* e *hardware* de todas as placas já produzidas. Também é possível checar uma tabela das placas que hoje estão em funcionamento no barco. Com base nessa tabela, foram analisadas todas as placas e todos os *firmwares* que hoje estão ativos, e feito uma análise para determinar quais são possíveis geradores de ruídos no sistema. A tabela 1 representa todos os módulos que estão hoje instalados na embarcação.

Tabela 1 – Módulos instalados na embarcação

Módulo	Quantidade
MCB19 - Módulo de Carregamento de Bateria	Duas unidades
MT19 - Módulo Tacômetro	Uma unidade
MRPC19 - Módulo CAN para Raspberry PI Zero	Uma unidade
MAB19 - Módulo de Acionamento das Bombas de Porão	Duas unidades
MCS19 - Módulo Carregamento do Sistema	Uma unidade
MFP22 - Módulo Fonte Principal	Uma unidade
MIC19 - Módulo de Interface de Controle	Uma unidade
MSC19 - Módulo de Sensores CAN	Cinco unidades
MVC19 - Módulo de Voltímetro (Display) CAN	Duas unidades
MSWI19 - Módulo da Interface no Volante	Uma unidade
MCCCS - Shield para o Módulo Controlador de Carga	Nove unidades
MCC22 - Módulo Controlador de Carga	Nove unidades
MDE18 - Módulo de Direção Elétrica	Uma unidade
MAM17 - Módulo de Acionamento do Motor	Uma unidade

Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2024).

Para definir quais placas mereciam uma análise aprofundada, foram avaliados os esquemáticos de todas as placas apresentadas na Tabela 1. Optou-se por analisar aquelas que possuem conversores chaveados, ou seja, as placas MCC, MCB e MFP, pois esses dispositivos são principais fontes de geração e recepção de interferências eletromagnéticas, devido à sua forma de operação. Além delas, também será analisado o MCS, pois o banco de capacitores conectado ao acionamento do motor é um tópico a ser levantado.

Os conversores chaveados operam em altas frequências e geram dV/dt e dI/dt elevados, o que gera um espectro harmônico amplo. Essas características tornam o ambiente propício à propagação de ruídos tanto de forma conduzida quanto radiada, o que pode interferir no funcionamento de outros circuitos próximos.

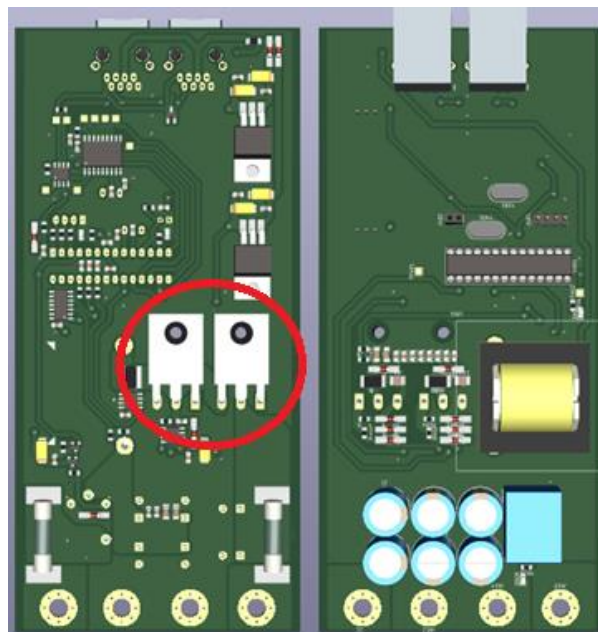
Além disso, a presença de componentes semicondutores de potência, elementos parasitas e o uso de técnicas de PWM aumentam a complexidade e a intensidade da EMI. Dessa forma, focar na análise dessas placas permite uma melhor compreensão dos mecanismos de geração e propagação da EMI, bem como a identificação de pontos críticos onde intervenções podem ser aplicadas para reduzir interferências e melhorar o desempenho geral do sistema.

Ao analisar todas as placas, identificaram-se três placas com potenciais problemas no sistema, todas associadas ao chaveamento em alta frequência. Além desses problemas, foram observadas outras questões que ainda persistem na equipe, como falta de cabeamento adequado, falta de blindagens, falta de filtros, mas esses itens serão abordados futuramente no trabalho.

4.1.1 Análise do MCB

A primeira placa analisada com potencial de geração de EMI foi o MCB. O MCB utiliza um conversor Buck para gerenciar a carga das baterias auxiliares a partir da energia proveniente das baterias principais, operando com uma potência de 120 W. A Figura 18 apresenta a visualização em 3D da placa do MCB.

Figura 18 – Visualização 3D frente e verso da placa MCB, com os MOSFETs circulados



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2024).

Como se pode observar na Figura 18, a placa utiliza dois MOSFETs, modelo IRFP260N, para o chaveamento em PWM, operando a 30 kHz. Embora essa configuração seja normalmente aceitável, a proximidade física entre os transistores pode intensificar o *crosstalk* e o acoplamento capacitivo e indutivo, gerando interferências que se propagam tanto dentro quanto fora da placa. Embora a rede CAN opere por meio de sinalização diferencial, o que confere certa imunidade a ruídos comuns, ela pode ser comprometida se a interferência for introduzida de forma assimétrica ou se os caminhos de retorno não forem ideais, resultando em desequilíbrios nos sinais diferenciais e, consequentemente, em aumento da taxa de erros na comunicação.

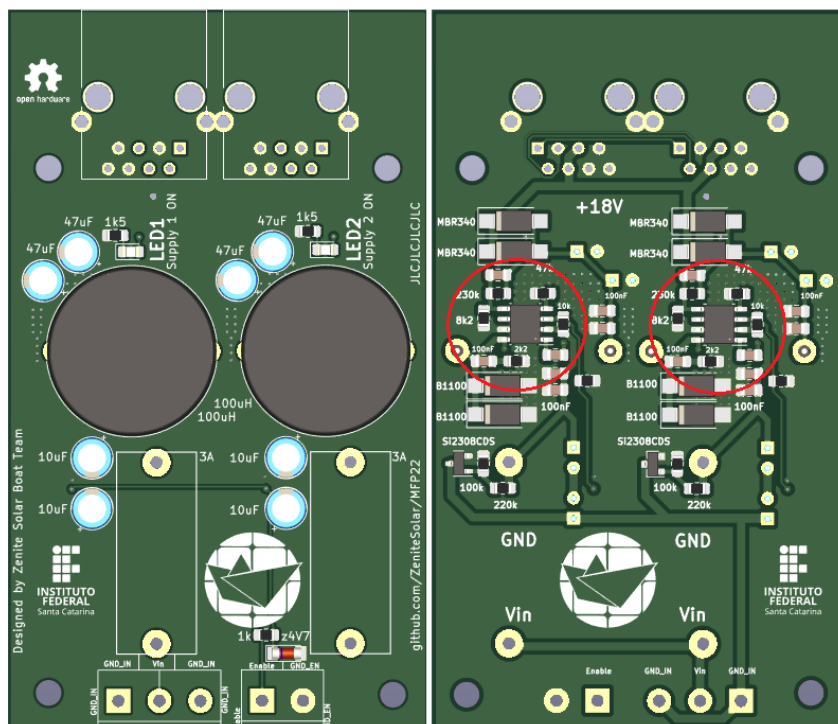
Em circuitos de potência em alta frequência, é relativamente comum posicionar MOSFETs próximos ou até em paralelo para dividir corrente ou otimizar o espaço da placa, por conta de dissipação de calor. No entanto, essa disposição pode ocasionar problemas de EMI e comprometer a integridade do sinal, especialmente quando os transistores operam em altas frequências, como 30 kHz. Durante o chaveamento, as elevadas dI/dt e dV/dt geram campos eletromagnéticos intensos que favorecem o acoplamento capacitivo e indutivo entre os transistores, resultando em *crosstalk* e na propagação indesejada de interferências por todo o sistema, inclusive afetando as linhas de comunicação.

Além disso, pequenas diferenças nas resistências de canal e nas capacitâncias parasitas podem provocar desequilíbrios de corrente, de modo que um dos MOSFETs acabe conduzindo mais do que o outro, gerando aquecimento desigual e aumento de ruído. Oscilações de *gate* também são frequentes em alta frequência, uma vez que a interação entre as capacitâncias internas dos transistores e as indutâncias parasitas do *layout* pode originar ressonâncias e picos de tensão no *gate*. Quando os componentes estão dispostos muito próximos na placa, ocorre um aumento no acoplamento capacitivo e indutivo, intensificando a propagação de ruídos eletromagnéticos, porém diminuindo os *hot loops*. Esses ruídos podem se espalhar pelo barramento de alimentação e pelo plano de terra, atingindo circuitos sensíveis, como a rede CAN, de forma indireta, já que no mesmo cabo que ela passa, também passa a alimentação de 18 V dos módulos do sistema. Embora o barramento CAN seja reconhecido por sua robustez, ele não é totalmente imune a ruídos de modo comum e a pulsos de alta frequência, especialmente em ambientes com comutação em altas frequências, característicos de conversores chaveados. Nesses casos, a ausência de blindagem e filtragem adequadas pode agravar a propagação da EMI, comprometendo a integridade do sinal e o desempenho do sistema.

4.1.2 Análise do MFP

A segunda placa de interesse para análise é o MFP, responsável por fornecer a tensão de 18 V aos módulos que se comunicam na rede CAN. Embora não haja, nesse caso, uma interface CAN direta, o MFP utiliza dois conversores LMR16030, em encapsulamento SOIC-8, que trabalham com chaveamento a cerca de 525 kHz, definido por sua topologia apresentada na folha de dados do componente (Texas Instruments, 2021), onde um resistor conectado ao pino *Sync* define a frequência de operação do PWM. Nessa placa, o resistor em questão é de 47k Ohm, o que produz uma frequência de cerca de 525 kHz, gerando sinais de alta frequência que podem se espalhar pelas trilhas de alimentação das outras placas da embarcação. Na Figura 19, observa-se a visualização 3D do MFP, evidenciando os dois reguladores e suas regiões de comutação, circulados em vermelho.

Figura 19 – Visualização 3D da placa MFP, frente e verso



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2024).

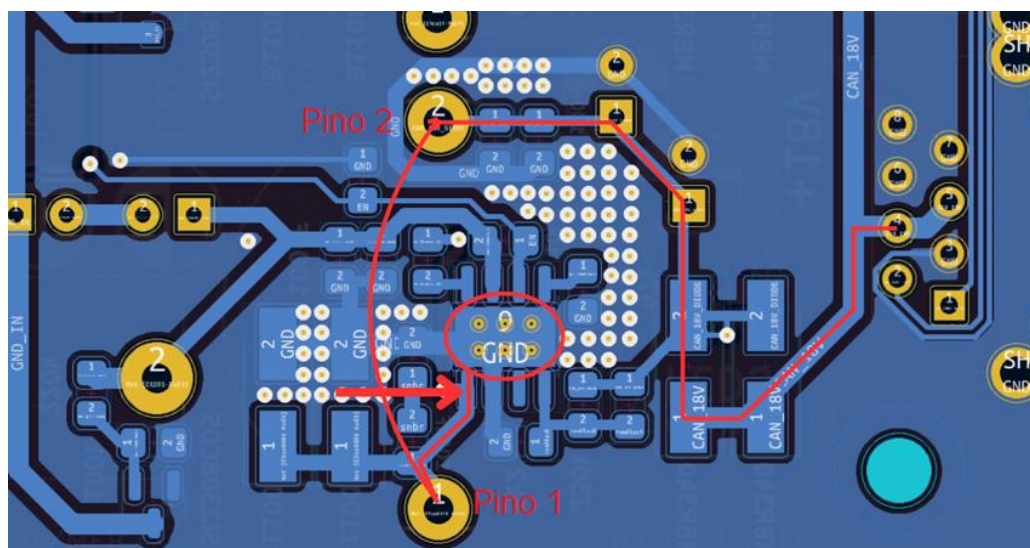
Uma das principais preocupações em frequências na faixa de centenas de kHz é o potencial aumento na emissão eletromagnética devido às harmônicas geradas durante a comutação. Quando se tem dois conversores Buck lado a lado, como ocorre nesta placa, o efeito é potencializado: cada estágio opera com elevadas taxas de di/dt e dV/dt , intensificando a geração de ruídos de alta frequência e exigindo um cuidado ainda maior com o *layout* e a implementação de técnicas específicas de mitigação de EMI.

Mesmo que o barramento CAN não tenha contato elétrico direto com os conversores, o ruído pode atingir a rede por meio do cabeamento compartilhado para alimentação dos módulos. Na embarcação, cada módulo contém condutores para a comunicação CAN (dados), linhas de alimentação de 18 V e múltiplos condutores de referência (GND), com exceção do MFP. Dada a proximidade física dessas linhas, os pulsos de comutação em alta frequência de ambos os Buck podem facilmente acoplar-se aos condutores adjacentes, afetando o desempenho da rede CAN e de outros subsistemas sensíveis.

Em outras palavras, se o *layout* da placa não for adequadamente projetado – considerando, por exemplo, a redução das áreas de loop, a separação

física dos estágios e o uso de filtros ou blindagens – a comutação simultânea ou quase simultânea dos dois Buck pode amplificar a propagação de ruídos, interferindo nas placas que se comunicam via CAN ou em outras partes críticas do sistema.

Figura 20 – Corte do esquemático da placa MFP



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2025).

A figura 20 mostra um pedaço do *layout* da placa do MFP. Nele é possível notar o CI do LMR16030 na parte central da figura, circulado em vermelho, onde seu pino 8 (pino inferior esquerdo, com uma seta vermelha) corresponde ao pino "SW" (*Switch* - Pino de comutação). Este pino é responsável pela comutação interna do MOSFET, que chaveia com 36 V, gerando uma forma de onda pulsada essencial para o processo de redução da tensão de entrada para a tensão de saída desejada no conversor Buck. A figura mostra também o caminho que a saída do Buck faz, passando pelo outro lado da placa, onde se tem o indutor de saída do circuito, representado pelos pinos 1 e 2, evidenciados em vermelho, chegando até o conector RJ45 que alimenta o restante dos módulos. Por ter um plano de referência sempre ao redor do sinal, apesar do pino de comutação fazer um caminho extenso, ele é rodeado por sua referência, amenizando o efeito da área de loop, sendo essa uma boa prática de *layout* do ponto de vista de EMC.

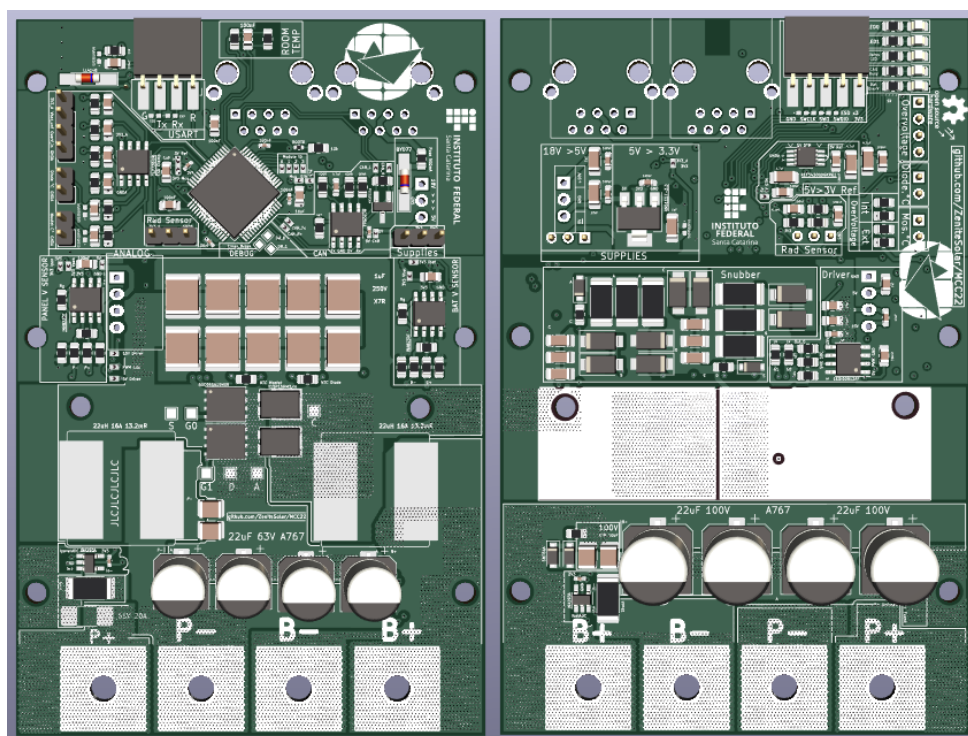
Por fim, o maior problema da placa ainda é o fato de serem utilizados dois conversores lado a lado, como a figura 20 evidenciou, visto que os dois circuitos irão

chavear em frequências idealmente iguais, porém na prática muito próximas, podendo ocasionar frequências de batimento.

4.1.3 Análise do MCC

Por fim, a terceira placa de interesse a este trabalho foi o MCC, responsável por aplicar o algoritmo de MPPT, além de converter a tensão que vem do painel solar (cerca de 19,5 V) para a tensão da bateria principal, que é de 36 V, por meio de um conversor *Ćuk*. A figura 21 mostra a visualização 3D da placa.

Figura 21 – Visualização 3D da placa MCC

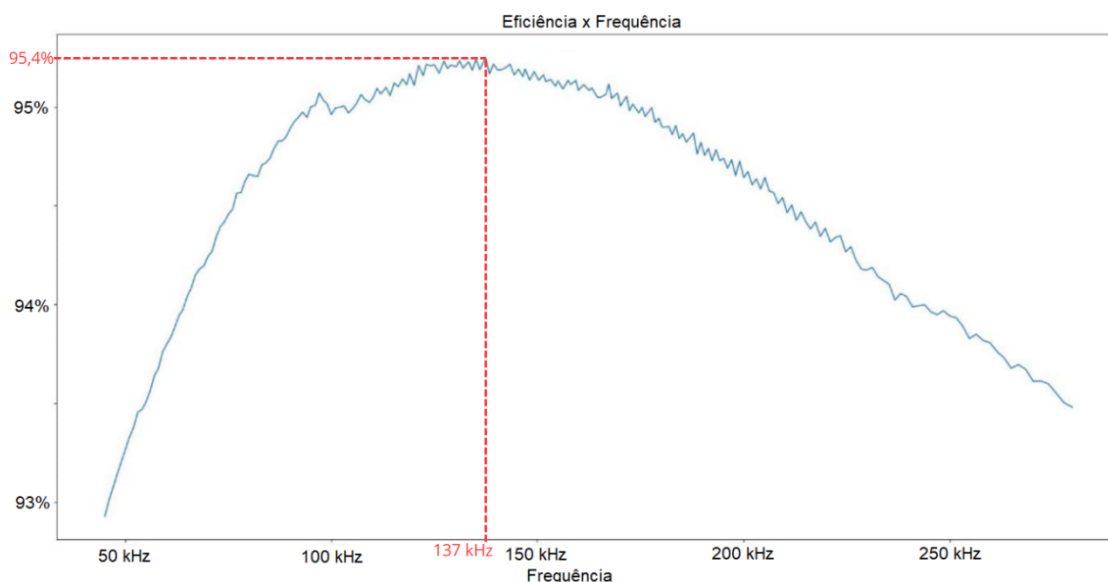


Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2024).

A placa do MCC utiliza de um conversor *Ćuk* para fazer a conversão dos painéis solares para o resto do sistema. Por conta da alta complexidade do projeto, foram feitos *scripts* de cálculo para descobrir os pontos de maior eficiência desse conversor. Ao executar os *scripts* de cálculo, é descoberto que o ponto de maior eficiência do conversor acontece exatamente em 137.547 Hz, com cerca de 96% de eficiência, e ao verificar o *firmware* do MCC, é possível notar que a frequência hoje

utilizada é exatamente essa. A figura 22 mostra o gráfico da frequência pela eficiência do conversor, utilizando de simulações para chegar no gráfico.

Figura 22 - Gráfico da simulação para encontrar o ponto de máxima eficiência do MCC



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2025).

Como existem 9 painéis solares na embarcação, são utilizadas 9 placas do MCC, todas com o mesmo *hardware* e *firmware*. Embora cada placa MCC utilize o mesmo conversor *Ćuk* e *firmware*, o fato de nove módulos operarem simultaneamente a aproximadamente 137 kHz pode gerar problemas significativos de EMI e interação indesejada entre si. Cada placa, ao chavear em alta frequência, produz harmônicas que podem se somar, resultando em maior densidade de ruído no barramento de alimentação e no plano de terra comum. Além disso, mesmo que todas as placas estejam nominalmente na frequência ótima (137.547 Hz), pequenas variações nas frequências reais desses conversores (por exemplo, diferenças de poucos Hz entre placas) podem gerar frequências de batimento, resultando em componentes harmônicas adicionais próximas da frequência fundamental (por exemplo, $\pm$ alguns kHz em torno de 137 kHz). Essas novas componentes harmônicas aumentam o espectro total de EMI gerado, especialmente devido à proximidade física entre os módulos dentro do compartimento eletrônico da embarcação, intensificando a probabilidade de interferências eletromagnéticas por acoplamento capacitivo e indutivo.

No nível de EMI conduzida, os pulsos de corrente gerados pelos MCCs tendem a se somar no barramento de alimentação, introduzindo ruído tanto na linha principal de 36 V quanto nos 18 V da rede CAN. Esse ruído pode impactar o desempenho dos conversores, causando instabilidades no laço de controle, além de afetar outros módulos que compartilham essa alimentação, como o MFP e os módulos que utilizam da rede CAN. Nesse contexto, a ausência de uma estratégia para coordenar a operação dos MCCs dificulta o controle e a mitigação do ruído gerado, pois múltiplos harmônicos simultâneos se sobrepõem, exigindo técnicas de filtragem mais rigorosas e aumentando o desafio no dimensionamento das soluções de EMC.

Figura 23 – Adaptações na placa do MCC



Fonte: Elaboração própria (2024).

Além do possível problema gerado pela alta comutação das placas, foi necessário adicionar, aos controladores de carga, um ADC externo ao projeto para contornar falhas de leitura do conversor analógico-digital interno do microcontrolador (STM32), como mostra a figura 23, onde é possível notar um módulo adicional na placa em seu canto superior esquerdo, circulado em vermelho. Essa adaptação ocorreu após a placa apresentar travamentos e medições incorretas, levando o

sistema a parar de funcionar em testes com todos os módulos do barco conectados, ou seja, em situações de ruído mais elevado.

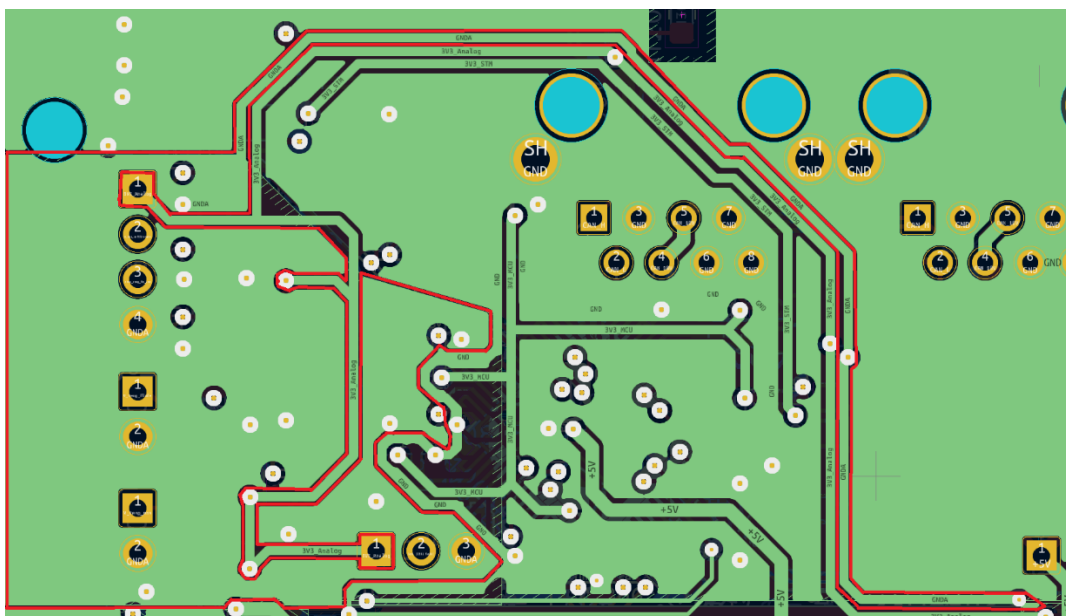
Para contornar o problema, primeiro foi procurado alguma errata para os microcontroladores STM32, porém a única encontrada foi uma errata da STMicroelectronics (2022) em que não se falava sobre esse tipo de problema. Porém, foi encontrado em um fórum da STMicroelectronics (2021) um problema parecido, onde a causa aparenta estar no fato do microcontrolador não ser galvanicamente isolado, de forma que o ADC, ao receber picos de tensão acima da tensão suportada, acaba travando, sendo necessário o reset do módulo.

Ainda de acordo com a figura 23, a implementação de um ADC externo demandou a solda de fios adicionais ao redor da placa, servindo como interconexões provisórias. Entretanto, cada fio extra introduz novas capacitâncias parasitas e pode aumentar as correntes de modo comum, agravando ainda mais os desafios de EMC. Esse cenário ressalta a importância de um planejamento prévio das trilhas e da alocação de componentes críticos: qualquer retrabalho feito “em campo” tende a ser mais suscetível a ruídos, pois quase sempre amplia a área de loop ou interfere na topologia do circuito.

Um tema também comum entre várias placas é a de solda de fios adicionais em diversos pontos de cada placa, pois nem sempre as placas funcionam da maneira que foram projetadas e corriqueiramente é necessário a correção do *layout* para que alguma função seja desempenhada da forma correta. Essas correções se tornam necessárias tendo em vista que seria um processo muito caro refazer as placas do zero, tendo que alterar o *layout* já existente, dimensionar novos componentes, encomendar placas e por fim fazer o processo de solda delas. Uma cadeia de produção dessas, em um ambiente acadêmico e com pouco incentivo econômico, se torna muito difícil de implementar.

Embora a placa original seja, de modo geral, bem projetada, notam-se algumas fragilidades de *layout*, como quebras parciais no plano de terra que podem facilitar a propagação de EMI até os pinos de sinal, mostrado na figura 24.

Figura 24 – Recorte do *layout* de uma das camadas internas da placa do MCC



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2025).

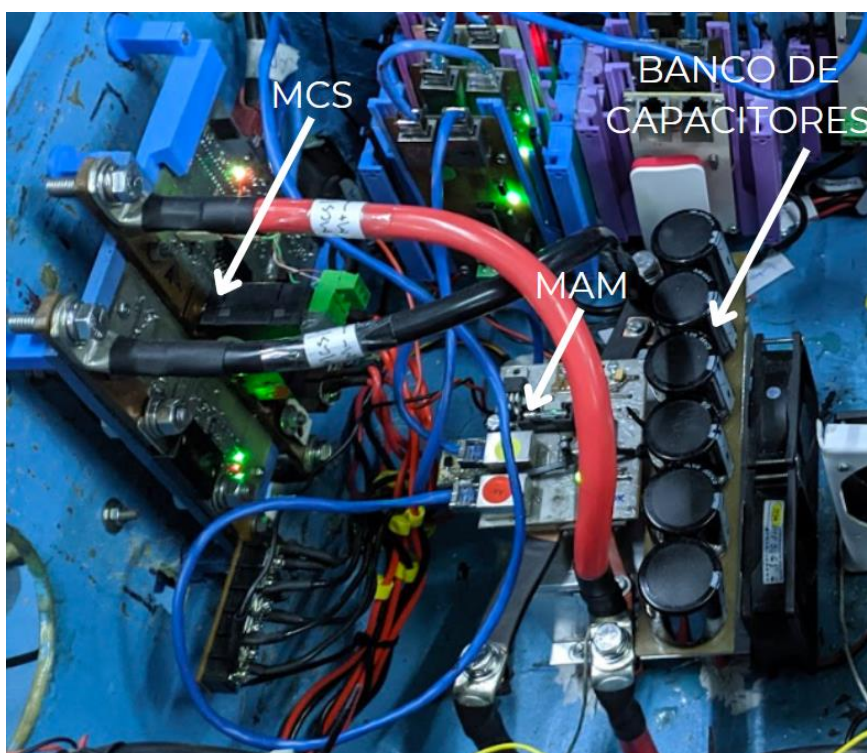
A Figura 24 apresenta uma camada interna da PCI do MCC, destacando em vermelho uma área onde há uma separação involuntária no plano interno de GND. Essa quebra cria duas regiões isoladas, conectadas apenas por vias localizadas em outra camada da placa. Diferentemente de uma separação intencional, com objetivo claro de reduzir EMI entre circuitos analógicos e digitais (ou de potência), esta descontinuidade involuntária pode prejudicar a performance EMC, pois aumenta a impedância parasita para as correntes de alta frequência, dificultando o retorno eficaz dessas correntes. Como consequência, o risco de interferências eletromagnéticas por acoplamento capacitivo e indutivo é ampliado, especialmente no bloco de potência e chaveamento da placa.

4.1.4 Análise do MCS

A última placa analisada com potencial de geração de EMI foi o MCS, responsável por transmitir os 36 V para o MAM. O MCS apresenta um banco de capacitores eletrolíticos que, em conjunto com os cabos de alta corrente que se conectam a uma barra de cobre, formam um sistema crucial para o gerenciamento dos picos de tensão gerados durante o chaveamento de correntes elevadas (da ordem de 100 A). A figura 25 mostra a configuração utilizada na embarcação, com o

MCS no canto esquerdo (com uma seta branca apontada para ele, com a escrita “MCS”), os cabos que vão da bateria para o banco de capacitores, sendo eles os cabos vermelho e preto mais grossos no meio da figura, e por fim o MAM, também com uma seta branca, escrito “MAM”, junto com o banco de capacitores, também evidenciado na figura.

Figura 25 - Recorte do compartimento da eletrônica evidenciando o MCS, MAM e banco de capacitores



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2025).

Embora o projeto original tenha sido concebido para mitigar os efeitos dos picos de tensão e garantir uma alimentação estável, o comportamento dinâmico desses capacitores eletrolíticos em altas frequências merece atenção. Devido às suas características parasitas, tais capacitores podem atuar como elementos indutivos para as componentes de alta frequência, permitindo que picos de tensão não absorvidos se propaguem pelo sistema. Essa propagação ocorre mesmo que o circuito possua fontes de alimentação separadas, pois o caminho comum de retorno, compartilhado pelo terminal negativo das baterias, facilita o acoplamento indutivo e capacitivo do EMI para circuitos sensíveis, como os módulos de comunicação.

Além disso, as intensas correntes chaveadas e os cabos de baixa indutância, conectados à barra de cobre, intensificam o fenômeno de picos de tensão durante a comutação. Pequenas variações nas características dos capacitores e dos condutores podem resultar em desequilíbrios, ampliando a geração de ruídos eletromagnéticos.

Em síntese, a análise do MCS evidencia que, apesar de sua função essencial no acionamento do motor, o arranjo dos seus capacitores e a disposição dos cabos podem ser fontes significativas de interferência eletromagnética. A ausência de filtragem específica para altas frequências, aliada ao acoplamento indesejado entre os elementos da placa, pode comprometer a integridade do sinal em outros subsistemas, como a rede CAN e os circuitos de comunicação.

4.2 Problemas gerais da embarcação

Somado a todos os problemas específicos de cada placa, considerando a embarcação como um sistema completo, é necessário avaliar como diferentes fatores relacionados à EMC afetam o desempenho global do barco. A EMI não se manifesta apenas em falhas isoladas de componentes, mas pode comprometer o funcionamento integrado do sistema ao introduzir ruídos em barramentos de alimentação, comunicação e sensores. Além disso, a presença de múltiplos conversores chaveados e longos trechos de cabeamento cria um ambiente propício para acoplamentos indesejados, tanto capacitivos quanto indutivos. Essas interferências podem resultar em oscilações inesperadas na comunicação entre módulos, degradação da integridade do sinal e impactos no controle do barco.

Três aspectos críticos foram identificados nessa análise, tanto por análise própria como também por *feedback* dos integrantes da equipe:

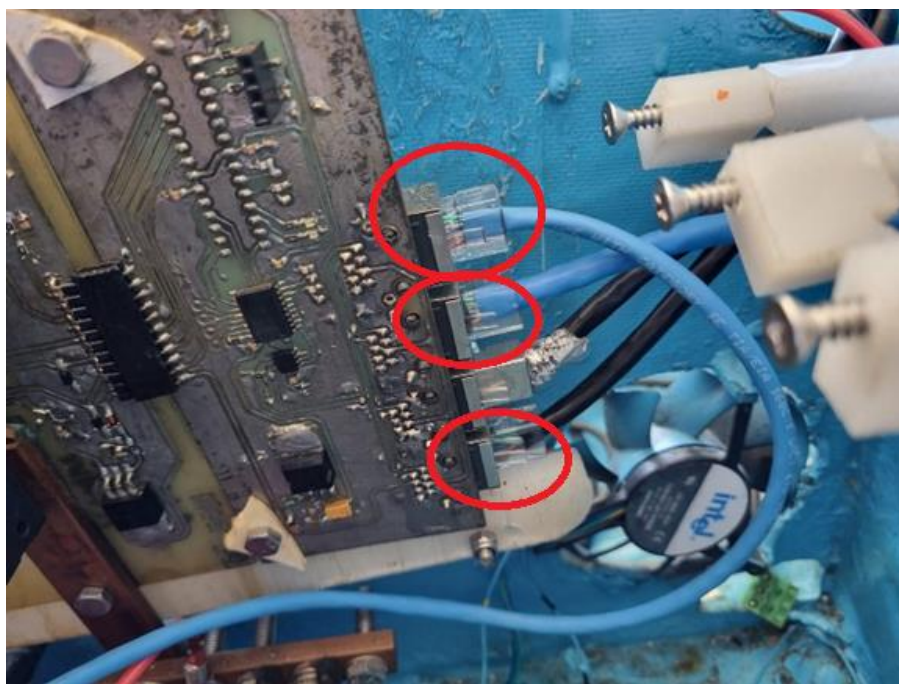
- a) inconsistências na blindagem dos cabos da embarcação;
- b) compartilhamento de conectores para comunicação e alimentação;
- c) interferências em sistemas auxiliares, como o rádio de comunicação.

A seguir, cada um desses pontos será discutido em detalhes.

4.2.1 Análise da blindagem

Durante a análise presencial da embarcação, foi observada uma inconsistência no uso de cabos RJ45, utilizados tanto para comunicação quanto para alimentação dos módulos. Como mostra a Figura 26, há uma mistura de cabos blindados e não blindados, sem um critério claro para sua utilização.

Figura 26 – Inconsistência na blindagem de cabos pela equipe



Fonte: Elaboração própria (2024).

A figura 26 mostra quatro conectores RJ45 utilizados no sistema, sendo que três deles (destacados em vermelho na imagem) utilizam cabos e conectores sem blindagem, enquanto um conector (não destacado) possui blindagem completa. Cada conector transporta simultaneamente os dois condutores de dados da rede CAN e, separadamente, as linhas de alimentação de 18 V dos módulos. Embora utilizem fisicamente o mesmo cabo, as linhas da rede CAN e da alimentação são independentes entre si. É importante destacar que, na embarcação analisada, há uma mistura de cabos blindados e não blindados, o que pode influenciar diretamente o comportamento eletromagnético e a susceptibilidade à EMI no sistema. Além disso, atualmente, não há um critério ou estratégia clara quanto ao uso da blindagem nos cabos da embarcação, resultando em uma configuração híbrida em

que coexistem conexões blindadas e não blindadas. Essa ausência de padronização pode tornar imprevisível a propagação e captação de interferências eletromagnéticas entre diferentes módulos, dificultando o controle e a mitigação efetiva da EMI no sistema.

Para melhor ilustrar a diferença entre conectores com e sem blindagem, a figura 27 compara os dois, lado a lado. Note que o conector a esquerda é todo envolto em plástico, enquanto o da direita é metálico. Essa parte metálica se conecta ao conector fêmea, que está aterrado já nas placas, e, dessa forma, garante a continuidade da blindagem.

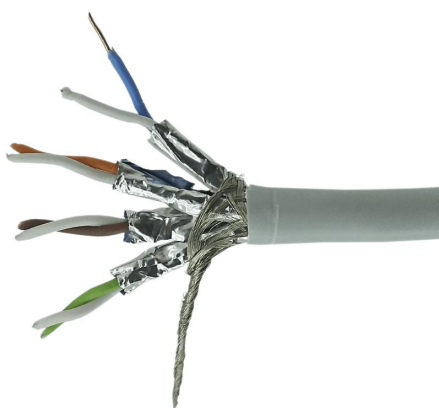
Figura 27 - Comparação entre conectores RJ45 com e sem blindagem



Fonte: Adaptado de VCELink (2024).

Além deles, é necessário também utilizar cabos blindados, que possuem uma malha metálica ao seu redor. A figura 28 mostra um cabo da categoria Cat-7, que possui malha ao redor do cabo e em cada par de fios, aumentando o isolamento de cada sinal.

Figura 28 - Cabo de rede CAT-7



Fonte: ED Cabos (2025).

Quando parte do sistema utiliza cabos RJ45 blindados e outra utiliza cabos sem blindagem, as seções desprotegidas podem captar interferências eletromagnéticas, que acabam se propagando pelos condutores até as áreas protegidas. Essa falta de continuidade na blindagem compromete sua eficácia geral, uma vez que a proteção contra interferências eletromagnéticas só é plenamente eficaz quando mantida ao longo de todo o percurso do barramento.

Em sistemas eletrônicos embarcados, como em ambientes náuticos, o barramento de negativo é frequentemente utilizado como referência elétrica. No entanto, essa configuração pode não oferecer um caminho de baixa impedância para as correntes de alta frequência que circulam pelas blindagens. Quando a blindagem não é contínua ou a referência de retorno apresenta descontinuidades, podem surgir correntes de modo comum, favorecendo a formação de loops indesejados. Esse cenário pode intensificar a suscetibilidade do sistema a interferências eletromagnéticas e comprometer a integridade dos sinais.

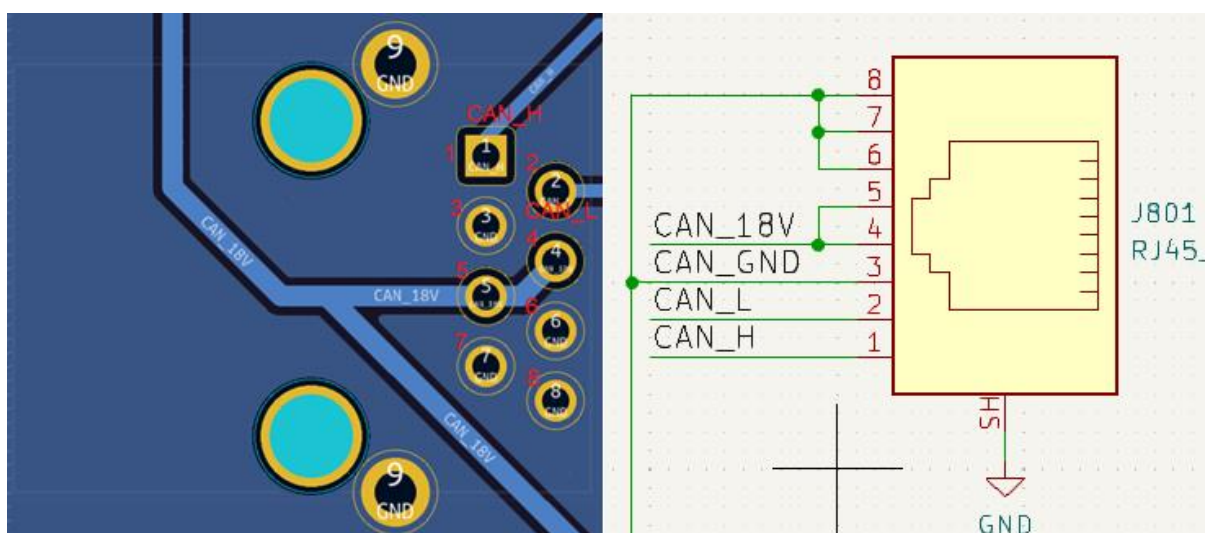
Como consequência, mesmo que alguns trechos utilizem cabos blindados, a proteção geral contra interferências pode ser comprometida devido às descontinuidades na blindagem e à forma como as correntes de alta frequência se propagam no sistema. Embora o barco possua uma referência de potencial unificada pelo negativo das baterias, a blindagem parcial dos cabos pode criar caminhos parasitas para correntes de modo comum, aumentando a suscetibilidade do sistema a interferências eletromagnéticas. O ideal seria garantir a continuidade da blindagem ao longo de todo o percurso dos sinais e alimentação, reduzindo a formação de

loops indesejados e impedindo que ruídos migrassem para a rede de comunicação e afetassem o desempenho dos componentes eletrônicos.

4.2.2 Análise dos conectores dos módulos

Além da inconsistência na blindagem dos cabos, a própria configuração dos conectores da rede CAN e da alimentação pode impactar o desempenho do sistema. A figura 29 apresenta as conexões do conector dos módulos, composto por fios que passam a comunicação da rede CAN e fios de alimentação desse módulo, que é o mesmo utilizado por todas as placas da embarcação, como foi possível notar na figura 17.

Figura 29 – Layout e esquemático das conexões utilizadas no RJ45 da rede CAN



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2024).

Na conexão RJ45 da Figura 29, todos os 8 pinos foram numerados e destacados em vermelho, sendo utilizados da seguinte forma: os pinos 1 e 2 transportam os sinais de comunicação da rede CAN (CAN_H e CAN_L, respectivamente), os pinos 4 e 5 fornecem a alimentação de 18 V para os módulos, e os pinos 3, 6, 7 e 8 servem como referência de terra (GND). Dessa forma, todos os condutores do cabo RJ45 são utilizados no sistema, unificando a transmissão de dados e a alimentação elétrica em um único cabo. Do ponto de vista da instalação, essa configuração reduz a quantidade de cabos na embarcação e facilita a

manutenção do sistema. Vale destacar, novamente, que todos os módulos do sistema utilizam esses conectores.

Por outro lado, essa configuração pode apresentar problemas de EMI. Quando alimentação e dados trafegam lado a lado dentro do mesmo cabo, a comutação ou variação de carga na linha de 18 V pode introduzir ruídos eletromagnéticos que se acoplam ao barramento CAN, mesmo que os condutores CAN_H e CAN_L sejam trançados para reduzir interferências. O barramento CAN opera com sinalização diferencial, onde os condutores transportam tensões complementares em relação ao potencial de referência, garantindo maior imunidade a ruídos externos. No entanto, esse ruído tende a ser mais crítico em ambientes onde há conversores chaveando em alta frequência (por exemplo, a 137 kHz ou 525 kHz), pois as taxas de variação de tensão e corrente são elevadas. Esse acoplamento pode ocorrer de forma capacitiva ou indutiva e, caso o cabo RJ45 não possua blindagem completa (tanto no cabo como nos pares de fios) ou se a blindagem não estiver corretamente aterrada, aumenta a probabilidade de interferências, resultando em erros de transmissão ou perda de pacotes.

Para mitigar esses efeitos, é fundamental que o projeto do sistema adote estratégias como a separação física entre alimentação e comunicação, o uso de cabos blindados e a implementação de soluções de filtragem, como ferrites e capacitores de desacoplamento. Sem essas precauções, as variações na alimentação de 18 V podem induzir interferências no barramento CAN, comprometendo a integridade da comunicação e resultando em mau funcionamento intermitente ou degradação do desempenho geral do sistema.

Além disso, quando alimentação e comunicação compartilham o mesmo conector, é fundamental que o sistema seja capaz de gerenciar as correntes de alta frequência oriundas das interferências eletromagnéticas. Se a blindagem ou a filtragem não forem adequadas, os ruídos podem se acoplar diretamente aos sinais de comunicação. Analisando o conector de alimentação e comunicação dos módulos, observou-se que a integração dos condutores responsáveis pela alimentação (18 V e GND) com os sinais CAN pode facilitar a indução de ruídos, comprometendo a integridade dos dados transmitidos entre os módulos. Essa situação reforça a necessidade de implementar medidas de filtragem e isolamento, que separem os sinais de alimentação dos de comunicação, assegurando maior robustez e confiabilidade do sistema.

Além disso, embora a presença de múltiplos pinos aterrados (GND) contribua para a redução da resistência no caminho de retorno e estabeleça uma referência comum para o sistema, isso não elimina a necessidade de um *layout* adequado, filtros apropriados e blindagens contínuas. Isso ocorre porque, em frequências elevadas, o caminho de retorno da corrente não segue necessariamente o percurso de menor resistência, mas sim o de menor impedância, porque, conforme a frequência aumenta, a reatância indutiva torna-se mais significativa, fazendo com que a corrente prefira trajetórias com menor impedância, mesmo que essas trajetórias apresentem uma resistência ligeiramente superior.

4.2.3 Análise do funcionamento da rede CAN

Segundo a especificação da rede CAN (Bosch, 1991), a rede CAN transmite dados em estruturas denominadas quadros de dados (*data frames*), que incluem campos como identificador, dados, bits de verificação e campos de controle. Embora esses mecanismos de verificação existam, a ausência de um monitoramento rigoroso dos erros pode impedir a detecção de falhas persistentes no barramento.

Em redes CAN, a taxa de bits está diretamente relacionada à tolerância do sistema a ruídos e variações de sinal. Quanto maior a velocidade de transmissão, menor é a duração de cada bit no barramento. Isso significa que sinais espúrios, ruídos ou variações transitórias de tensão têm menos tempo para serem filtrados ou compensados, aumentando a chance de erros na detecção dos dados transmitidos. Segundo a especificação da rede CAN (Bosch, 1991), o tempo de bit é dividido em segmentos, incluindo um intervalo de propagação para compensar atrasos físicos e dois segmentos de fase para ajustar a sincronização dos nós da rede. Em velocidades mais altas, esses segmentos são reduzidos, diminuindo a capacidade do sistema de corrigir variações e tornando o barramento mais suscetível a falhas de transmissão quando exposto a interferências eletromagnéticas.

Em um ambiente como o de uma embarcação, onde coexistem motores de alta potência e conversores chaveados, a comutação em frequências elevadas pode gerar ruídos eletromagnéticos que afetam os sinais da rede CAN. O barramento CAN utiliza sinalização diferencial, onde os condutores CAN_H e CAN_L transportam tensões complementares em relação ao potencial de referência. Esse

método aumenta a imunidade contra interferências externas, pois o receptor considera a diferença entre os sinais em vez dos níveis absolutos de tensão. No entanto, se o ruído induzido for acoplado de maneira assimétrica aos dois condutores, pode causar desequilíbrio no sinal diferencial, reduzindo sua capacidade de rejeitar interferências. Quando esses níveis de ruído atingem patamares críticos, a rede CAN pode apresentar falhas, resultando em perda de quadros de dados ou exigindo retransmissões automáticas.

Outro ponto de atenção se refere à velocidade da rede CAN, que opera a 500 kbps atualmente, permitindo uma alta taxa de transmissão de dados. No entanto, observou-se que o barramento apresenta um número significativo de erros de transmissão, que não são rigidamente verificados pela equipe. Isso significa que, embora muitas mensagens contenham falhas, a alta taxa de comunicação permite que um número suficiente de quadros corretos seja recebido, garantindo a operação do sistema na prática. Entretanto, essa abordagem pode mascarar problemas de EMC, já que erros recorrentes indicam possibilidade de EMI no barramento. Em situações mais críticas, onde a taxa de erro pode aumentar, a confiabilidade da comunicação pode ser comprometida, afetando o desempenho global da embarcação.

Para mitigar essas falhas, reduzir a velocidade de comunicação pode ser uma estratégia eficaz, pois aumenta o tempo de bit e amplia a janela de tolerância para variações de tensão causadas por ruídos de alta frequência, já que, quanto menor a frequência de comunicação, maior o tempo que o sinal passa em nível lógico alto ou baixo antes de fazer a transição de estado. Dessa forma, o barramento se torna menos suscetível a interferências eletromagnéticas e erros de transmissão. No entanto, essa redução de velocidade também diminui a capacidade de transmissão de dados, impactando o desempenho geral do sistema.

4.2.4 Análise dos sistemas auxiliares

Foram realizadas entrevistas não estruturadas com alguns membros da equipe, especialmente da área de eletrônica, para identificar possíveis comportamentos errôneos do sistema cuja causa não estivesse clara. Durante essas entrevistas, foi relatado que, em determinados momentos, o rádio de comunicação deixava de funcionar assim que o motor era acionado.

Apesar de o rádio possuir uma fonte de energia independente, alimentando-se de uma bateria auxiliar, observou-se que o ruído gerado pelo MCS poderia estar interferindo no funcionamento do equipamento, por conta do seu banco de capacitores. Isso pode ocorrer porque, mesmo com alimentação separada, a EMI gerada pelo sistema pode se propagar de forma radiada, atingindo o rádio por meio do acoplamento capacitivo e indutivo. Além disso, tanto o MCS como o MCB têm contato direto com o barramento dos 36 V das baterias principais, então é possível que esse ruído gerado se propague até o barramento de alimentação principal e depois encontre seu caminho até as baterias auxiliares.

Esse ruído pode, além disso, se propagar pelo sistema de diferentes maneiras. Como a referência desse trecho do sistema é apenas o terminal negativo das baterias, as correntes de alta frequência geradas podem interferir tanto no caminho de alimentação quanto no receptor do rádio. Dessa forma, mesmo com uma fonte de alimentação separada, o rádio não está completamente imune aos efeitos de EMI quando compartilha algum trajeto de retorno com o MCS.

Vale destacar que o rádio utilizado na embarcação é um produto certificado, que opera dentro das normas de funcionamento exigidas. Contudo, isso não o torna imune a interferências externas, apenas garante que o equipamento atenda aos testes específicos para comercialização, conforme estabelecido pela resolução 442 da Anatel de 2006.

Esses dois sintomas, a interrupção do funcionamento do rádio na presença do motor e o mau funcionamento da rede CAN, com erros frequentes, são indícios concretos de que a EMI está impactando o desempenho da embarcação. Eles refletem a falta de isolamento entre subsistemas, a ausência de blindagem ou filtragem adequada dos cabos, além da inexistência de um caminho efetivo para dissipar as correntes de alta frequência. Mesmo as partes do sistema que contam com fontes de alimentação separadas podem ser afetadas quando o ruído eletromagnético, conduzido ou irradiado, não encontra barreiras suficientes para contê-lo.

4.3 Análise e discussão dos resultados

Neste tópico serão discutidas possíveis soluções para mitigar as interferências eletromagnéticas identificadas, levando em conta as boas práticas de

design relacionados à EMC, além de elaborar um plano de ação para implementar as medidas de mitigação propostas.

Durante o estudo de EMC, diversas boas práticas de design são apresentadas, cada uma voltada a um tipo de problema específico. No caso da embarcação da Zênite Solar, os tópicos anteriores evidenciaram uma série de falhas envolvendo o *layout* das placas (com laços de alta comutação, MOSFETs próximos ou em paralelo), a seleção de componentes (incluindo a adição emergencial de um ADC externo em uma placa suscetível a ruídos), a definição de frequências de chaveamento (com conversores operando a 137 kHz e 525 kHz, resultando em somas de harmônicas e efeitos de batimento) e a blindagem parcial ou inexistente em cabos e conectores. Em conjunto, esses fatores favorecem interferências entre as placas, seja por acoplamento capacitivo e indutivo ou pelo barramento de alimentação, dificultam a comunicação na rede CAN (levando à diminuição da eficiência do protocolo) e até afetam dispositivos como o rádio quando o motor está em operação.

4.3.1 Soluções para o MCC

4.3.1.1 Soluções em Hardware

Começando pelos problemas mais críticos, as placas do MCC são um foco de discussão. Melhorias no *layout* podem otimizar a trilha do *gate* do MOSFET, modelo BSC093N15NS5, responsável pelo chaveamento do PWM, como ilustrado na figura 30. Ao reduzir o percurso desnecessário e concentrar o sinal crítico em uma área mais compacta, diminui-se a probabilidade de acoplamentos indesejados, resultando em menor emissão de sinais espúrios.

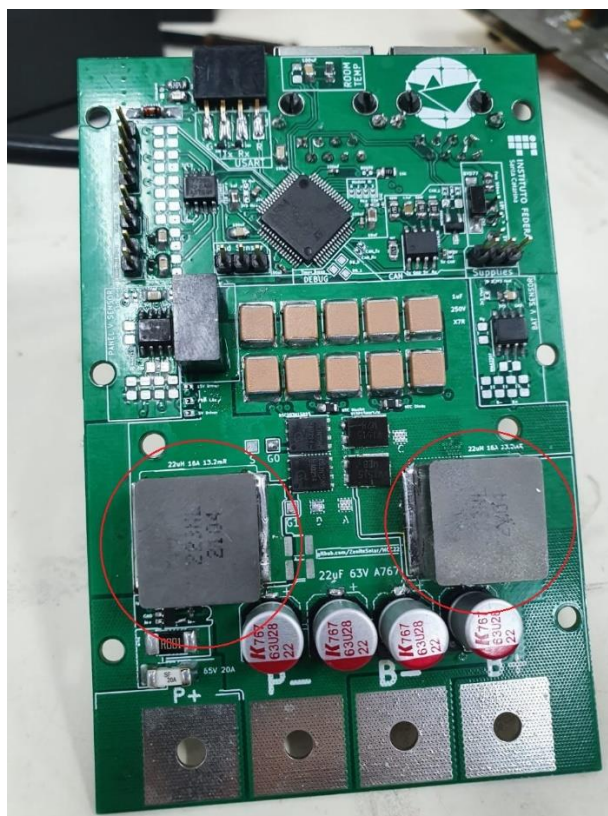
Outro ponto importante é assegurar um caminho de retorno bem definido para o *driver* do *gate*, ou seja, um percurso de baixa impedância, curto e contínuo que acompanha a trilha do sinal de forma próxima e paralela. Conforme as boas práticas de *layout* discutidas na fundamentação, a corrente de acionamento do *gate* deve ter um loop de retorno minimizado, de modo que o caminho de retorno permaneça o mais próximo possível da trilha principal, reduzindo a área do loop e, conseqüentemente, a emissão de EMI. Para alcançar esse objetivo, recomenda-se posicionar vias estrategicamente, garantindo que o plano de referência ou o retorno do *driver* siga a trilha do *gate* sem criar trajetos extensos ou atravessar regiões de alta densidade de corrente.

Por fim, vale ressaltar que o grande plano de *source* pode ser benéfico para dissipação térmica e redução de resistência, mas deve ser projetado em conjunto com a rota do *gate* para evitar sobreposições desnecessárias que ampliem a área de loop ou promovam o acoplamento de ruídos. Um *layout* mais compacto, com o *driver* de *gate* fisicamente próximo ao MOSFET, e trilhas curtas para *gate* e retorno, tende a apresentar melhor desempenho em aplicações que exigem alta confiabilidade e eficiência em frequências de chaveamento da ordem de dezenas a centenas de kHz.

Além disso, uma outra solução para o problema da EMI propagada seria o de aplicar uma blindagem em torno da placa. Em blindagens, diversos materiais podem ser utilizados, como o alumínio, cobre, aço ou até mesmo latão. Para a aplicação na placa do MCC, o ideal, por conta da frequência atual de chaveamento, seria de utilizar uma chapa de aço, por conta de seu peso e custo.

Existe uma infinidade de possibilidades de como utilizar as chapas de aço para aplicar a blindagem em cada placa. As soluções mais comuns, utilizadas em produtos, é a de utilizar cobrindo a placa por completo, ou utilizar uma chapa como barreira entre duas placas de interesse. Outra solução, pensando em utilizar poucos recursos, é a de aplicar blindagens localizadas em torno dos transformadores e indutores. Apesar de não ser a melhor solução, pode ajudar bastante com o problema da propagação de ruídos gerados pelas placas dos MCCs. A figura 31 mostra possíveis áreas na placa do MCC que poderiam ter blindagens parciais aplicadas.

Figura 31 - Possíveis aplicações de blindagem localizada na placa do MCC



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2025).

Ainda sobre o MCC, é possível também, no futuro, com os componentes definidos oficialmente (para não utilizar emendas), refazer suas placas de forma que se tenha uma camada como plano de referência entre a camada de sinal e a camada de potência. Dessa forma, não só os sinais vão ficar mais bem separados, como terá diminuição no *crosstalk*, além de um melhor escoamento das correntes de alta frequência.

Por último, é possível também fazer modificações diretamente no problema apresentado sobre o ADC, que ficou evidenciado na figura 23. O problema identificado foi a de não ter um isolamento no STM32, causando os picos de tensão que travam o módulo do ADC dentro do chip. Para esse problema, é possível fazer a troca de microcontrolador, caso não seja possível limitar o pico de tensão que chega no ADC.

Ao trocar de chip e escolher um que tenha isolamento ou que seja exaustivamente testado e que não tenha esse tipo de problema apresentado, a necessidade de colocar um ADC externo a placa desaparece, e não há mais o problema de uma correção em uma placa já pronta.

4.3.1.2 Soluções em Firmware

Além das soluções na placa em si, alterações no *firmware* do MCC podem ser implementadas para reduzir as harmônicas geradas pelos nove conversores idênticos. Uma estratégia é ajustar a frequência de comutação de cada conversor, atribuindo uma frequência fixa a cada placa com um deslocamento de 1 kHz entre elas. Por exemplo, um conversor operaria a 133 kHz, o próximo a 134 kHz, e assim por diante, até atingir 141 kHz, considerando que o ponto ótimo de operação é 137 kHz. Dessa forma, as harmônicas geradas não coincidem em frequências críticas, minimizando os efeitos de batimento e distribuindo a energia de EMI ao longo do espectro.

Essa solução pode se provar ainda bastante eficiente pois, ao verificar novamente a figura 23, pode-se notar que a eficiência do MCC fica acima de 95% entre qualquer frequência de 100 kHz a 150 kHz, portanto, variar entre 133 e 141 kHz não vai apresentar uma queda perceptível na eficiência do conversor.

Além disso, se utilizarmos um espectro de frequência entre 133 kHz e 141 kHz, as harmônicas só se sobrepõem em faixas ao redor de 2,720 GHz, diluindo o ruído conjunto em frequências mais altas. Quando todas as placas operam na mesma frequência, por exemplo, 137 kHz, a qual é a frequência otimizada para o funcionamento do conversor, os harmônicos gerados por cada componente tendem a se alinhar e coincidir em determinados múltiplos dessa frequência. Em um cenário onde essa técnica não é utilizada, os picos de energia não se dispersam pelo espectro, mas se concentram em pontos específicos, fazendo com que um dos primeiros múltiplos, que pode ocorrer por volta de 275 kHz, se forme pela soma dos harmônicos de cada placa, acumulando energia e resultando em um pico significativo de EMI.

Por outro lado, quando se adota esse ajuste de frequência nos conversores, as frequências de operação variam ligeiramente entre os componentes, provocando uma dispersão dos harmônicos por uma faixa mais ampla. Essa dispersão impede que os picos se acumulem de forma concentrada, diluindo a energia do ruído e, conseqüentemente, mitigando os efeitos adversos da EMI no sistema, o que contribui para uma performance e confiabilidade superiores dos sistemas embarcados.

Tabela 2 – Comparações entre as menores harmônicas entre placas com e sem mudança de frequência nas placas

Harmônicas	Sem aplicação de mudança de frequência nas placas	Com aplicação de mudança de frequência nas placas
1	137 kHz	2,720 GHz
2	275 kHz	6,168 GHz
3	412 kHz	6,303 GHz
4	550 kHz	6,444 GHz
5	687 kHz	17,968 GHz

Fonte: Elaboração própria (2024).

É importante observar, contudo, que a técnica de variação de frequência pode exigir ajustes no laço de controle dos conversores, pois cada MCC terá um comportamento ligeiramente diferente em termos de potência entregue. Além disso, ao deixar somente um dos conversores na frequência ideal, oito dos nove conversores não irão operar idealmente. Mas, considerando novamente a eficiência do conversor demonstrada na figura 22, embora haja uma redução na eficiência de oito dos nove conversores, essa perda pode ser considerada aceitável.

4.3.2 Soluções para o MCB

No MCB, embora a proximidade entre os MOSFETs seja apontada como uma possível fonte de acoplamento indesejado, essa configuração é comum em circuitos de potência e contribui para uma dissipação térmica eficaz. De fato, afastá-los excessivamente pode agravar problemas térmicos, causando diferenças de temperatura prejudiciais ao desempenho. Assim, em vez de alterar a disposição dos MOSFETs, adota-se uma abordagem complementar para mitigar a interferência eletromagnética. Por exemplo, a implementação de filtros LC na entrada da placa pode conter o ruído proveniente das baterias e reduzir os picos de corrente das comutações, enquanto, na saída, um *choke* de modo comum minimiza a radiação de alta frequência direcionada à rede CAN e a outros subsistemas.

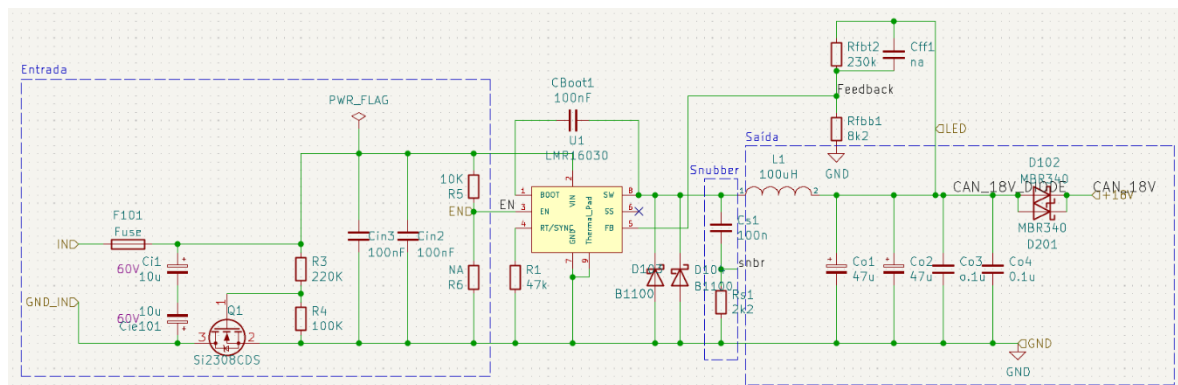
Além disso, como estratégia adicional de mitigação de EMI, é interessante considerar a aplicação de isolamento eletromagnético em áreas críticas do MCB, especialmente na região do conversor Buck. Essa medida consiste na instalação de uma barreira física, como, por exemplo, uma chapa de aço, que funcione como

blindagem, separando os circuitos de potência dos demais componentes e, assim, reduzindo o acoplamento de ruídos. Embora essa solução envolva um custo adicional, ela pode representar uma alternativa eficaz para diminuir o ruído na placa.

4.3.3 Soluções para o MFP

Para o MFP, a figura 32 mostra o esquemático da placa, onde é possível notar o estágio de entrada, o *snubber*, e o estágio de saída, separados em azul.

Figura 32 – Esquemático da placa MFP separado em estágios



Fonte: Adaptado de Zênite Solar (2025).

Ao analisar o esquemático da placa na figura 32, baseada no LMR16030, percebe-se que ela segue uma topologia de conversor Buck relativamente simples. Na entrada, há apenas capacitores (C11 e C12) em conjunto com o fusível (F1), sem um filtro dedicado especificamente à atenuação de harmônicas de alta frequência. Na saída, o indutor L1 e os capacitores (Co1, Co2, Co3 e Co4) estabilizam a tensão de 18 V e ajudam a filtrar parte do ruído, mas ainda não configuram um segundo estágio de filtragem para reduzir eficazmente as harmônicas em torno de 525 kHz ou em faixas de MHz. Por isso, de acordo com boas práticas de design, recomenda-se adicionar um filtro LC adicional (como *choke* de modo comum ou *ferrite beads*) tanto na entrada quanto na saída, de modo a conter picos de corrente e tensão que possam afetar outras placas ou linhas de alimentação do sistema.

Em termos de mitigação de EMI, o LMR16030 conta com um MOSFET *high-side* integrado e proteção interna para o pino SW (Texas Instruments, 2021). Apesar de possuir um *snubber* RC na saída do pino SW, ainda assim, é indispensável analisar, por meio de medições no osciloscópio, eventuais *overshoots*

ou *ringing* intensos que possam interferir na integridade do sinal. Da mesma forma, a adição de *ferrite beads* no caminho de entrada ajudaria a atenuar frequências mais altas. Essas medidas complementares podem fazer grande diferença, pois a alta frequência de chaveamento (525 kHz) tende a gerar harmônicas em bandas de MHz, que podem irradiar para trilhas adjacentes ou passar pelo barramento até atingir a rede CAN.

4.3.4 Soluções para o MCS

Dentre as possíveis soluções para mitigar os problemas de EMI entre o MCS e, eventualmente, o problema com o rádio, podem ser adotadas diversas estratégias que atuam tanto na supressão dos picos de tensão quanto na minimização do acoplamento indesejado entre os subsistemas.

Uma das abordagens mais imediatas é a implementação de filtragem mista, por meio da instalação de capacitores cerâmicos ou de filme em paralelo com os eletrolíticos já existentes na placa do MCS. Os capacitores cerâmicos possuem baixa indutância e resposta rápida a variações de alta frequência, sendo mais eficazes para absorver as componentes de ruído geradas durante o chaveamento. Essa medida ajudaria a capturar os picos de tensão que, de outra forma, seriam propagados para o sistema, reduzindo a interferência conduzida até o rádio. De acordo com a KEMET (2022), capacitores RF, frequentemente fabricados em cerâmica, são essenciais para a filtragem de sinais de alta frequência devido à sua baixa indutância e alta eficiência em suprimir ruídos.

Outra solução importante envolve o aprimoramento do isolamento e da blindagem do sistema. A utilização de barreiras metálicas ou compartimentalização dos circuitos pode diminuir o acoplamento capacitivo e indutivo entre o MCS e os circuitos sensíveis do rádio.

Adicionalmente, a inserção de filtros de modo comum, como *chokes*, nas linhas de alimentação que alimentam o rádio, pode aumentar a impedância para as correntes de alta frequência, dificultando a condução do ruído para os circuitos sensíveis. Essa medida, aliada à implementação de circuitos *snubber* para amortecer oscilações e reduzir o *ringing* durante as transições de comutação, pode atenuar significativamente os picos de tensão e o consequente EMI gerado pelo MCS.

4.3.5 Soluções para o restante da embarcação

Juntamente com os ajustes feitos nas placas, existem alguns outros problemas na embarcação que necessitam de uma solução. O primeiro deles é o dos cabos RJ45 utilizados para a rede CAN. Uma estratégia para reduzir interferências no barramento é investir em cabeamento e conectores adequadamente blindados ao longo de toda a extensão do sistema. Quando o barramento está completamente envolto em blindagem contínua, minimizam-se as “fugas” por onde o ruído de alta frequência poderia se acoplar e irradiar. Assim, as correntes de modo comum perdem seus caminhos alternativos e os loops de terra tornam-se menos prováveis, fortalecendo a imunidade contra EMI.

Essa solução por si só ajuda também a própria rede CAN, que passa a se tornar mais segura, com menos ruídos e com blindagem efetiva. A partir disso, é possível aumentar a frequência do barramento para enviar e receber uma maior quantidade de informações sem perder a confiabilidade dos dados.

Outra solução, pensando no cabeamento, é a de separar fisicamente os condutores de potência dos condutores de comunicação, ou seja, utilizar um cabeamento independente para alimentação e outro exclusivamente para o par CAN_H e CAN_L. Dissociar fisicamente o cabo de potência do cabo de dados isola o barramento CAN do “ruído de comutação” proveniente dos conversores e de outros componentes de alta corrente. Em consequência, o sinal CAN torna-se muito mais limpo, reduzindo a taxa de erros de transmissão e retransmissão de quadros. Isso não apenas eleva a confiabilidade do sistema, mas libera margem para operar o CAN em velocidades maiores sem receio de perda de pacotes, o que pode ser especialmente vantajoso para cenários reais, onde necessita-se de rápidas tomadas de decisão em tempo real.

Além disso, essa separação também facilita a implementação de blindagem e filtragem específicas em cada cabo, pois a topologia de cada linha (alimentação vs. dados) pode receber tratamentos de EMC adequados às suas características de corrente, tensão e frequência de operação. Por exemplo, o cabo de potência pode contar com *chokes* de modo comum ou filtros LC que suportem correntes mais altas, enquanto o cabo de dados pode ter pares trançados blindados e terminação adequada para manter a integridade dos sinais de comunicação. Em conjunto, esses fatores levam a um sistema mais modular, em que falhas ou ruídos

em um subsistema de potência têm menor probabilidade de comprometer a rede de comunicação como um todo.

Embora essa solução ofereça o benefício de eliminar o acoplamento direto entre as linhas de alta corrente e as trilhas de sinal, também implica um redesenho mais profundo do sistema, pois demandaria substituir todo o sistema, visto que hoje todas as placas funcionam com a rede CAN utilizando um conector que passa junto a alimentação e os dados. Em contrapartida, o isolamento entre potência e sinais críticos traria um ganho significativo em confiabilidade e robustez contra ruídos, especialmente em uma embarcação que já apresenta diversas fontes de EMI (como motores e diversos conversores).

Por fim, o último setor comentado no tópico 4 foi o do motor, o qual, em alguns momentos, acabava interferindo no funcionamento do rádio da equipe, por meio do MAM e do MCS, junto com o banco de capacitores. Para mitigar os problemas de interferência causados no rádio, existem diversas abordagens que podem ser aplicadas em conjunto. Em primeiro lugar, é recomendado inserir filtros e *chokes* nos cabos de alimentação desses módulos, como indutores de modo comum, capazes de atenuar as frequências altas que tendem a irradiar pelos cabos de potência. Esse cuidado ajuda a evitar que o ruído de comutação retorne pelo caminho do terra ou contamine outros subsistemas.

Outra solução, não tão prática, é implementar blindagem local no MCS, MAM e banco de capacitores, para conter parte do campo eletromagnético gerado.

Por fim, mesmo rádios certificados não são imunes a interferências e a correntes de modo comum que se espalham pela embarcação. Portanto, vale a pena também inserir *ferrite beads* ou filtros LC na linha de alimentação do rádio e, se possível, isolar galvanicamente o estágio de energia do rádio em relação ao sistema principal. Dessa forma, estabelece-se um “caminho de ruído” mais controlado, reduzindo a probabilidade de interferência mesmo quando a embarcação está em pleno funcionamento.

4.3.6 Plano de ação para a equipe

Após definir as estratégias de mitigação de EMI, elabora-se um plano de ação que prioriza atividades de menor custo e complexidade, deixando para o final aquelas que exigem maior retrabalho. Pretende-se com essa abordagem melhorar a

eficiência do barco sem grandes modificações no sistema de comunicação. Além disso, recomenda-se realizar testes rigorosos após cada etapa para confirmar os ganhos em confiabilidade e eficiência, conforme detalhado no Quadro 1, que organiza as etapas, ações, objetivos, complexidade e tempo estimado para as mudanças.

Quadro 1 – Plano de ação proposto

Etapas	Ação prioritária	Descrição/Objetivo	Complexidade	Tempo esperado
1	Ajustes de <i>firmware</i> no MCC	- Implementar diferença de frequência de 1 kHz entre cada MCC	Baixa	1 semana
2	Inserir <i>Chokes</i> , Ferrites e Filtros Simples	- Adicionar <i>chokes</i> de modo comum/ferrites na entrada/saída das placas - Verificar necessidade de filtros LC adicionais	Baixa/média	2 a 3 semanas
3	Revisar Blindagem de Cabos	- Padronizar cabos CAN e alimentação com <i>shield</i> contínuo	Baixa/média	2 semanas
4	Snubbers	- Analisar <i>overshoot/ringing</i> em cada placa com osciloscópio - Dimensionar <i>snubbers</i> ou TVS para desacelerar comutação	Média	3 semanas
5	Isolamentos e blindagens	- Adicionar blindagem local em placas que propagam maior EMI	Média	3 semanas
6	Isolamento e Blindagem do Motor	- Inserir filtros LC ou <i>chokes</i> na alimentação do motor - Adicionar blindagem local e melhorar aterramento do motor/cabos	Média/alta	2 semanas
7	Reavaliar barramento CAN	- Com ruído reduzido, aumentar gradualmente frequência da CAN - Verificar se há erros de transmissão em testes de estresse	Média	2 semanas
8	Revisar ou Refazer <i>Layouts</i>	- Minimizar loops de alta frequência - Separar sinais de potência dos sinais de dados no barramento CAN - Revisar planos de referência	Alta	8 a 12 semanas

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.3.6.1 Primeira etapa

Fazendo uma explicação do plano de ação, deverá ser iniciado pelo primeiro item: os ajustes de firmware. Essa primeira etapa visa resolver o problema das harmônicas geradas pelos nove conversores, atribuindo frequências de chaveamento diferentes para cada placa. Por exemplo, a primeira placa poderia operar a 133 kHz, a segunda a 134 kHz e assim por diante, até atingir 141 kHz. Embora a alteração do firmware seja relativamente simples e possa ser concluída em poucas horas, a verificação dos resultados requer diversos testes, o que justifica um prazo estimado de 1 semana para essa fase. Se, ao final desse período, os resultados ainda não forem satisfatórios, podem-se avaliar outras abordagens que evitem a sobreposição de picos de corrente e melhorem a robustez geral do sistema.

4.3.6.2 Segunda etapa

A segunda etapa envolve utilizar *chokes* e filtros para tentar suprimir os sinais espúrios nas placas de maior interesse. Ainda é uma tarefa de baixa complexidade, mas é necessário o conhecimento de onde posicionar cada *choke* e cada ferrite para obter os melhores resultados. Aqui, os testes podem ser exaustivamente feitos, variando as posições e a quantidade de filtros, principalmente dos *ferrite beads*, já que é de fácil utilização. Nota-se que os *ferrite beads* podem somente ser utilizados em cabos, portanto, pode-se testá-los entre módulos, no cabo de comunicação e alimentação. Após chegar em uma configuração satisfatória, é possível passar para a próxima etapa, mas todos os testes com os ferrites demandam tempo, portanto essa etapa tem um tempo esperado de 2 a 3 semanas. O *ferrite bead* mais fácil de utilizar é o da figura 4, apresentado anteriormente neste trabalho. Porém, vale destacar que um *ferrite bead* comercial geralmente tem menor capacidade de corrente, então para módulos que consomem mais corrente o ideal seria utilizar um *choke* de modo comum.

Chokes de modo comum podem ser soldados nas placas, porém irá demandar um trabalho maior a ser feito, e considerar que, se for soldado por fora do projeto original da placa, irá criar a possibilidade de gerar EMI nos fios soldados, que acabam por agir como antenas.

4.3.6.3 Terceira etapa

Após encontrar uma configuração interessante para os filtros, inicia-se a substituição do cabeamento da embarcação, utilizando cabos blindados, preferencialmente os que possuem blindagem entre pares. É uma tarefa que demanda mais disponibilidade de ter os cabos do que conhecimento específico na área, visto que o processo de troca de cabos é bem simples. O único processo nessa etapa que demanda tempo é crimpar os cabos, visto que tem que ser seguido o padrão já utilizado pela equipe. Por ser uma tarefa de baixa complexidade, mas extensa, é esperado um tempo de 2 semanas para completar essa etapa.

Ao utilizar cabos blindados, é garantida a continuidade da blindagem e sinais espúrios são impedidos de saírem por caminhos indesejados.

4.3.6.4 Quarta etapa

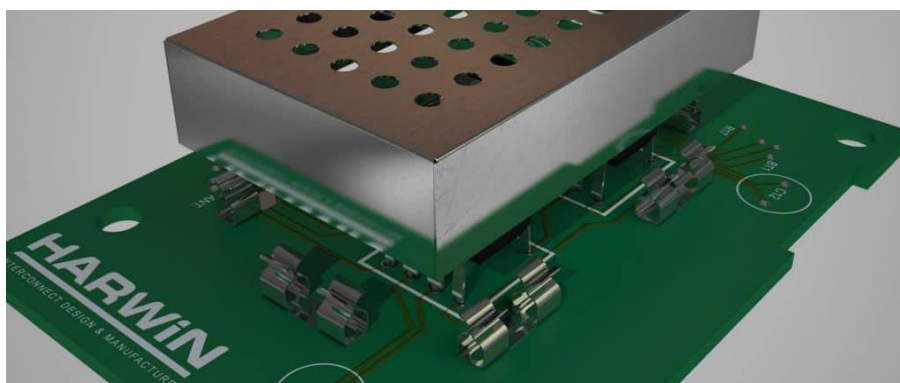
A etapa 4 é simplesmente de fazer a análise dos *snubbers* que já são utilizados no sistema, mas que podem receber um ajuste mais preciso para serem mais eficientes no sistema. Por muitas vezes, por conta da falta de verba, filtros como os *snubbers* acabam sendo superdimensionados, justamente por faltar componentes dos valores exatos que deveriam ser utilizados, restando a equipe a utilizar valores próximos aos simulados, porém com uma leve diferença, ocasionando na perda de eficiência do sistema. Por conta disso, a etapa 4 engloba fazer uma revisão dos *snubbers* que já são utilizados para tentar obter mais eficiência no sistema, ou também de utilizar Supressor de Tensão Transiente (*Transient Voltage Suppressor – TVS*). Portanto, é uma etapa que demanda muita análise em bancada, e de média complexidade, considerando que um aluno na metade do curso seria capaz de fazer essa análise sob a correta supervisão. O tempo esperado para analisar todas as placas e definir novos valores é de 3 semanas, por conta da quantidade de placas que são utilizadas no barco.

4.3.6.5 Quinta e sexta etapas

Com grande parte do sistema já otimizado, não resta muita coisa. As etapas 5 e 6 abordam a implementação de soluções de blindagem, que podem

aprimorar a compatibilidade eletromagnética e, conseqüentemente, a performance do barco. Contudo, o acréscimo de peso associado a essas medidas pode comprometer o desempenho global da embarcação. Portanto, são etapas mais arriscadas e que devem ser muito bem planejadas, visto que demanda a aplicação de blindagens locais, entre placas e na adição de filtros próximos ao motor. São tarefas de complexidade maior, visto que é necessário conhecimento no sistema da embarcação, e, por exigir grande planejamento, é esperado que as duas sejam completas em totais 5 semanas. A figura 33 mostra um exemplo de uma placa genérica com uma blindagem local, que pode servir de inspiração para algumas placas mais ruidosas na embarcação.

Figura 33 – Blindagem local aplicada a uma PCI



Fonte: RayPCB (2025).

4.3.6.6 Sétima etapa

Por fim, a última coisa que tem para se fazer sem mexer a fundo no design das placas é a de testar o barramento da rede CAN. Após todas essas etapas, a qualidade do sinal deve ter melhorado, e a aplicação de filtros e blindagens, juntamente com a variação de frequência nas placas que mais geram ruído, deve possibilitar a rede CAN a funcionar de forma mais confiável e mais rápida. É uma tarefa de complexidade média, onde diversos testes devem ser feitos, e o ideal é ir aumentando gradualmente a frequência de funcionamento do barramento, caso tenha sido diminuído, ou simplesmente feita a verificação de erros para notar se são perdidos dados. Após encontrar a máxima frequência de transmissão, deve-se ter um barco com um tempo de resposta melhor. Por ser uma

etapa que tem que mexer em todas as placas do barramento, é esperado no mínimo 2 semanas para completar essa etapa.

4.3.6.7 *Etapa final*

Com tudo tendo sido feito com as placas originais, só o que resta é refazer as placas. Essa etapa é a última pois envolve um orçamento muito alto e muitos membros da equipe fazendo o design das placas, com foco em utilizar de boas práticas de EMC. O foco aqui deve ser o de sempre seguir boas práticas de design relacionados a EMC, pois problemas de interferência são um problema sistêmico, em que geralmente não há solução, e sim mitigação do problema. Além disso, devem ser utilizados filtros na entrada e saída das placas, juntamente com *ferrite beads* em SMD ou *snubbers*. É uma tarefa de complexidade alta, pois envolve um conhecimento avançado em conceitos de compatibilidade eletromagnética, além de ser uma etapa muito extensa, já que envolve design, simulação, compra de placa e componentes. Portanto, somente para essa etapa, o tempo esperado é de no mínimo 2 meses somente focando nela.

Vale lembrar que este trabalho não se concentra em adequar o sistema às normas de compatibilidade, mas em aprimorar a *performance* e aumentar a confiabilidade global. Ao seguir as etapas propostas, espera-se um ganho de *performance* e uma elevação na eficiência energética, pois as medidas adotadas, como a redução das perdas associadas à emissão de interferências eletromagnéticas e a otimização dos conversores chaveados, permitem que uma maior fração da energia disponível seja efetivamente utilizada nos subsistemas críticos. Dessa forma, a energia economizada pode ser redirecionada para outras partes da embarcação, promovendo melhorias adicionais.

Por fim, a equipe deve sempre lembrar de princípios de compatibilidade ao projetar novas placas com novas funcionalidades, já que é muito mais fácil aumentar a confiabilidade do projeto em seu início do que deixar os componentes suscetíveis a ruídos e ter a necessidade de consertar os problemas depois.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o aumento da complexidade dos sistemas embarcados, garantir a compatibilidade eletromagnética tornou-se essencial para assegurar a confiabilidade e o desempenho dos equipamentos. Este trabalho teve como objetivo geral analisar a embarcação Guarapuvu II do ponto de vista da EMC e propor estratégias para mitigar as EMI, enquanto os objetivos específicos, que foram desenvolver uma fundamentação teórica consistente, analisar os esquemáticos e *layouts* das placas, identificar as fontes de interferência e avaliar os pontos críticos, foram detalhadamente abordados.

A fundamentação teórica estabeleceu uma base sólida, permitindo a compreensão dos mecanismos de geração e propagação das interferências em sistemas de alta frequência. A análise dos esquemáticos e *layouts* identificou inadequações, como a disposição dos componentes e a configuração dos caminhos de retorno, que potencializam a emissão de EMI. A identificação das fontes de interferência apontou os conversores chaveados como os principais responsáveis pelos problemas observados, e a avaliação dos pontos críticos evidenciou a necessidade de intervenções específicas para melhorar o desempenho do sistema.

Dessa forma, os objetivos gerais e específicos foram alcançados, uma vez que o estudo diagnosticou as deficiências existentes e propôs um conjunto de estratégias viáveis para a mitigação das EMI, contribuindo para uma análise abrangente e fundamentada dos desafios enfrentados. No entanto, ressalta-se que as propostas apresentadas carecem de validação prática, o que limita a aplicação imediata das soluções. Essa lacuna abre caminho para futuras pesquisas que possam realizar testes experimentais, aplicar simulações detalhadas e explorar diferentes configurações de PCI para aprimorar a eficácia das medidas propostas.

Em síntese, o trabalho reforça a importância de adotar boas práticas de EMC desde as fases iniciais de projeto, estabelecendo uma base para o desenvolvimento de sistemas eletrônicos mais robustos e eficientes em embarcações movidas a energia solar.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

O principal ponto sugerido para futuras investigações é a implementação prática das soluções apresentadas neste trabalho. A aplicação experimental das medidas de mitigação, incluindo a otimização dos *layouts* de PCIs, a utilização aprimorada de filtros e blindagens, e a redução das áreas de loop, permitirá validar, em campo, a eficácia das estratégias propostas. Essa etapa experimental é fundamental para transformar os resultados teóricos em soluções aplicáveis e ajustáveis conforme as condições reais de operação.

Adicionalmente, recomenda-se a realização de estudos comparativos que analisem diferentes topologias de conversores chaveados, verificando o impacto das soluções implementadas em cenários variados. Esse tipo de investigação possibilitará identificar as configurações mais eficazes para reduzir a EMI, contribuindo para o desenvolvimento de diretrizes técnicas e normas específicas voltadas para embarcações movidas a energia solar.

Outra linha de pesquisa promissora é a implementação de sistemas que permitam o monitoramento contínuo do comportamento dos circuitos elétricos, facilitando a detecção precoce de problemas relacionados à EMI. Por exemplo, sensores instalados nas embarcações poderiam coletar informações sobre níveis anormais de ruído ou variações inesperadas nos sinais elétricos, permitindo que o sistema identifique rapidamente falhas ou interferências e ative mecanismos de correção automática ou alertas para manutenção preventiva. Essa abordagem dinâmica favorece uma gestão mais eficiente e proativa dos sistemas embarcados.

Além disso, recomenda-se também investigar detalhadamente os efeitos da EMI sobre os sensores utilizados no monitoramento da embarcação. Sensores de corrente, tensão, temperatura e velocidade são componentes particularmente sensíveis às interferências eletromagnéticas, já que operam com sinais de baixa amplitude, podendo resultar em leituras imprecisas ou falhas operacionais caso não sejam corretamente protegidos. Portanto, estudos futuros podem focar na avaliação experimental dos métodos mais eficazes de filtragem, blindagem e disposição física dos sensores, visando garantir leituras confiáveis e estáveis, essenciais para o desempenho e segurança das embarcações solares.

Por fim, outra linha relevante consiste em explorar o impacto das medidas de mitigação de EMI sobre a eficiência energética dos circuitos embarcados.

Considerando que embarcações movidas a energia solar dependem diretamente de um gerenciamento rigoroso da energia disponível, torna-se crucial avaliar se as intervenções propostas podem afetar o consumo e a dissipação de energia dos circuitos. Estudos experimentais e simulações integradas que correlacionem os parâmetros de compatibilidade eletromagnética com a eficiência energética poderão fornecer diretrizes valiosas para aprimorar o desempenho das embarcações.

REFERÊNCIAS

ALTIVUM. **How do ferrite beads work and how do you choose the right one?** Disponível em: <https://resources.altium.com/p/how-do-ferrite-beads-work-and-how-do-you-choose-right-one>. Acesso em: 25 fev. 2025.

ALTIVUM. **How to select a common mode choke for power electronics.** Disponível em: <https://resources.altium.com/pt/p/how-to-select-a-common-mode-choke-for-power-electronics>. Acesso em: 25 fev. 2025.

ANATEL. **Resolução nº 442, de 2006.** Disponível em: https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documentoVersionado.asp?numeroPublicacao=123542&documentoPath=biblioteca/resolucao/2006/res_442_2006.pdf&Pub=&URL=/Portal/verificaDocumentos/documento.asp. Acesso em: 03 mar. 2025.

BOGATIN, E. **Signal and Power Integrity.** 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2018. ISBN 9780134513416,013451341X.

BOSCH, R. **CAN Specification.** Disponível em: <http://esd.cs.ucr.edu/webres/can20.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2025.

EDCABOS. **Cabo de rede CAT7 SFTP 22AWG LSZH R-AMP-M.** Disponível em: https://www.edcabos.com/cabos/cabo-de-rede/cat7/cabo-de-rede-cat7-sftp-22awg-lszh-r-amp-m/?variant_id=565. Acesso em: 11 mar. 2025.

HART, D. **Power electronics.** New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-338067-4.

KEMET. **What is an RF Capacitor?** Disponível em: <https://www.kemet.com/en/us/technical-resources/what-is-an-rf-capacitor.html>. Acesso em: 11 mar. 2025.

MONTROSE, M. **EMC and the Printed Circuit Board: Design, Theory, and Layout Made Simple.** New York: IEEE Press, 1999. ISBN 9780780347038.

MORRISON, R. **Grounding and Shielding: Circuits and Interference.** 5. ed. [S.l.]: IEEE Press, 2007. ISBN 978-0-470-09772-4.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. **Discrete-Time Signal Processing.** 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009. ISBN 978-0-13-198842-2.

PAUL, C. R. **Introduction to electromagnetic compatibility.** 2. ed. [S.l.]: Wiley Interscience, 2006. ISBN 9780471755005,0471755001.

RAYPCB. **RF shielding.** Disponível em: <https://www.raypcb.com/rf-shielding/>. Acesso em: 25 fev. 2025.

SANCHES, Durval. **Interferência Eletromagnética – EMI: tópicos especiais em eletrônica I.** Clube de Autores, 2010.

SCHLICHTING, L. C. M. **Contribuição ao estudo da compatibilidade eletromagnética aplicada aos conversores estáticos**. Tese (Doutorado) — Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85109/194127.pdf?sequence=> . Acesso em: 03 mar 2025.

STMICROELECTRONICS. **STM32L4P5CET ADC freezes at high noise environment**. Disponível em: <https://community.st.com/t5/stm32-mcus-products/stm32l4p5cet-adc-freezes-at-high-noise-environment/td-p/215500>. Acesso em: 03 mar 2025.

STMICROELECTRONICS. **STM32L4Rxxx and STM32L4Sxxx device errata - Errata sheet**. Rev 10. março 2022. Disponível em: https://www.st.com/resource/en/errata_sheet/es0393-stm32l4rxxx-and-stm32l4sxxx-device-errata-stmicroelectronics.pdf. Acesso em: 03 mar 2025.

TEXAS INSTRUMENTS. **LMR16030 Datasheet**. [S.l.]: Texas Instruments, 2022. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmr16030.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2025.

TEXAS INSTRUMENTS. **Spread Spectrum Clocking Application Note SLVA F18**. [S.l.]: Texas Instruments, 2022. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/an/slvaf18/slvaf18.pdf?ts=1740982361164>. Acesso em: 03 mar. 2025.

VCELINK. **Pass-through vs. non pass-through RJ45 connector**. Disponível em: <https://www.vcelink.com/blogs/focus/pass-through-vs-non-pass-through-rj45-connector>. Acesso em: 25 fev. 2025.

ZENITESOLAR. **Repositório oficial da equipe** [repositório online]. Disponível em: <https://github.com/ZeniteSolar/>. Acesso em: 26 fev. 2025.

ZENITESOLAR. **boat19** [repositório online]. Disponível em: <https://github.com/ZeniteSolar/boat19/>. Acesso em: 26 fev. 2025.

ZENITESOLAR. **MCB19** [repositório online]. Disponível em: <https://github.com/ZeniteSolar/mcb19/>. Acesso em: 26 fev. 2025.

ZENITESOLAR. **MCC22** [repositório online]. Disponível em: <https://github.com/ZeniteSolar/MCC22>. Acesso em: 26 fev. 2025.

ZENITESOLAR. **MCS19** [repositório online]. Disponível em: <https://github.com/ZeniteSolar/MCS19>. Acesso em: 26 fev. 2025.

ZENITESOLAR. **MDE18** [repositório online]. Disponível em: <https://github.com/ZeniteSolar/MDE18>. Acesso em: 26 fev. 2025.

ZENITESOLAR. **MFP19** [repositório online]. Disponível em: <https://github.com/ZeniteSolar/Mfp19>. Acesso em: 26 fev. 2025.