



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Análise e simulação de um conversor BUCK para Produção de H2 *On-Board* em Veículos Pesados

Marcela Dauzaker da Silva

Campo Grande - MS

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Análise e simulação de um conversor BUCK para Produção de H2 *On-Board* em Veículos Pesados

Marcela Dauzaker da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul –
UFMS.

Orientador: Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito

Campo Grande - MS

2025

Análise e simulação de um conversor BUCK para Produção de H2V *On-Board* em Veículos Pesados

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito
Orientador

Prof. Dr. Bruno Sereni

Eng. Tatielle L. de Souza

Campo Grande - MS

2025

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Eu, Marcela Dauzaker da Silva, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG 2.2XX.X09 e CPF nº 069.XXX.601-XX, declaro que o "Trabalho de Conclusão de Curso" apresentado, com o título "Análise e simulação de um conversor BUCK para Produção de H2V On-Board em Veículos Pesados" é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 05 de dezembro de 2025.

Assinatura

Marcela Dauzaker da Silva

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, cuja fé foi o meu maior alicerce. Foi a sua luz que me guiou nos momentos de incerteza e a sua força que me sustentou nos dias mais desafiadores, permitindo que eu chegasse até aqui.

Dedico este trabalho, de coração, às duas mulheres que são a base da minha vida: minha mãe Vânia e minha irmã Valéria.

À minha mãe, meu alicerce. Não existem palavras que possam retribuir toda a sua dedicação. A senhora foi pai e mãe, lutou incansavelmente por nós e sempre, sempre, me apoiou em cada decisão, acreditando em mim mesmo quando eu duvidava. Obrigado por ser meu porto seguro e meu maior exemplo de resiliência e amor.

À minha irmã, minha companheira de todas as horas. Esta conquista não seria possível sem os seus cuidados, seu amparo constante e sua ajuda incondicional. Você tornou a caminhada mais leve e me mostrou, todos os dias, o verdadeiro significado do amor fraterno. Levo cada gesto de carinho para a vida, essa conquista também é sua.

Agradeço também ao meu pai e amigo, Igor, por ter entrado na minha vida e por toda a ajuda e carinho que tem me oferecido. Meu agradecimento se estende a todos os meus familiares que, de alguma forma, sempre torceram por mim e demonstraram genuíno interesse pela minha trajetória acadêmica.

Aos meus amigos da faculdade em especial ao Marco e à Laryssa, obrigado por todos os momentos de risadas, desabafos e pela ajuda mútua, são memórias que guardarei com carinho para o resto da vida. E a todos os outros amigos que cruzaram o meu caminho e nele permaneceram, meu muito obrigado.

Um agradecimento muito especial ao meu orientador, Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito. Muito obrigado por ter me aceitado e me acolhido em um tempo tão curto, com tanta generosidade. A sua orientação, paciência e apoio foram fundamentais para a conclusão deste trabalho, e levarei essa contribuição comigo para sempre.

Por fim, registro meus sinceros agradecimentos a todos os demais professores que, ao longo desta jornada, contribuíram significativamente para a minha formação profissional e pessoal.

A todos, o meu eterno e profundo obrigado.

RESUMO

O setor de transportes é um dos principais contribuintes para as emissões globais de gases de efeito estufa, demandando soluções inovadoras para a descarbonização. Este trabalho analisa e valida a arquitetura de um sistema de produção de hidrogênio *on-board* em ônibus, utilizando a energia elétrica gerada pelo alternador veicular. O objetivo geral foi desenvolver e validar, por meio de simulações no software MATLAB/Simulink, o sistema de eletrônica de potência para alimentação de um eletrolisador a partir da energia do alternador. A metodologia envolveu a seleção do eletrolisador de Membrana de Troca de Prótons (PEM), justificada por sua rápida resposta dinâmica e adequação ao ambiente veicular. O projeto de Eletrônica de Potência concentrou-se no conversor Buck, escolhido por sua eficiência e capacidade de redução de tensão. A modelagem dinâmica do conversor, utilizando a técnica de Média no Espaço de Estados, permitiu a obtenção das funções de transferência, essenciais para o projeto do controlador Proporcional-Integral (PI). O controle foi sintonizado via malha de corrente, visando a regulação precisa da produção de H₂. Os resultados da simulação em MATLAB/Simulink confirmaram a robustez do sistema, demonstrando a capacidade do conversor Buck controlado por PI de manter a corrente de saída estável e com baixo *ripple*, validando a viabilidade técnica da integração. Conclui-se que a Eletrônica de Potência é o elemento chave para viabilizar a produção local de hidrogênio verde, oferecendo uma solução prática e eficiente para a transição energética no transporte pesado.

Palavras-Chave: Hidrogênio Verde; Eletrônica de Potência; Conversor Buck; Eletrolisador PEM.

ABSTRACT

The transportation sector is one of the main contributors to global greenhouse gas emissions, demanding innovative solutions for decarbonization. This work analyzes and validates the architecture of an on-board hydrogen production system for buses, using the electrical energy generated by the vehicle's alternator. The main objective was to develop and validate, through simulations in MATLAB/Simulink software, the power electronics system for supplying an electrolyzer from the alternator's energy. The methodology involved the selection of a Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyzer, justified by its fast dynamic response and suitability for the vehicular environment. The Power Electronics design focused on the Buck converter, chosen for its efficiency and voltage reduction capability. The dynamic modeling of the converter, using the State-Space Averaging technique, enabled the derivation of the transfer functions, essential for the Proportional-Integral (PI) controller design. The control was tuned via the current loop, aiming for precise H₂ production regulation. The MATLAB/Simulink simulation results confirmed the system's robustness, demonstrating the ability of the PI-controlled Buck converter to maintain a stable output current with low ripple, thus validating the technical feasibility of the integration. It is concluded that Power Electronics is the key element to enable on-site green hydrogen production, offering a practical and efficient solution for the energy transition in heavy-duty transport.

Keywords: Green Hydrogen; Power Electronics; Buck Converter; PEM Electrolyzer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa conceitual: hidrogênio verde como vetor central na descarbonização de transporte pesado mediante eletrólise renovável.....	16
Figura 2 - Curva Característica V-I do Eletrolisador PEM	23
Figura 3 - Esquema das reações eletroquímicas do eletrolisador alcalino.	24
Figura 4 - Esquema das reações eletroquímicas no eletrolisador PEM.	25
Figura 5 - Esquema das reações eletroquímicas no eletrolisador SOEC.	26
Figura 6 - Fundamentos de Operação dos Conversores CC-CC.	28
Figura 7 - Circuito do conversor cc-cc Buck.	30
Figura 8 - Diagrama referente a arquitetura geral do sistema.....	34
Figura 9 - Representação do eletrolisador PEM	37
Figura 10 - Primeira etapa de operação do conversor Buck.....	38
Figura 11 - Segunda etapa de operação do conversor Buck.....	39
Figura 12 - Diagrama de blocos para o controle da tensão – malha em cascata.	42
Figura 13 - Diagrama de blocos para controle corrente.	42
Figura 14 - Compensador para G_{vd}	43
Figura 15 - Diagrama de bode da malha de controle	44
Figura 16 - Compensador para $G_{id}(s)$	45
Figura 17 - Diagrama de bode da malha de controle	46
Figura 18 - Diagrama de blocos do controlador de tensão.....	46
Figura 19 - Diagrama de blocos do controlador de corrente.	47
Figura 20 - Tensão do alternador veicular.	48
Figura 21 - Resposta da corrente de saída do conversor buck em malha fechada, operando em modo corrente	48
Figura 22 - Detalhe da Corrente de Saída (Ripple) em Regime Permanente, operando em modo corrente.	49
Figura 23 - Resposta da tensão no capacitor de saída, operando em modo corrente	50
Figura 24 - Resposta da corrente de saída do conversor buck em malha fechada, operando em modo cascata (tensão-corrente)	51
Figura 25 - Resposta da corrente de saída (Ripple) permanente com controle cascata (tensão-corrente).....	52
Figura 26 - Resposta da tensão no capacitor de saída, operando em modo cascata (tensão-corrente).....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações dos tipos de hidrogênios.....	19
Tabela 2 - Principais Conversores CC - CC.....	29
Tabela 3 - Dados do projeto.....	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	13
1.2. OBJETIVOS	14
1.2.1. Objetivo Geral.....	14
1.2.2. Objetivos Específicos	15
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. HIDROGÊNIO VERDE E CONTEXTO ENERGÉTICO.....	16
2.1.1. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO.....	18
2.1.2. TIPOS DE HIDROGÊNIO	18
2.1.3. APLICAÇÃO DO H ₂ EM VEÍCULOS.....	21
2.2. ELETROLISADORES	22
2.2.1. TIPOS DE ELETROLISADORES	23
2.3. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA APLICADA AO SISTEMA	27
2.3.1. TIPOS DE CONVERSORES CC/CC APLICADOS À ELETROLISE.....	28
2.4. FONTE DE ENERGIA: ALTERNADOR VEICULAR.....	30
2.4.1. FUNCIONAMENTO DO ALTERNADOR.....	31
2.4.2. LIMITAÇÕES PRÁTICAS	32
2.4.3. INTEGRAÇÃO ALTERNADOR E CONVERSOR.....	32
2.5. INTEGRAÇÃO DO SISTEMA NO ÔNIBUS	33
2.5.1. ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA	34
2.5.2. REQUISITOS MECÂNICOS E TÉRMICOS	35
2.5.3. SEGURANÇA EM SISTEMAS DE H ₂	35
3. PROJETO E MODELAGEM	36
3.1. MODELO CC	37
3.2. MODELAGEM (GVD e GID).....	39
3.3. CONTROLADOR PI	41
4. RESULTADOS	43
5. CONCLUSÃO e CONSIDERAÇÕES FINAIS	54

6. REFERÊNCIAS 56

1. INTRODUÇÃO

A atividade humana está alterando a composição da atmosfera em um ritmo acelerado, desencadeando um dos maiores desafios contemporâneos: as mudanças climáticas. Este fenômeno compõe uma parte crucial das questões que colocam a humanidade diante das chamadas fronteiras planetárias (*planetary boundaries*), um termo proposto por Rockström et al. (2009) para compreender a problemática ambiental em uma perspectiva sistêmica, focada nas interações entre os sistemas naturais e os antrópicos.

Nesse contexto, esforços internacionais levaram a acordos como o Protocolo de Kyoto (1997) e, posteriormente, ao mais abrangente, o Acordo de Paris (2015) (SCOVAZZI, 2021). Este último, com ampla adesão global, estabeleceu a meta de limitar o aquecimento abaixo de 2°C, buscando esforços para 1,5°C. A arquitetura do Acordo de Paris baseia-se nas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), onde cada país define suas metas de redução de emissões. O acordo exige que essas NDCs sejam renovadas e mais ambiciosas a cada cinco anos, criando um ciclo de aprimoramento contínuo (BRASIL, 2024; CLIMATE WATCH, 2024).

A urgência dessas ações é reforçada pelos dados das fontes de emissão. Conforme o World Resources Institute (2024), o setor de energia representa quase três quartos das emissões globais, com o transporte sendo um de seus principais emissores. Nesse cenário, a NDC do Brasil para o Acordo de Paris traça um roteiro para um futuro de baixo carbono, visando uma transformação ecológica nacional.

Alinhar o setor de transportes às metas da NDC brasileira exige uma transição tecnológica acelerada. A materialização dessa transformação ecológica depende de inovações, especialmente no setor de transportes. A mobilidade elétrica é a resposta mais proeminente a esse desafio, prometendo reduzir drasticamente as emissões urbanas. No entanto, a implementação eficaz de veículos elétricos depende diretamente da robustez e da eficiência de seus sistemas embarcados, colocando a eletrônica de potência no centro da solução (VONBUN, 2015; AOYAGUE 2024).

Em aplicações envolvendo veículos elétricos e híbridos, a confiabilidade da eletrônica de potência exige componentes duráveis para ambientes severos, gerenciamento térmico para altas densidades de potência e conformidade estrita com normas automotivas. Em paralelo,

embora a indústria automobilística tenha elevado a segurança e a conveniência, o crescimento da frota intensificou a emissão de poluentes urbanos (SO_2 , NO_x , CO e PM), pressionando a agenda ambiental. Nesse contexto, a mobilidade elétrica surge com ganhos claros — menor CO_2 no uso e alta eficiência — e cresce no Brasil (ABVE, 2024), porém ainda enfrenta entraves práticos de autonomia, tempo de recarga e dependência de infraestrutura, especialmente em longas distâncias.

É precisamente aqui que o hidrogênio (H_2) se apresenta como uma alternativa complementar à eletrificação por baterias. A solução proposta consiste em um sistema que produz H_2 localmente, a bordo do veículo. Partindo do alternador — que gera tensão nominal de 24V CC — implementa-se um conversor CC-CC BUCK, que atua como o habilitador central da arquitetura. Este conversor, idealmente utilizando semicondutores de banda larga (SiC/GaN), reduz e regula a tensão do barramento elétrico veicular para níveis adequados do processo eletrolítico. Sua função principal é realizar um controle preciso de corrente para a célula eletrolítica, minimizando ripple, perdas de comutação e estresse eletrotérmico. (KALAIVANI et al., 2024)

A tensão devidamente condicionada alimenta então uma célula eletrolítica compacta, onde ocorre a eletrólise da água, produzindo hidrogênio e oxigênio. Ao direcionar o H_2 produzido para o sistema de admissão do motor, ele se mistura ao combustível convencional, melhorando a eficiência da combustão e criando um buffer energético com reabastecimento quase contínuo (BARRETIRI; HAUS, 2013). Todo o processo é gerenciado por uma unidade de controle eletrônico que monitora e ajusta os parâmetros operacionais.

Dessa forma, a arquitetura do alternador, conversor e eletrolisador não apenas contorna as limitações críticas de autonomia e recarga dos veículos híbridos, mas também demonstra o papel central da eletrônica de potência. Esta abordagem posiciona o hidrogênio *on-board* como um vetor energético pragmático, viabilizando a descarbonização e ampliando o envelope operacional da frota eletrificada no cenário brasileiro.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Conforme os dados mais recentes do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o Brasil emitiu 2,30 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente (Gt CO₂e) em 2023. Neste período, o setor de energia foi responsável por 420 milhões de toneladas, representando 18,3% das emissões totais do país. Uma análise detalhada do setor de energia demonstra que o subsetor de transportes permanece como seu maior contribuidor, sendo responsável por cerca de 48% das emissões energéticas (SEEG, 2024; OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024). Diante deste cenário, a descarbonização do setor de transportes surge como uma frente crucial de ação. Esta necessidade é oficialmente reconhecida na mais recente Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil (2024), que estabelece a estratégia para o setor: "além da eletrificação e dos biocombustíveis, espera-se que o hidrogênio seja usado como uma alternativa no setor de transportes até 2035, requerendo investimento em infraestrutura específica" (BRASIL, 2024, p. 16). Portanto, o desenvolvimento de sistemas de eletrônica de potência para a produção de hidrogênio (H₂) em veículos apresenta-se não apenas como uma solução técnica viável, mas como uma contribuição direta e estratégica para o cumprimento dos compromissos climáticos nacionais, que preveem uma redução de 59% a 67% nas emissões líquidas de GEE até 2035.

Atendendo a essa diretriz estratégica, o hidrogênio se apresenta como uma das alternativas mais promissoras para substituição dos combustíveis fósseis. Como destacado por Padilha (2006), ele é abundante na natureza e possui elevado poder calorífico. Este elemento, que pode ser obtido através da eletrólise da água, vem ganhando destaque no cenário da mobilidade sustentável através do desenvolvimento de sistemas de produção local em veículos. A implementação de eletrolisadores embarcados representa uma solução inovadora para os desafios ambientais causados pelos motores a combustão interna, conforme apontado por Smutzer (2006). Estes sistemas utilizam a energia do alternador ou do sistema elétrico do veículo para decompor a água em hidrogênio e oxigênio, criando a mistura gasosa conhecida como HHO (Yilmaz, 2010).

Do ponto de vista técnico, a produção local de hidrogênio oferece três vantagens principais:

1. Independência de infraestrutura de abastecimento, resolvendo um dos principais obstáculos à adoção do hidrogênio como combustível (Meyer, 1996);
2. Maior autonomia veicular, superando as limitações de armazenamento físico;
3. Sustentabilidade ambiental, utilizando apenas água como matéria-prima e produzindo apenas água como subproduto (Simon, 2007).

Conforme Brown (2005) demonstra, o hidrogênio possui notáveis vantagens energéticas, com poder calorífico cerca de três vezes superior ao da gasolina. Além disso, o processo de combustão do hidrogênio não gera emissões poluentes, sendo ambientalmente limpo. O oxigênio produzido como coproduto da eletrólise ainda melhora a eficiência do processo de combustão, criando um ciclo otimizado de aproveitamento energético. A questão da segurança, crucial em aplicações veiculares, é adequadamente abordada por Meyer (1996), que destaca os riscos associados ao armazenamento do hidrogênio. A produção local e consumo imediato do gás eliminam a necessidade de armazenamento prolongado, reduzindo significativamente os riscos operacionais.

Atualmente, como evidenciado por diversas aplicações tecnológicas, o hidrogênio já comprovou seu potencial em diversos setores. A produção local em veículos representa um avanço significativo, combinando sistemas veiculares com os benefícios do hidrogênio verde. Esta abordagem inovadora oferece um caminho viável para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover uma mobilidade sustentável.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e validar, por meio de simulações no software MATLAB/Simulink, o sistema de eletrônica de potência para alimentação de um eletrolisador a partir da energia gerada por um alternador veicular, com o intuito de viabilizar a produção local de hidrogênio (H_2).

1.2.2. Objetivos Específicos

- I. Realizar uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias de produção de hidrogênio verde, com ênfase no funcionamento e nos requisitos elétricos de eletrolisadores do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*);
- II. Estudar as principais topologias de conversores CC-CC abaixadores de tensão (*step-down*), justificando a seleção do conversor Buck para a aplicação de interface entre o alternador veicular e o eletrolisador;
- III. Desenvolver o projeto e a modelagem matemática do conversor Buck, incluindo o dimensionamento de seus componentes passivos (indutor e capacitor) e a obtenção da sua função de transferência para operação em malha fechada;
- IV. Implementar o modelo do sistema completo na plataforma MATLAB/Simulink e validar o desempenho do conversor através da análise dos resultados da simulação.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Após a presente introdução, o trabalho está estruturado conforme detalhado a seguir:

O Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica, estabelecendo o contexto da transição energética, a relevância do hidrogênio verde e as características operacionais dos eletrolisadores, com foco na tecnologia PEM.

O Capítulo 3 é dedicado ao Projeto e Modelagem do Conversor Buck, onde são detalhados os princípios de funcionamento, a modelagem dinâmica através da técnica de pequenos sinais e o projeto do sistema de controle Proporcional-Integral (PI).

O Capítulo 4 expõe os Resultados e Discussão, apresentando as simulações realizadas no ambiente MATLAB/Simulink. Neste capítulo, são validados o desempenho do conversor Buck e a eficácia do controlador PI frente a variações de tensão de entrada, comprovando a viabilidade técnica do sistema proposto.

O Capítulo 5 encerra o trabalho com as Conclusões Gerais, onde são retomados os objetivos, sintetizados os principais resultados e contribuições do estudo.

Por fim, a Bibliografia lista todas as referências acadêmicas, normas técnicas e documentos consultados para o desenvolvimento deste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. HIDROGÊNIO VERDE E CONTEXTO ENERGÉTICO

A transição energética global e a descarbonização do setor de transportes emergiram como imperativos estratégicos no contexto das metas climáticas internacionais (IEA, 2024), estimulando a busca por vetores energéticos de baixa emissão de carbono. Conforme sintetizado na Figura 1, o hidrogênio articula múltiplas rotas de produção, tecnologias de conversão e aplicações setoriais, alinhando-se aos objetivos de descarbonização e transição energética.

Figura 1 - Mapa conceitual: hidrogênio verde como vetor central na descarbonização de transporte pesado mediante eletrólise renovável.



FONTE: Autor.

Neste cenário, o hidrogênio verde (H₂V), produzido mediante eletrólise alimentada por fontes de energia renovável, destaca-se como solução promissora para a mitigação de emissões em setores de difícil redução, particularmente no transporte pesado (IRENA, 2024). A matriz de produção de hidrogênio compreende três principais rotas tecnológicas: (i) hidrogênio cinza, oriundo da reforma a vapor do gás natural sem captura de carbono; (ii) hidrogênio azul, com

captura e armazenamento de dióxido de carbono integrados; e (iii) hidrogênio verde, produzido exclusivamente por via eletrolítica renovável (Zhang et al., 2025).

Embora o hidrogênio tenha sido utilizado por várias décadas predominantemente como matéria-prima industrial e produto químico especializado, pesquisadores e organizações do setor energético contemporaneamente vislumbram sua transformação em vetor energético estratégico. Essa transformação permite o armazenamento eficiente de energia oriunda de fontes renováveis para alimentar múltiplos setores, como transporte, geração de calor para processos industriais e geração de eletricidade descentralizada. Neste contexto, empresas de energia global têm intensificado investimentos bilionários na expansão de capacidade de geração renovável nas últimas décadas. A utilização global de H₂ atingiu 95 milhões de toneladas em 2022, sinalizando uma dinâmica crescente de demanda (IEA, 2023).

A produção de H₂ mediante eletrólise alimentada por fontes renováveis oferece vantagens substanciais, como a redução significativa de emissões de gases de efeito estufa (GEE), viabilidade técnica comprovada e competitividade econômica progressiva. Estudos prospectivos indicam que a produção em larga escala de hidrogênio verde poderia satisfazer até 24% das necessidades energéticas globais em 2050, com potencial substantivo de redução de emissões de carbono quando integrado a cadeias de valor renováveis (IEA, 2024; IRENA, 2024).

A eletrólise alimentada por energia eólica, em particular, apresenta potencial para consolidar-se como a primeira tecnologia amplamente competitiva na produção em larga escala de H₂V, com projeções indicando que pelo menos dois terços da produção global de H₂ seja originária de fontes verdes até 2050, constituindo um elemento central na transição para um sistema energético global com emissões líquidas zero (Clark II; Rifkin, 2006; D'Errico; Screnci; Bertocini, 2015; OECD, 2022; Benghanem et al., 2023; IEA, 2023).

Esta seção contextualiza o papel estratégico do hidrogênio no sistema energético contemporâneo, suas características técnicas comparativas e sua aplicabilidade específica em sistemas de transporte coletivo pesado, fundamentando a relevância desta investigação no panorama de transição energética.

2.1.1. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO

A intensificação dos impactos das mudanças climáticas tem impulsionado transformações nos sistemas energéticos globais, configurando o processo conhecido como transição energética. Esse movimento busca substituir gradualmente combustíveis fósseis por fontes renováveis e tecnologias de baixo carbono, alinhando-se às metas do Acordo de Paris e reforçando a necessidade de mitigação das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE).

Nesse cenário, o setor de transporte emerge como um dos principais desafios, dado seu elevado consumo de derivados de petróleo e sua relevante contribuição para as emissões globais de CO₂. O problema das emissões no setor de transporte torna-se evidente ao observar que mais de 90% da energia utilizada no transporte rodoviário provém de combustíveis fósseis. Esse padrão de consumo intensifica as emissões de CO₂ e dificulta o cumprimento das metas de neutralidade de carbono. As projeções indicam que, para se alcançar o cenário de 1,5 °C até 2050, as emissões globais do transporte teriam de ser reduzidas para menos de 6 Gt de CO₂ até 2030, representando um desafio substancial, sobretudo após o aumento de 8% nas emissões do setor em 2021, após a pandemia (Üçok, 2023).

Diante desse contexto, uma alternativa para a descarbonização do transporte é a produção de hidrogênio a bordo por meio de eletrólise da água, sincronizada com o funcionamento do motor de combustão interna. Trabalhos como o de Shalbayev et al. (2023) mostram que é possível decompor água em H₂ e O₂ em baixa corrente para atender à demanda do motor. Esse hidrogênio pode então ser injetado no sistema de combustão, contribuindo para a melhoria da eficiência térmica do motor, redução do consumo de combustível e de emissões de poluentes.

Com a crescente participação de fontes renováveis, espera-se que essa alternativa se torne cada vez mais competitiva, consolidando-se como componente essencial da transição energética e da sustentabilidade do setor de transporte.

2.1.2. TIPOS DE HIDROGÊNIO

O hidrogênio funciona como um transportador de energia secundário, similar à eletricidade, mas também atua como vetor energético capaz de converter, armazenar e liberar energia de forma controlada. Com a expansão da geração de eletricidade a partir de fontes

renováveis variáveis como energia eólica e fotovoltaica, o hidrogênio emerge como alternativa promissora para armazenamento sazonal de longo prazo do excedente elétrico (IEA, 2021).

Atualmente, as aplicações industriais dominam o consumo global de hidrogênio, particularmente em refino de petróleo, siderurgia, síntese de amônia e produção de metanol. Nos últimos anos, a demanda por hidrogênio apresenta crescimento contínuo. Em 2020, o consumo global atingiu aproximadamente 90 Mt (megatoneladas), sendo 70 Mt utilizadas como hidrogênio puro e 20 Mt combinadas com outros gases para produção de metanol e aço (IEA, 2021).

A produção de hidrogênio pode ser realizada a partir de diferentes fontes de energia primárias e por meio de processos variados. Dependendo do processo de produção e do tipo de energia utilizada, os custos e as emissões de carbono associadas ao hidrogênio podem ser muito diferentes. Esta é a razão pela qual as tecnologias de geração de hidrogênio são frequentemente classificadas com base em diferentes cores, por exemplo, cinza, azul e verde. Embora não exista uma nomenclatura universalmente padronizada, o H₂ pode ser identificado por esse código de cores, dependendo da fonte e dos processos utilizados em sua produção (Howarth; Jacobson, 2021; Munoz et al., 2022). A Tabela 1 apresenta suas principais características.

Tabela 1 - Especificações dos tipos de hidrogênios.

		FONTE	PROCESSO	IMPACTO
HIDROGÊNIO	CINZA	Obtido a partir de combustíveis fósseis (fontes não renováveis), como gás natural e carvão.	A produção libera dióxido de carbono (CO ₂) na atmosfera.	É considerado o principal contribuidor para o aquecimento global no setor.
	AZUL	Obtido a partir de combustíveis fósseis (fontes não renováveis), como gás natural e carvão.	A produção utiliza tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (CAC) para evitar a emissão de CO ₂ .	É visto como uma opção mais limpa que o Cinza, embora dependa de fontes não renováveis.
	VERDE	Produzido a partir de fontes renováveis, como energia eólica e solar fotovoltaica.	Obtido por eletrólise da água, sem emissão de CO ₂ .	É a alternativa mais sustentável e limpa disponível atualmente.

FONTE: Autor

Atualmente, a maior quantidade de hidrogênio produzido globalmente é o hidrogênio cinza. O hidrogênio cinza representa o hidrogênio obtido por reforma a vapor de gás natural ou por gaseificação de carvão, sem a incorporação de tecnologias de captura, utilização e

armazenamento de carbono (CCUS). Aproximadamente 40% do hidrogênio cinza é um subproduto derivado de outros processos químicos (WHITE & CASE, 2020).

Um processo de produção importante que resulta em hidrogênio cinza é a gaseificação do carvão, que em algumas literaturas é designada como hidrogênio marrom. Considerando que o carvão representa a fonte de energia fóssil com as maiores reservas mundiais, este também é um método de produção amplamente utilizado em escala global. Particularmente, a China produz uma quantidade significativa de hidrogênio através da gaseificação do carvão, impulsionada pelos elevados preços do gás natural e pelas abundantes reservas de carvão disponíveis no país (JI; WANG, 2021).

A principal desvantagem do hidrogênio cinza está associada às significativas emissões de dióxido de carbono (CO₂) geradas durante seu processo de produção, que são estimadas em aproximadamente 830 Mt CO₂ por ano (NEWBOROUGH; COOLEY, 2020).

O hidrogênio azul é o hidrogênio produzido pela reforma a vapor de metano com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), utilizando gás natural ou biomassa como matéria-prima. De acordo com Newborough e Cooley, uma instalação de produção de hidrogênio necessita apenas da instalação de um dispositivo de CCUS para ser classificada como hidrogênio azul. Apesar de resultar em emissões significativamente menores em comparação ao hidrogênio cinza, a tecnologia de hidrogênio azul ainda está distante de alcançar neutralidade climática em termos de emissões de gases de efeito estufa (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020).

Outro desafio que emerge é a identificação e seleção de locais adequados para armazenamento geológico do carbono capturado. Em muitos casos, o armazenamento de CO₂ no subsolo requer investimentos de capital consideráveis, elevando significativamente os custos operacionais e de infraestrutura. Consequentemente, os custos totais de produção de hidrogênio azul podem ser substancialmente maiores em comparação ao hidrogênio cinza. Adicionalmente, existe ainda uma ausência de marco regulatório claramente definido que especifique quem assume a responsabilidade legal e financeira pelo armazenamento permanente do CO₂ e pelos custos associados (NEWBOROUGH; COOLEY, 2020).

O hidrogênio verde (H₂V) é definido como o hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de Fontes Renováveis de Energia (RES). Este tipo de hidrogênio constitui um interesse estratégico especial na transição para sistemas de energia e transportes mais sustentáveis e descarbonizados. Na literatura científica e técnica, o hidrogênio verde é também designado através de expressões equivalentes como "hidrogênio

limpo," "hidrogênio renovável" ou "hidrogênio de baixo carbono" (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020).

Em termos de projeção de mercado, pode-se esperar que a demanda por hidrogênio seja significativamente maior em todas as aplicações no futuro. O aumento contínuo das emissões do setor de transportes, aliado à expansão acelerada de fontes renováveis de energia na geração elétrica nos últimos anos, tem renovado o interesse pelo uso de hidrogênio para mobilidade descarbonizada. Nesse contexto, o H₂V emerge como alternativa promissora para contribuir com a descarbonização do setor de transportes (AJANOVIC; SAYER; HAAS, 2022).

2.1.3. APLICAÇÃO DO H₂ EM VEÍCULOS

A substituição dos veículos tradicionais movidos por combustíveis fósseis por tecnologias mais eficientes e sustentáveis tem potencial para reduzir de maneira significativa os impactos atmosféricos associados ao transporte. Caso houvesse uma transição para veículos sem emissões, movidos por fontes renováveis, as concentrações de poluentes e CO₂ tenderiam a diminuir progressivamente, independentemente da dimensão da frota, contribuindo também para a redução dos gases de efeito estufa e, conseqüentemente, do aquecimento global. Nesse cenário, os combustíveis sustentáveis, como o H₂, mostram-se alternativas confiáveis e ambientalmente promissoras (Mackenzie, 1997).

O interesse pelo hidrogênio como combustível automotivo não é recente: desde o final da década de 1970, o H₂ tem sido objeto de pesquisas, sendo considerado uma forma de energia mais limpa do que os hidrocarbonetos convencionais, os quais liberam grandes quantidades de CO₂, óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis e enxofre, todos associados ao agravamento do efeito estufa e da poluição atmosférica. Além disso, o hidrogênio apresenta grande flexibilidade de armazenamento e uso, especialmente quando produzido por eletrólise, permitindo maior diversificação das fontes energéticas empregadas nos transportes e contribuindo para a redução de impactos ambientais quando comparado aos combustíveis fósseis. Entretanto, sua aplicação como combustível exige tecnologias adequadas de armazenamento e distribuição, além da definição de normas específicas para garantir segurança e eficiência (Drolet et al., 1996; Piatkowski; Michalska-Pozoga; Szczepanek, 2022).

Países como a Alemanha destacaram-se já em 2009 no desenvolvimento de pesquisas e projetos relacionados ao uso do hidrogênio em aplicações de transporte, antecipando tendências que hoje se consolidam globalmente. No caso dos sistemas de transporte coletivo, historicamente dependentes de combustíveis fósseis, o aumento da adoção de tecnologias

limpas, como células a combustível alimentadas por hidrogênio obtido por eletrólise de fontes renováveis, representa uma alternativa viável e ambientalmente atraente. Diversas nações têm promovido programas e políticas que visam estruturar uma infraestrutura adequada para a produção, armazenamento e abastecimento de hidrogênio, de modo a possibilitar a substituição progressiva dos motores de combustão interna por soluções baseadas em energia limpa (Rosenberg et al., 2010; Riveros-Godoy; Cavaliero; Silva, 2013).

O setor de transportes, responsável por mais de 60% do consumo mundial de petróleo e dependente em até 95% de combustíveis fósseis, constitui uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa. Assim, o hidrogênio obtido por eletrólise e produzido a partir de energia renovável surge como uma solução estratégica para a sustentabilidade ambiental, reduzindo a dependência dos combustíveis fósseis e promovendo uma alternativa viável aos veículos tradicionais (Bartolozzi; Rizzi; Frey, 2013). Apesar da sua importância socioeconômica, o setor de transportes contribui intensamente para a poluição atmosférica e para danos à saúde humana, sendo os veículos uma das principais fontes de emissões nocivas (Haddad; Aouachria; Haddad, 2020).

Nesse sentido, a transição para uma economia de baixo carbono tem ganhado destaque entre formuladores de políticas públicas, que buscam reduzir emissões e promover o uso de energia limpa. Segundo Forsberg e Krook-Riekkola (2021), veículos alimentados por eletricidade verde – incluindo veículos elétricos e veículos movidos a hidrogênio – apresentam viabilidade econômica e elevada eficiência na mitigação de emissões.

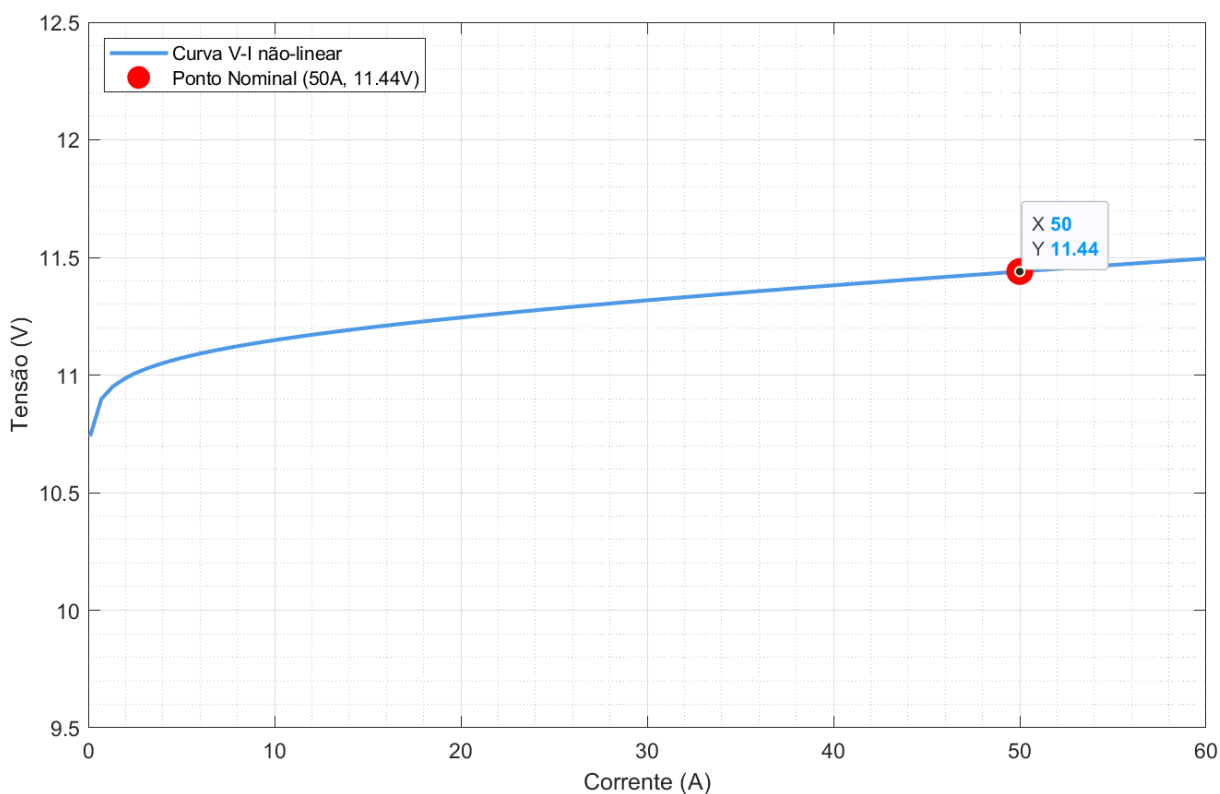
O hidrogênio é reconhecido como um transportador energético limpo, capaz de integrar sistemas elétricos renováveis com o setor de transportes e contribuir para a redução dos gases de efeito estufa (Zhou et al., 2022).

2.2.ELETROLISADORES

O eletrolisador é o componente central do processo de produção de H_2 por eletrólise, convertendo energia elétrica em ligações químicas através de reações eletroquímicas. Existem distintas tecnologias comercialmente disponíveis como PEM (*Proton Exchange Membrane*), alcalina e SOEC (*Solid Oxide Electrolysis Cell*). Cada uma com características específicas de densidade de corrente, eficiência e resposta dinâmica (Carmo et al., 2023). Do ponto de vista elétrico, os eletrolisadores apresentam curvas tensão-corrente (V–I) não-lineares que afetam o projeto da eletrônica de potência de alimentação, particularmente conversores e estratégias de

controle, como mostrado na Figura 2. Compreender essas características elétricas fundamentais é essencial para dimensionar adequadamente os sistemas de potência que alimentam o eletrolisador.

Figura 2 - Curva Característica V-I do Eletrolisador PEM



FONTE: Autor.

2.2.1. TIPOS DE ELETROLISADORES

Um eletrolisador é um dispositivo que utiliza energia elétrica para decompor moléculas de água em seus componentes elementares: hidrogênio e oxigênio. Esse processo, conhecido como eletrólise, ocorre por meio de dois eletrodos — um ânodo (polo positivo) e um cátodo (polo negativo) — imersos em uma solução eletrolítica, responsáveis pela condução da corrente elétrica através da água e pela promoção das reações de oxidação e redução (REPSOL, 2025).

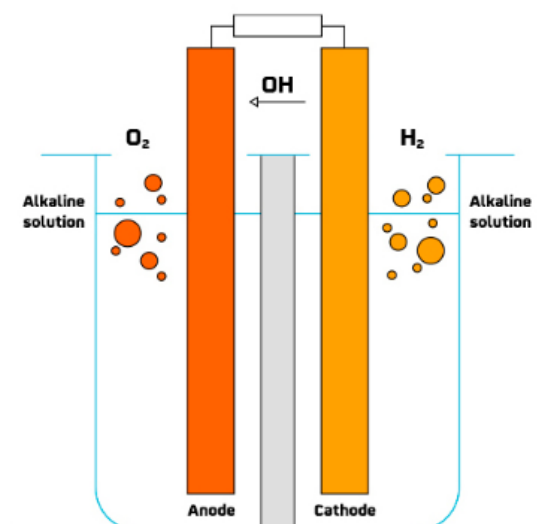
Além dos eletrodos, a presença de um eletrólito — que pode ser um ácido, base ou sal dissolvido — é essencial para aumentar a condutividade iônica do meio e facilitar a dissociação molecular. Os fundamentos desse processo remontam aos trabalhos pioneiros de Michael Faraday, que em 1820 estabeleceu os princípios quantitativos da eletrólise (REPSOL, 2025).

Quando a eletricidade utilizada no processo é proveniente de fontes renováveis, como solar ou eólica, o hidrogênio produzido é considerado totalmente sustentável, sendo classificado como "hidrogênio verde". Após a eletrólise, o hidrogênio gerado passa por etapas de purificação para remoção de umidade e outras impurezas, atendendo aos padrões de qualidade necessários para armazenamento em tanques ou distribuição via dutos (REPSOL, 2025).

I. Eletrolisadores Alcalinos

Os eletrolisadores alcalinos empregam solução de hidróxido de potássio (KOH) como eletrólito, destacando-se pelo baixo custo de fabricação e alta eficiência energética, o que justifica sua ampla adoção em aplicações industriais de grande escala (Repsol, 2025). Nesta configuração, utilizam-se tipicamente eletrodos de óxido de níquel no ânodo e óxido de cobalto no cátodo, com o eletrólito operando em concentrações de 30% a 40% de KOH. Esse arranjo permite a migração de íons hidroxila (OH^-) do cátodo para o ânodo através da solução eletrolítica, sustentando as reações de evolução de hidrogênio e oxigênio (Ahmed e Krumpelt, 2001; Akutsu et al., 2009; Artero et al., 2011). A Figura 3 ilustra esse mecanismo, detalhando o fluxo iônico, a separação dos gases e o papel do eletrólito como meio condutor.

Figura 3 - Esquema das reações eletroquímicas do eletrolisador alcalino.



FONTE: Adaptado de Repsol, 2025.

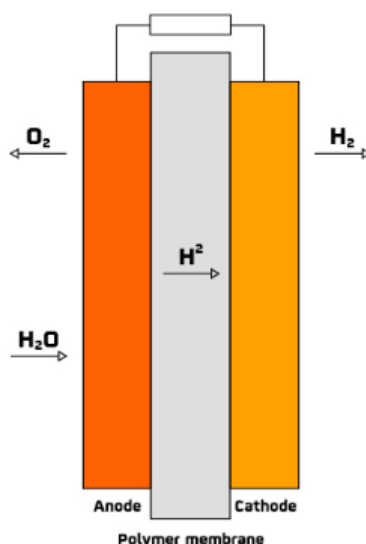
Embora represente uma tecnologia madura – com taxas de produção que atingem 760 Nm^3/h , a eletrólise alcalina enfrenta desafios significativos relacionados à degradação e

sensibilidade a impurezas. A formação de carbonato de potássio (K_2CO_3), por exemplo, reduz o desempenho do sistema ao consumir íons OH^- essenciais para a reação anódica (Ahmed e Krumpelt, 2001; Akutsu et al., 2009; Artero et al., 2011). Conforme demonstrado por Singh et al. (2010), a alteração na composição eletrolítica também diminui a condutividade iônica, elevando as perdas resistivas. Adicionalmente, a precipitação de K_2CO_3 nos poros da camada de difusão de gás (CDG) obstrui fisicamente a transferência iônica. Tais fatores exigem água de altíssima pureza e controle rigoroso do eletrólito, incrementando a complexidade operacional e os custos de manutenção, mesmo tratando-se de uma das tecnologias mais consolidadas para produção de hidrogênio em escala.

II. Eletrolisadores de membrana de troca de prótons (PEM)

Os eletrolisadores PEM utilizam uma membrana de troca de prótons como separador entre o ânodo e o cátodo. Quando submetida a uma corrente elétrica, a água é decomposta em hidrogênio e oxigênio, permitindo que os prótons (H^+) migrem seletivamente através da membrana polimérica para serem reduzidos a gás hidrogênio no cátodo (Repsol, 2025). Esse processo é representado na Figura 4, que ilustra a separação das fases gasosas e o transporte seletivo de prótons através da membrana polimérica.

Figura 4 - Esquema das reações eletroquímicas no eletrolisador PEM.



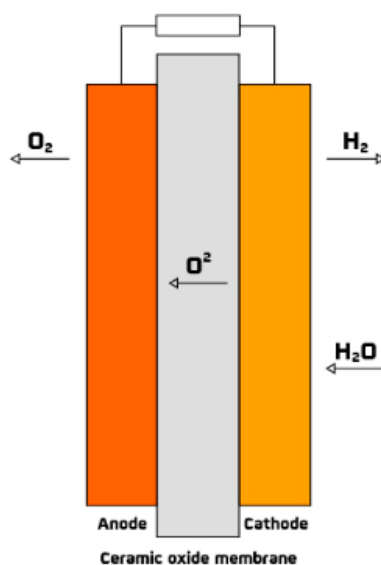
FONTE: Adaptado de Repsol, 2025.

Entre as vantagens da tecnologia PEM estão a alta eficiência energética, operação em baixas temperaturas (60° a 80°C) e compatibilidade do sistema. Contudo, a dependência de metais preciosos como catalisadores – como óxido de irídio (IrO_2) no ânodo e platina (Pt) no cátodo – representa um desafio econômico significativo (Butt et al., 2013; Ni et al., 2006). Adicionalmente, as placas bipolares de titânio, necessárias para resistir ao meio ácido, possuem menor condutividade elétrica e maior custo comparadas a alternativas como níquel ou cobre.

III. Eletrolisadores de óxido sólido (SOEC)

Os eletrolisadores SOEC operam em temperaturas elevadas, tipicamente entre 700 °C e 850 °C, utilizando um eletrólito cerâmico sólido, como a zircônia estabilizada com ítria (YSZ), que apresenta condutividade iônica seletiva a íons de oxigênio (O^{2-}) em altas temperaturas. Este método, também conhecido como eletrólise de vapor de alta temperatura (HTE), permite a decomposição da água em hidrogênio e oxigênio com elevada eficiência energética, aproveitando calor residual de outros processos industriais (REPSOL, 2025; IEA, 2022c). A Figura 5 ilustra o mecanismo de funcionamento do sistema.

Figura 5 - Esquema das reações eletroquímicas no eletrolisador SOEC.



FONTE: Adaptado de Repsol, 2025.

Entre as principais vantagens da tecnologia SOEC estão sua alta eficiência de conversão energética, tolerância a impurezas e versatilidade, podendo operar em modo reversível para produção combinada de hidrogênio, eletricidade e calor. No entanto, as altas temperaturas de operação impõem desafios significativos em termos de degradação acelerada de materiais, complexidade do sistema e custos associados ao uso de componentes cerâmicos especializados. Apesar de seu potencial promissor, a tecnologia SOEC ainda se encontra em fase de desenvolvimento, com escalabilidade limitada e menor maturidade tecnológica comparada a outras modalidades de eletrólise (IEA, 2022c).

Para a aplicação veicular proposta neste trabalho, o eletrolisador PEM foi selecionado como a tecnologia mais adequada para as simulações. A escolha é justificada pela sua alta densidade de corrente e, principalmente, pela sua rápida resposta dinâmica (Butt et al., 2013). Em um ambiente veicular, a fonte de energia (alternador) está sujeita a variações constantes de rotação e, conseqüentemente, de potência. A capacidade do PEM de operar em uma ampla faixa de potência e de responder rapidamente a essas flutuações o torna superior aos eletrolisadores alcalinos, que possuem uma resposta dinâmica mais lenta. Além disso, o PEM opera em temperaturas mais baixas, o que simplifica o gerenciamento térmico em um sistema embarcado.

Assim, o PEM é a tecnologia que melhor se alinha aos requisitos de um sistema de produção de hidrogênio sincronizado com o motor de combustão interna.

2.3. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA APLICADA AO SISTEMA

A alimentação elétrica do eletrolisador exige conversores CC-CC/CA-CC capazes de fornecer corrente controlada, baixo ripple e alta eficiência. Topologias como buck, boost e buck-boost, além de conversores isolados, quando necessário, são frequentemente analisadas para atender à faixa de tensão/corrente de *stacks* eletrolíticos. Além da topologia, aspectos de controle e proteção são críticos para garantir operação segura e eficiente em ambientes veiculares.

Um *stack* é o conjunto eletroquímico responsável pela produção de hidrogênio. Ele é formado pela conexão em série de diversas células individuais, cada uma composta por uma membrana (MEA) prensada entre placas bipolares. Cada célula apresenta tipicamente entre 1,63 a 2,23 V, e, por isso, múltiplas células são empilhadas para atingir a tensão operacional necessária. A arquitetura interna inclui elementos como membranas, eletrodos, canais de fluxo

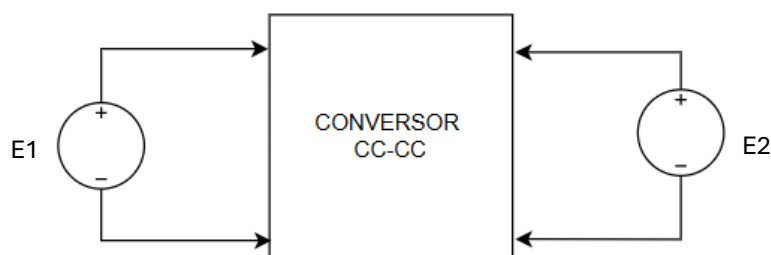
e placas bipolares, que precisam ser rigidamente comprimidos para manter estanqueidade, baixa resistência ôhmica e segurança operacional (TechnologyWealth, 2024; TREA Patents, 2020).

Além disso, o comportamento elétrico do *stack* é dinâmico, afetado por resistências internas variáveis, sobrepotenciais e capacitâncias eletroquímicas, o que exige conversores capazes de fornecer corrente estável com baixo ripple e resposta rápida. Estudos recentes discutem essas características e a interação do *stack* com a eletrônica de potência (ResearchGate – Power Electronics for Green Hydrogen, 2024).

2.3.1. TIPOS DE CONVERSORES CC/CC APLICADOS À ELETROLISE

O funcionamento dos conversores CC-CC pode ser representado de forma satisfatória pelo esquema apresentado na Figura 6. Este diagrama ilustra uma fonte de tensão contínua, E1, responsável por alimentar o bloco do conversor CC-CC. A função primária deste conversor é fornecer energia elétrica para a carga, representada pela fonte E2, através da comutação controlada de semicondutores de potência que atuam como interruptores. O controle do fluxo de potência entre as fontes é realizado por elementos passivos, tipicamente indutores e capacitores (Barbi; Martins, 2008).

Figura 6 - Fundamentos de Operação dos Conversores CC-CC.



FONTE: Autor, baseado em (Barbi e Martins, 2008).

Dessa forma, E1 atua como fonte de energia, enquanto E2 opera como carga, podendo ser representada, por exemplo, por um resistor, um motor de corrente contínua, um banco de baterias ou outro conversor *chopper*. Do ponto de vista da engenharia, um sistema é considerado ideal quando apresenta rendimento de 100%, ou seja, quando toda a potência de entrada é integralmente transferida para a saída. Na prática, contudo, a maneira mais eficiente de regular tensão contínua é por meio do uso de conversores chaveados, os quais alcançam eficiências

tipicamente entre 70% e 98%. Isso se deve ao fato de que as perdas associadas ao chaveamento são significativamente inferiores às dos reguladores lineares, que operam baseando-se na emulação de uma resistência (BARBI; MARTINS, 2008).

O *duty cycle* (D), que corresponde à fração do período total em que o interruptor principal permanece fechado, é a variável de controle responsável por manter a tensão de saída no valor desejado. Assim, tem-se:

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

Onde,

t_{on} é o tempo em que a chave permanece conduzindo;

T é o período de chaveamento.

Os conversores CC-CC podem operar em alguns modos de operação distintos. A determinação do modo de operação é estabelecida pelo comportamento da corrente no indutor. Quando a corrente se mantém diferente de zero durante todo o período de chaveamento, o conversor opera em modo de condução contínua (MCC), sendo este modo, o que apresenta as menores perdas por condução. A Tabela 2 apresenta a finalidade dos principais conversores, bem como seus respectivos ganhos estáticos em função da razão cíclica no MCC.

Tabela 2 - Principais Conversores CC - CC

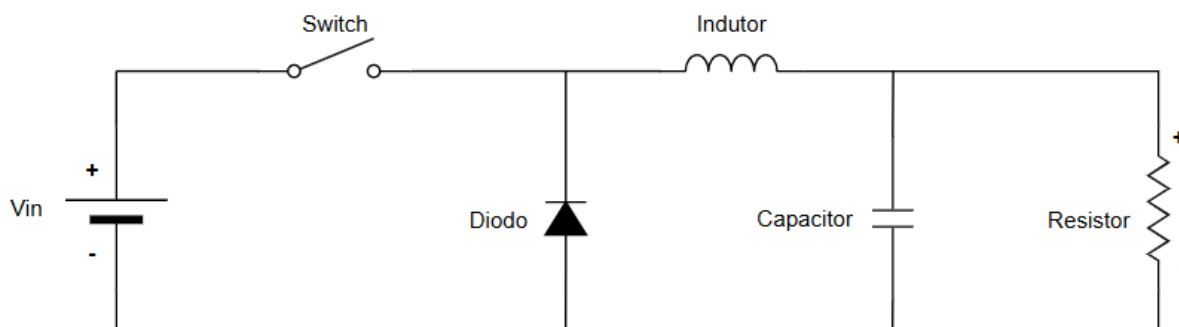
CONVERSOR	GANHO ESTÁTICO	APLICAÇÃO
Buck	D	Abaixador
Boost	$\frac{1}{1 - D}$	Elevador
Buck-Boost	$\frac{D}{1 - D}$	Abaixador para $D < 0.5$
		Elevador para $D > 0.5$

Dos conversores listados na Tabela 2, o conversor Buck foi selecionado como objeto de estudo para esse trabalho, servindo como planta para a implementação e análise das estratégias de controle que serão aplicadas no controle da corrente do eletrolisador.

O circuito do conversor CC-CC Buck é apresentado na Figura 7. Observa-se que sua estrutura é composta por um interruptor semicondutor (*Switch*), um diodo e um filtro LC de

saída, formado por um indutor e um capacitor. O circuito é alimentado por uma fonte de tensão de entrada (V_{in}) e conectado a uma carga resistiva na saída.

Figura 7 - Circuito do conversor cc-cc Buck.



FONTE: Autor.

Na Figura 7, o interruptor semicondutor (*Switch*) é simbolizado de forma genérica como uma chave controlada. Embora no diagrama essa chave seja frequentemente representada de forma simplificada, em sua implementação prática — a depender dos requisitos de potência, frequência de chaveamento e eficiência do projeto — são utilizados dispositivos semicondutores controláveis, como MOSFETs e IGBTs (Transistores Bipolares de Porta Isolada), que atuam como chave eletrônica.

O conversor Buck, também conhecido como *step-down*, é capaz de regular a tensão média de saída em um nível inferior ao de sua entrada. Esse princípio de funcionamento baseia-se, como já comentado, na comutação controlada de um interruptor semicondutor que conecta e desconecta periodicamente a fonte de alimentação da carga, resultando em um valor médio de tensão de saída inferior ao de entrada.

Devido à sua eficiência e capacidade de regulação, esse tipo de conversor é amplamente empregado em fontes de alimentação CC reguladas, como as utilizadas em computadores e em dispositivos portáteis que integram múltiplos subsistemas, cada um demandando níveis de tensão distintos em relação ao fornecido pela fonte principal (SKVARENINA, 2002).

2.4. FONTE DE ENERGIA: ALTERNADOR VEICULAR

O alternador veicular opera convertendo energia mecânica rotacional em energia elétrica em corrente alternada (CA), que é posteriormente retificada e regulada para carregar a bateria

e alimentar cargas auxiliares do sistema veicular. Sua tensão e corrente de saída são funções diretas da rotação do motor e da demanda de carga, apresentando variações dinâmicas significativas e *ripple* de tensão remanescente após o processo de retificação.

2.4.1. FUNCIONAMENTO DO ALTERNADOR

O alternador é um componente essencial do sistema elétrico veicular, responsável por gerar energia elétrica para recarregar a bateria e alimentar os sistemas elétricos enquanto o motor está em funcionamento (RDC, 2023). Sua operação baseia-se na conversão de energia mecânica em energia elétrica através do princípio da indução eletromagnética.

O processo de funcionamento inicia-se quando o veículo é acionado. Conforme explica Leite (2023), "quando o carro é acionado, o motor de combustão entra em regime de baixo giro (marcha lenta); o alternador, então, inicia o seu funcionamento e passa a converter a energia mecânica recebida pela polia em energia elétrica". Esta energia mecânica é transmitida via correia do motor à polia do alternador, colocando o rotor em movimento.

Conforme detalhado por Oliveira e Simeão (2018), o alternador está presente em todos os veículos automotores, atuando "na conversão de energia mecânica em elétrica e também na conversão da corrente alternada para corrente contínua". O rotor, composto por ímãs ou enrolamentos que criam um campo magnético, gira dentro do estator constituído por bobinas de fio. Este movimento rotativo induz uma corrente elétrica alternada no estator (SEG AUTOMOTIVE, 2023).

A corrente alternada gerada é subsequentemente retificada através de um conjunto de diodos, transformando-se em corrente contínua adequada para utilização pelo sistema elétrico do veículo e carregamento da bateria (LEITE, 2023). Enquanto o motor permanece em funcionamento, o alternador assume integralmente o fornecimento de energia para todos os dispositivos elétricos do veículo, incluindo faróis, rádio, sistemas de injeção eletrônica e demais acessórios (RDC, 2023).

O alternador desempenha, portanto, papel crucial na operação veicular, garantindo o contínuo fornecimento de energia elétrica e mantendo a bateria adequadamente carregada, assegurando assim o funcionamento confiável de todos os sistemas elétricos do veículo.

2.4.2. LIMITAÇÕES PRÁTICAS

O alternador automotivo, embora seja a fonte primária de energia elétrica no veículo, apresenta características operacionais que impõem limitações práticas ao projeto de um conversor de potência dedicado à eletrólise. A principal função do alternador é garantir que todas as cargas elétricas tenham suas demandas atendidas e que a bateria seja recarregada (Denton, 2004, p. 128). O sistema elétrico veicular opera em conjunto com a bateria, que atua como um estabilizador de tensão e um reservatório de energia, suprindo as cargas quando o alternador não consegue atender à demanda ou está desligado (Khan, 1996). A bateria, tipicamente de chumbo-ácido devido ao custo-benefício (Denton, 2004, p. 110), é um dispositivo que converte energia química em elétrica e vice-versa (Linden; Reddy, 2002).

O alternador é projetado para manter a tensão do sistema constante através de um regulador eletrônico de tensão (Bosch, 2015), operando em níveis padronizados de 14V ou 28V para carregar baterias de 12V ou 24V, respectivamente (Bosch, 2005). Além disso, o alternador é conectado ao motor por uma correia (VanDelder, 2013) e seu desempenho está intrinsecamente ligado à rotação do motor. O projeto do alternador deve permitir que ele funcione em velocidade *idle* (marcha lenta), mas sem exceder a velocidade máxima quando o motor estiver em seu regime máximo (Denton, 2004, p. 143).

A tentativa de aumentar a corrente em marcha lenta, por exemplo, reduzindo o diâmetro da polia, pode levar a um risco de dano ao alternador em altas rotações e aumentar as chances de escorregamento da correia (Bell, 2014, p. 213). Essas características implicam que o conversor Buck, que será alimentado pelo alternador, deve ser robusto o suficiente para lidar com a variação de tensão e corrente dentro dos limites operacionais do veículo, garantindo que a demanda do eletrolisador não comprometa a estabilidade do sistema elétrico principal.

2.4.3. INTEGRAÇÃO ALTERNADOR E CONVERSOR

A integração do sistema de produção de hidrogênio embarcado exige uma interface robusta entre o alternador veicular e o eletrolisador. O alternador, operando tipicamente em 28 V, apresenta uma saída que, embora retificada para CC, está sujeita a flutuações de tensão e ruídos inerentes ao ambiente automotivo e à variação de rotação do motor (Ikuta, 2021).

O conversor Buck (abaixador) é a topologia de Eletrônica de Potência mais elementar e eficiente para realizar a conversão de tensão necessária neste cenário. Sua escolha se justifica por três fatores principais:

- I. Requisito de Tensão: O eletrolisador PEM requer uma tensão de alimentação muito baixa (na ordem de 1,63 V por célula), exigindo uma redução significativa da tensão de 28 V do alternador. O Buck simples é ideal para essa função de *step-down*;
- II. Regulação e Filtragem: O conversor Buck atua como um estabilizador de tensão com filtro, isolando o eletrolisador das flutuações e transientes presentes na saída do alternador, garantindo uma alimentação estável e limpa (Ikuta, 2021);
- III. Simplicidade e Custo: Por ser a topologia CC-CC mais simples, o Buck oferece a vantagem de menor complexidade de controle e custo de implementação reduzido, fatores cruciais para uma aplicação veicular.

Portanto, o conversor Buck simples é a solução tecnicamente mais viável para a interface de potência, pois atende ao requisito de redução de tensão e garante a qualidade da energia fornecida ao eletrolisador.

2.5. INTEGRAÇÃO DO SISTEMA NO ÔNIBUS

A integração sistêmica do conjunto de produção de hidrogênio embarcado em veículos pesados, composto pelo alternador, conversor CC-CC, eletrolisador e sistema de armazenamento, demanda uma análise multidisciplinar que contemple simultaneamente diversos aspectos críticos. Primeiramente, a gestão de potência elétrica é fundamental, exigindo a otimização do fluxo de energia entre os subsistemas para garantir a eficiência operacional sob a dinâmica variável da rotação do motor. Em segundo lugar, o dimensionamento térmico dos componentes é importante, considerando a dissipação de calor e as limitações de temperatura operacional em um ambiente veicular. Por fim, a segurança operacional é imperativa, requerendo a implementação de medidas específicas para o hidrogênio, como sistemas de detecção de vazamento, ventilação forçada, segregação de componentes e a conformidade com as normas técnicas aplicáveis.

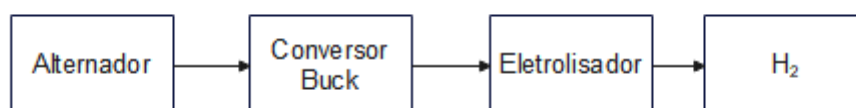
Esta abordagem integrada constitui o fundamento essencial para viabilizar a implementação prática e segura de sistemas de produção de hidrogênio verde *on board* em plataformas de transporte.

2.5.1. ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA

A implementação de um sistema embarcado de produção de hidrogênio verde em ônibus requer uma arquitetura integrada que garanta eficiência energética, segurança operacional e confiabilidade em condições dinâmicas. O núcleo do sistema de produção é composto por uma cadeia direta de conversão de energia, conforme ilustrado na Figura 8, que compreende: o alternador como fonte primária, o conversor buck como condicionador de potência, o eletrolisador como unidade de produção e o sistema de armazenamento para contenção do gás. O alternador atua como a fonte primária de energia elétrica, convertendo o excedente de energia mecânica do motor em eletricidade. Sua saída, tipicamente em 28V CC após retificação, alimenta o sistema, porém, como já discutido, está sujeita a flutuações inerentes à rotação do motor. O conversor buck constitui o estágio crítico de condicionamento de potência, responsável por regular e reduzir significativamente a tensão do barramento veicular para os níveis precisos e estáveis exigidos pelo eletrolisador PEM, que opera na faixa de 1,63 a 2,23V por célula. Sua função primordial é assegurar uma alimentação limpa e eficiente, isolando o eletrolisador das variações do alternador.

O eletrolisador PEM, por sua vez, utiliza a energia CC estabilizada fornecida pelo conversor para realizar a eletrólise da água desmineralizada, produzindo hidrogênio de alta pureza. Por fim, o hidrogênio produzido é condicionado e direcionado para um sistema de injeção na admissão do motor. Sua adição à mistura ar-combustível atua como catalisador, otimizando a eficiência da combustão do diesel ao promover uma queima mais completa e limpa. Como resultado direto, observa-se uma redução significativa tanto no consumo de combustível quanto na emissão de poluentes.

Figura 8 - Diagrama referente a arquitetura geral do sistema.



FONTE: Autor.

2.5.2. REQUISITOS MECÂNICOS E TÉRMICOS

A instalação de um sistema de eletrólise em um ambiente veicular, como um ônibus, impõe requisitos mecânicos e térmicos rigorosos. O eletrolisador PEM gera calor significativo durante a operação, devendo operar dentro de uma faixa ideal tipicamente entre 60°C e 80°C, cuja dissipação inadequada pode comprometer diretamente a eficiência e a vida útil do *stack* (Yang et al., 2023; Veza et al., 2025).

Para garantir a temperatura operacional ideal, o resfriamento do eletrolisador deve ser integrado ao sistema de arrefecimento do veículo. Paralelamente, a instalação física do conjunto — compreendendo conversor e eletrolisador — deve possuir robustez para suportar um ambiente severo, caracterizado por vibrações e choques mecânicos constantes. Essa resistência é fundamental para assegurar a integridade estrutural e a confiabilidade elétrica dos componentes ao longo de longos períodos de operação (Ahluwalia et al., 2012).

2.5.3. SEGURANÇA EM SISTEMAS DE H₂

A segurança é um aspecto não negociável no projeto de sistemas que manipulam hidrogênio em veículos. O H₂ é um gás altamente inflamável, o que exige a estrita conformidade com normas e a implementação de medidas de mitigação de risco. A norma SAE J2579 (2023) estabelece os requisitos de projeto, construção e manutenção para sistemas de combustível em veículos a hidrogênio, sendo a referência primária para o projeto. As considerações fundamentais para a segurança de sistemas de hidrogênio, conforme estabelecidas na ISO/TR 15916 (2018), também devem ser integralmente observadas.

Para mitigar o risco de acidentes, o projeto deve incluir obrigatoriamente sistemas de detecção de vazamentos de H₂ e um sistema de ventilação forçada eficaz, especialmente em compartimentos fechados, para evitar o acúmulo do gás e a formação de misturas explosivas, um requisito também enfatizado pelas mais recentes regulamentações de segurança veicular (Federal Register, 2025).

3. PROJETO E MODELAGEM

A modelagem do sistema foi implementada no ambiente MATLAB/Simulink, através do uso de modelos elétricos equivalentes para o *stack* do eletrolisador, para os componentes do conversor e o alternador permitindo a avaliação de métricas críticas, como a resposta das malhas de controle, o *ripple* de tensão e corrente. Esta seção apresentará os modelos típicos encontrados na literatura especializada, bem como os critérios de validação adotados para assegurar a fidelidade da simulação em relação ao comportamento físico do sistema embarcado. Os parâmetros e componentes elétricos selecionados para implementação do modelo são detalhados na Tabela 3, estabelecendo as bases numéricas que orientaram a configuração e execução das simulações.

Tabela 3 - Dados do projeto

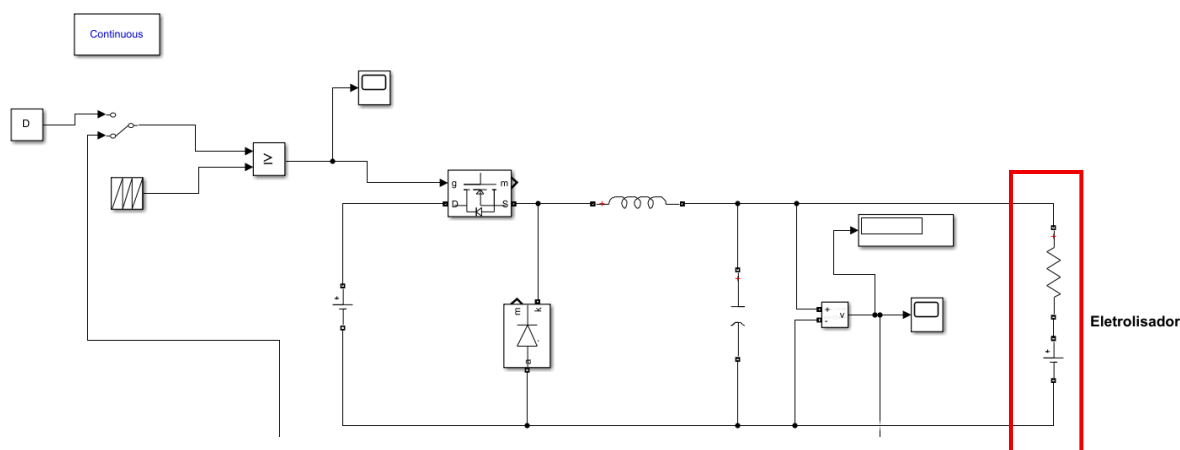
ELETROLISADOR PEM		
Temperatura	60 - 80	°C
Corrente nominal por célula	50	A
Tensão por célula	1,63	V
Tensão (8 células)	11,44	V
Potência por célula	81,5	W
Resistência interna (8 células)	0,004075	Ω
Densidade da Corrente	0,1	A/m ²
Área do eletrodo ativo (única célula)	490,9	cm ²
CONVERSOR BUCK		
Vin (Alternador)	28	V
Fs	20	kHz
Capacitor	3,6756	μ F
Indutor	4,5	mH

O sistema em desenvolvimento para produção de hidrogênio verde em ônibus compreende a integração entre um alternador veicular, um conversor Buck e um eletrolisador PEM, com parâmetros operacionais bem definidos que permitem uma análise técnica detalhada. O eletrolisador PEM, configurado com oito células em série, opera em condições típicas para esta tecnologia, com temperatura na faixa de 60 a 80°C e corrente nominal de 50 amperes por célula. A tensão de operação de 1,63 volts por célula, totalizando 11,44 volts para o conjunto, reflete valores consistentes com a literatura especializada, considerando as sobretensões características do processo eletroquímico em membranas poliméricas.

A representação do eletrolisador PEM como mostrado na Figura 9 através de uma resistência em série com uma fonte de tensão CC constitui um modelo elétrico equivalente amplamente utilizado em simulações de sistemas de potência. Esta abordagem oferece um

compromisso ideal entre precisão física e simplicidade computacional, sendo particularmente adequada para o projeto e análise de conversores estáticos como o conversor Buck em desenvolvimento.

Figura 9 - Representação do eletrolisador PEM



FONTE: Autor

A integração destes componentes forma um sistema coerente com o objetivo de produção veicular de hidrogênio verde. O próximo passo crítico consiste no desenvolvimento da estratégia de controle em malha fechada, que adotará uma arquitetura dupla para regulação tanto de tensão quanto de corrente, essencial para garantir que o conversor Buck forneça precisamente os parâmetros elétricos requeridos pelo eletrolisador.

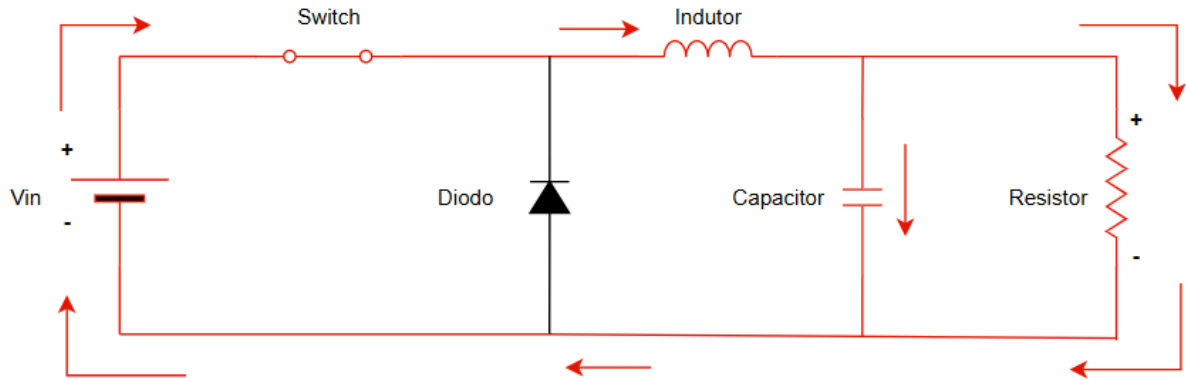
3.1. MODELO CC

Este capítulo dedica-se à derivação dos modelos matemáticos do conversor Buck, essenciais para a síntese do controlador que garantirá o fornecimento de corrente e tensão adequados ao eletrolisador.

O conversor Buck operando no modo de condução contínua (MCC) apresenta duas etapas de operação, mostradas nas Figuras 10 e 11. Estas etapas de operação são descritas e suas equações obtidas na sequência.

I. 1ª Etapa de operação - $(d \cdot T)$

Figura 10 - Primeira etapa de operação do conversor Buck.



FONTE: Autor

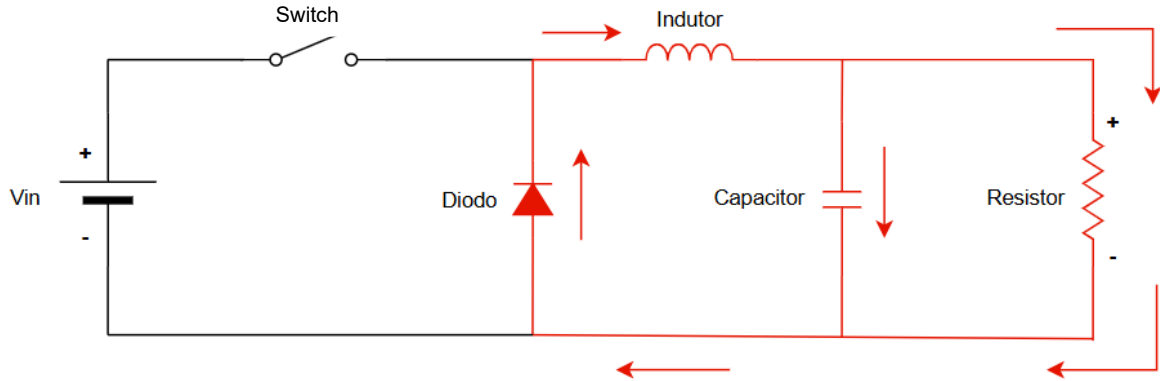
Na etapa inicial de operação do conversor Buck, quando a chave principal permanece em condução, o comportamento dinâmico do sistema pode ser descrito pela seguinte formulação, que representa totalmente sua resposta nesse intervalo de operação:

$$v_L = L \frac{d_{iL}}{dt} \rightarrow L \frac{d_{iL}}{dt} = d \cdot (v_{in} - v_o) \quad (1)$$

$$i_C = C \frac{d_{vc}}{dt} \rightarrow C \frac{d_{vc}}{dt} = d \cdot (i_L - i_R) \quad (2)$$

II. 2ª Etapa de operação - $(1 - d) \cdot T$

Figura 11 - Segunda etapa de operação do conversor Buck.



FONTE: Autor.

Na etapa subsequente de operação do conversor Buck, quando a chave principal é aberta, interrompendo o fluxo de energia da fonte, o comportamento dinâmico do sistema é regido por uma nova formulação que descreve integralmente sua resposta neste intervalo de operação:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow L \frac{di_L}{dt} = (1 - d) \cdot (-v_o) \quad (3)$$

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} \rightarrow C \frac{dv_C}{dt} = (1 - d) \cdot (i_L - i_R) \quad (4)$$

3.2. MODELAGEM (GVD e GID)

Para o projeto do sistema de controle, é essencial o desenvolvimento de um Modelo Dinâmico (CA) que descreva como o conversor responde a pequenas variações (perturbações) na razão cíclica (d) e na tensão de entrada (V_{in}). A técnica mais utilizada para obter este modelo linearizado é a modelagem por equações de estados, com posterior perturbação de pequenos sinais (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001). As funções de transferência apresentadas, $G_{vd}(s)$ (que relaciona a tensão de saída com a razão cíclica) e $G_{id}(s)$ (que relaciona a corrente no

indutor com a razão cíclica), são caracterizadas como as principais para o projeto de controle e estas são apresentadas na Equação (12) e (14).

Considerando as médias parciais da tensão no indutor e a corrente no capacitor, estas devem ser somadas, logo tem-se que:

Para tensão no indutor,

$$L \frac{d i_L}{dt} = d \cdot v_{in} - v_o \quad (5)$$

Para corrente no capacitor,

$$C \frac{d v_c}{dt} = (i_L - i_R) \quad (6)$$

Tendo o modelo médio do conversor, perturbam – se as variáveis:

$$L \frac{d}{dt} (I_L + \hat{i}_L) = (D + \hat{d})(V_{in} + \hat{v}_{in}) - (V_o + \hat{V}_o) \quad (7)$$

$$C \frac{d}{dt} (V_o + \hat{v}_o) = I_L + \hat{i}_L - \frac{V_o}{R} - \frac{\hat{v}_o}{R} \quad (8)$$

Aplicando a transformada de Laplace, supondo condições iniciais nulas em (7) e (8) obtém-se:

$$L \cdot s \cdot \hat{i}_L(s) = (D \cdot \hat{v}_{in}(s) + \hat{d}(s) \cdot V_{in}) - \hat{v}_{o(s)} \quad (9)$$

$$C \cdot s \cdot \hat{v}_{o(s)} = \hat{i}_L(s) - \frac{\hat{v}_{o(s)}}{R} \quad (10)$$

Substituindo (9) em (10),

$$s^2 \cdot L \cdot C \cdot \hat{v}_o(s) + \frac{s \cdot L}{R} \hat{v}_o(s) + \hat{v}_o(s) = (D \cdot \hat{v}_{in}(s) + \hat{d}(s) \cdot V_{in}) \quad (11)$$

Logo obtém-se a função de transferência entre as variações da razão cíclica e a tensão de saída do conversor:

$$G_{vd} = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_{in}}{LCs^2 + \frac{L \cdot s}{R} + 1} \quad (12)$$

A obtenção da planta de corrente do conversor Buck é realizada mediante a substituição de (10) em (9), logo temos a seguinte expressão:

$$Ls\hat{i}_L(s) = (D \cdot \hat{v}_{in}(s) + \hat{d}(s) \cdot V_{in}) - \left(\frac{R}{1 + sRC} \cdot \hat{i}_L(s) \right) \quad (13)$$

Sendo assim, obtém-se

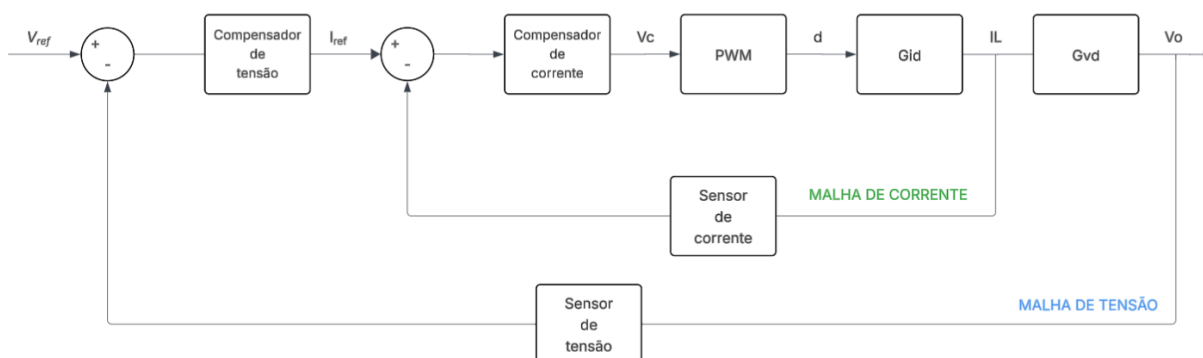
$$G_{id} = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{v_{in}(1 + sRC)}{s^2LRC + sRC + R} \quad (14)$$

3.3. CONTROLADOR PI

Para o controle da tensão de saída em conversores CC-CC, geralmente emprega-se a estratégia de controle em cascata (MARTINZ, 2007), conforme representado na Figura 12. No projeto dessa malha em cascata, requer-se uma malha interna com dinâmica rápida e maior estabilidade, que neste caso corresponde à malha de corrente. Por sua vez, a malha de tensão externa, com resposta mais lenta, deve interpretar o conjunto Malha Interna + Planta como um

processo único a ser controlado. Nesta configuração, o controlador de tensão fornece o valor de referência para a corrente do indutor. Adicionalmente, pode-se utilizar um saturador na saída do controlador de tensão para limitar a corrente máxima no sistema, assegurando a proteção do conversor sob condições de transitórios e sobrecargas.

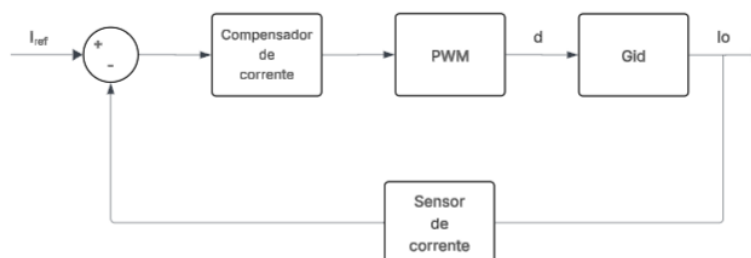
Figura 12 - Diagrama de blocos para o controle da tensão – malha em cascata.



FONTE: Autor

De modo a comprovar as características dinâmicas do sistema, serão implementadas e comparadas duas estratégias de controle: a malha cascata convencional (tensão-corrente) e o controle isolado em corrente, conforme mostra a Figura 13. Esta metodologia permite verificar experimentalmente a premissa de que a regulação exclusiva de corrente, por atuar diretamente na variável de estado de dinâmica mais rápida, oferece tempos de resposta superiores (menor tempo de estabilização, por exemplo) aos observados na configuração em cascata, onde a malha externa de tensão impõe restrições temporais adicionais.

Figura 13 - Diagrama de blocos para controle corrente.



FONTE: Autor

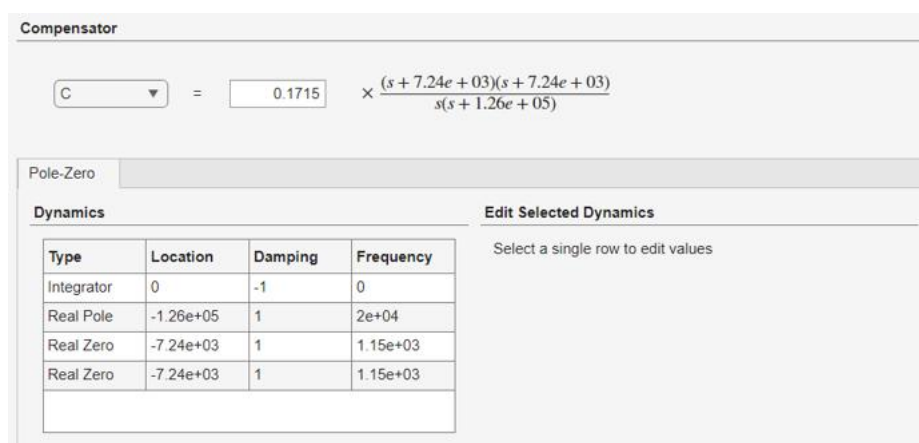
4. RESULTADOS

Para o desenvolvimento do sistema de controle em malha fechada do conversor Buck, partiu-se das funções de transferência que descrevem a dinâmica do sistema. Inicialmente, foi realizada a análise e projeto do controlador para a malha de tensão, utilizando a função de transferência $G_{vd}(s)$ que relaciona a tensão de saída com o ciclo de trabalho do conversor.

A ferramenta SISOTOOL (Single Input Single Output Tool) do MATLAB foi empregada para este propósito, por oferecer um ambiente interativo e robusto para análise e sintonia de controladores. Esta abordagem permitiu uma visualização completa do lugar geométrico das raízes, diagramas de Bode e resposta temporal, facilitando o projeto de um controlador que atenda aos requisitos de desempenho e estabilidade.

A função de transferência do compensador apresenta uma configuração que combina elementos integradores e de avanço de fase, organizados de forma estratégica. Foram inseridos dois zeros reais posicionados na frequência de 1,15 kHz, correspondente a $-7,24 \times 10^3$ rad/s, como mostrado na Figura 14. Estes zeros foram intencionalmente localizados na região de ressonância do conversor Buck, com o propósito principal de fornecer o necessário avanço de fase nessa faixa crítica, melhorando significativamente a margem de estabilidade. Finalmente, um polo real foi posicionado em $-1,26 \times 10^5$ rad/s, equivalente a 20 kHz, que corresponde exatamente à frequência de chaveamento do conversor. Um integrador também foi adicionado ao controlador, em virtude da necessidade de redução de erro em regime permanente.

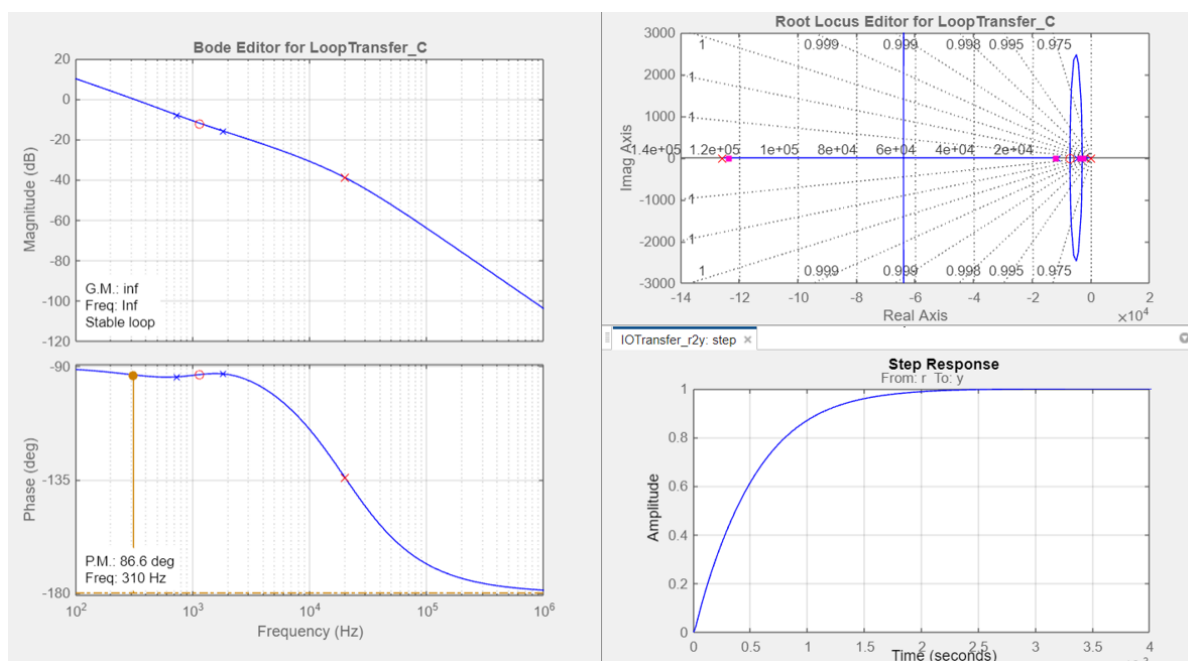
Figura 14 - Compensador para G_{vd} .



FONTE: Autor

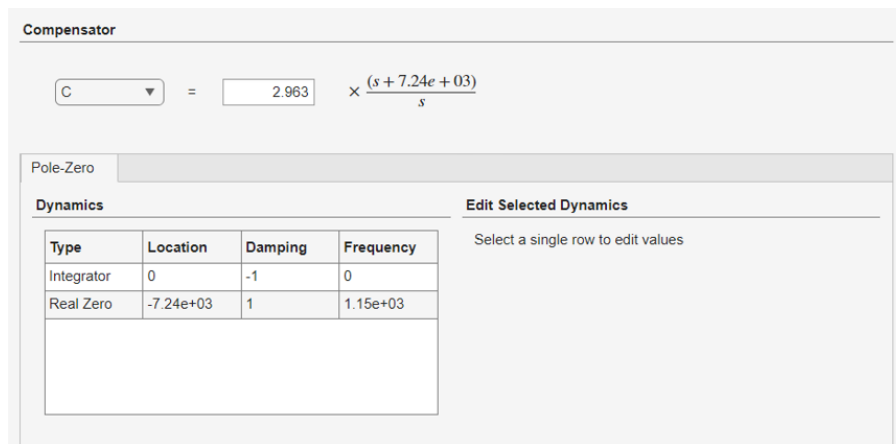
O diagrama de Bode do sistema compensado demonstra uma frequência de cruzamento de aproximadamente 310 Hz, com margem de fase de 86,6°, indicando elevada margem de estabilidade da malha. O lugar das raízes confirma que o sistema permanece estável para toda a faixa de ganhos analisada. A resposta ao degrau apresenta comportamento monotônico, sem *overshoot*, e tempo de acomodação inferior a 3 ms. Esses resultados validam que o compensador atende às exigências garantindo regulação rápida e livre de oscilações.

Figura 15 - Diagrama de bode da malha de controle



FONTE: Autor

Para a malha de corrente do conversor Buck, foi implementado um controlador PI através da função de transferência $G_{id}(s)$ utilizando o SISOTOOL mostrado na Figura 16. O compensador consiste em um polo na origem para erro estacionário nulo e um zero na frequência de ressonância do conversor para estabilidade.

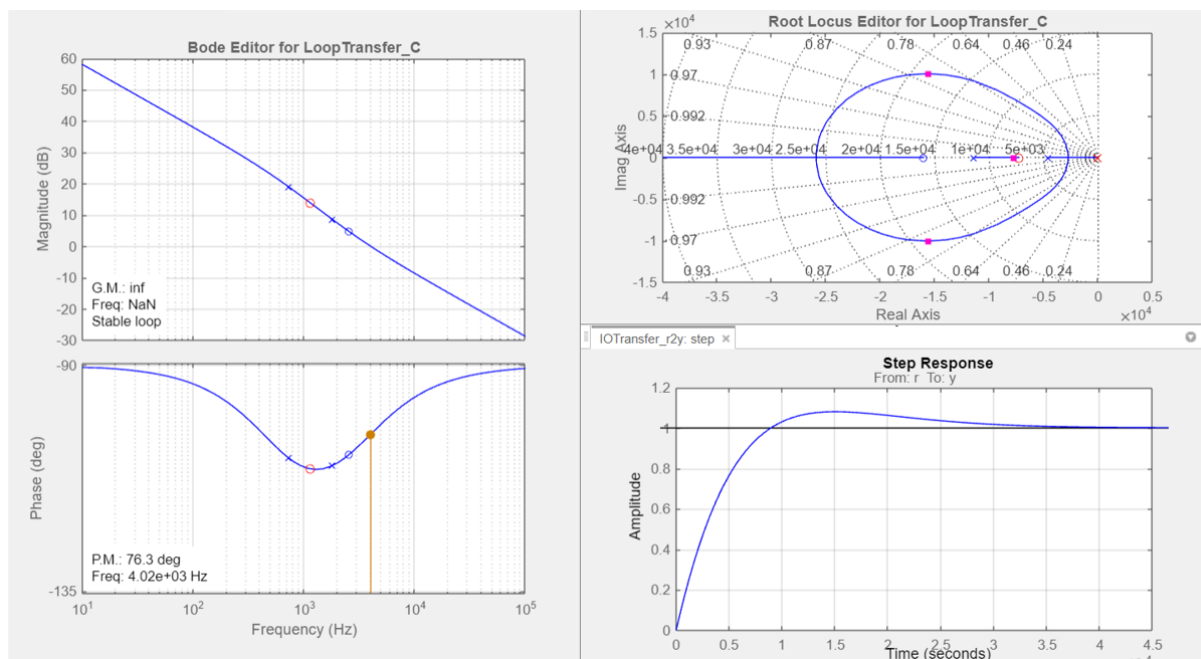
Figura 16 - Compensador para $G_{id}(s)$.

FONTE: Autor

O Diagrama de Bode permite avaliar a robustez do sistema, indicando uma Margem de Fase de $76,3^\circ$. A Frequência de Cruzamento foi determinada em 4,02 kHz. Este valor representa a largura de banda do sistema em malha fechada e, sendo alto, atesta a capacidade do conversor de responder rapidamente a distúrbios e comandos de referência.

O gráfico do Root Locus (Lugar das raízes) corrobora esta conclusão ao demonstrar que os polos do sistema em malha fechada permanecem estritamente localizados no semiplano esquerdo para toda a faixa de ganho, o que garante a estabilidade do sistema. Este gráfico é mostrado na Figura 17.

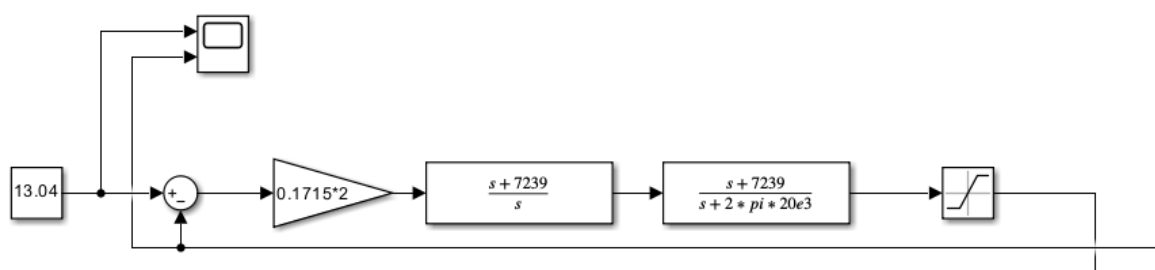
Figura 17 - Diagrama de bode da malha de controle



FONTE: Autor

O controlador de tensão para o conversor Buck foi projetado resultando em um compensador com ganho de 0,1715. Conforme mostrado na Figura 18, a estrutura incorpora dois zeros em 1,15 kHz para compensar a ressonância do conversor, um polo integrador para eliminar erro estacionário e um polo em 20 kHz para atenuação de ruído proveniente do chaveamento. O controlador regula a tensão de saída para 13,04 V, assegurando os 11,44 V necessários ao eletrolisador PEM considerando as quedas ôhmicas no sistema.

Figura 18 - Diagrama de blocos do controlador de tensão.

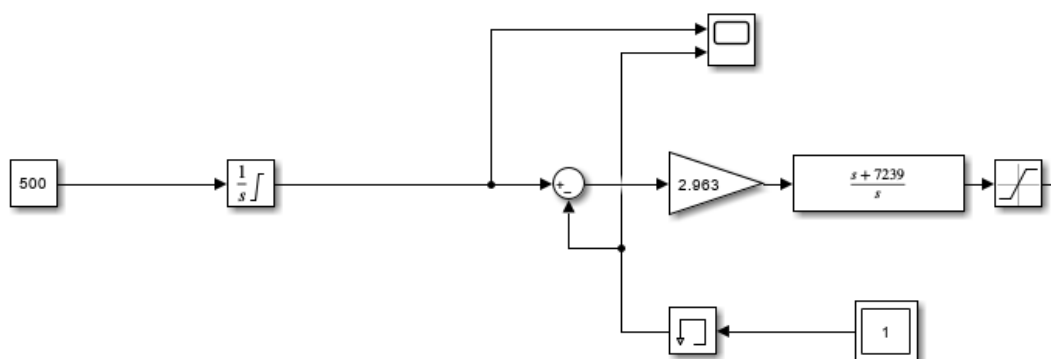


FONTE: Autor

O compensador para regulação de corrente obtido possui função de transferência, como mostrado no bloco da Figura 19 apresentando um ganho proporcional de 2,963 combinado com um zero localizado em 7240 rad/s (1,15 kHz) e um polo integrador na origem. No bloco

integrador, foi estabelecido um limite de saturação de 55 A (um pouco acima da corrente nominal), correspondente à corrente nominal do eletrolisador PEM, garantindo que o sistema opere precisamente no ponto máximo de eficiência do dispositivo eletroquímico.

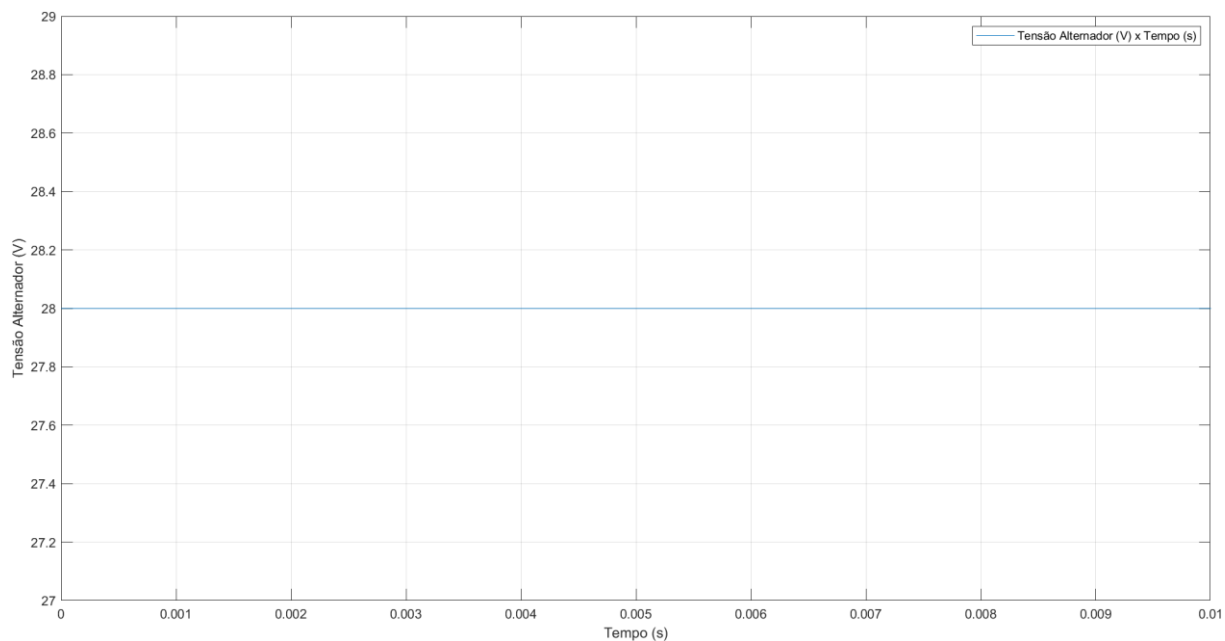
Figura 19 - Diagrama de blocos do controlador de corrente.



FONTE: Autor

O gráfico da Tensão do Alternador (V_{in}) versus Tempo, especificado na Figura 20 confirma que o conversor Buck é alimentado por uma fonte de tensão Contínua (CC) estável. A tensão se mantém fixa em 28 V ao longo de todo o tempo de simulação, representada por uma linha reta e horizontal. Esta estabilidade imediata da tensão de entrada é ideal para o funcionamento do conversor, confirmando que o sistema de controle opera sob condições de alimentação fixas. Em outros trabalhos, esta tensão pode ser alterada para traduzir a operação real do alternador.

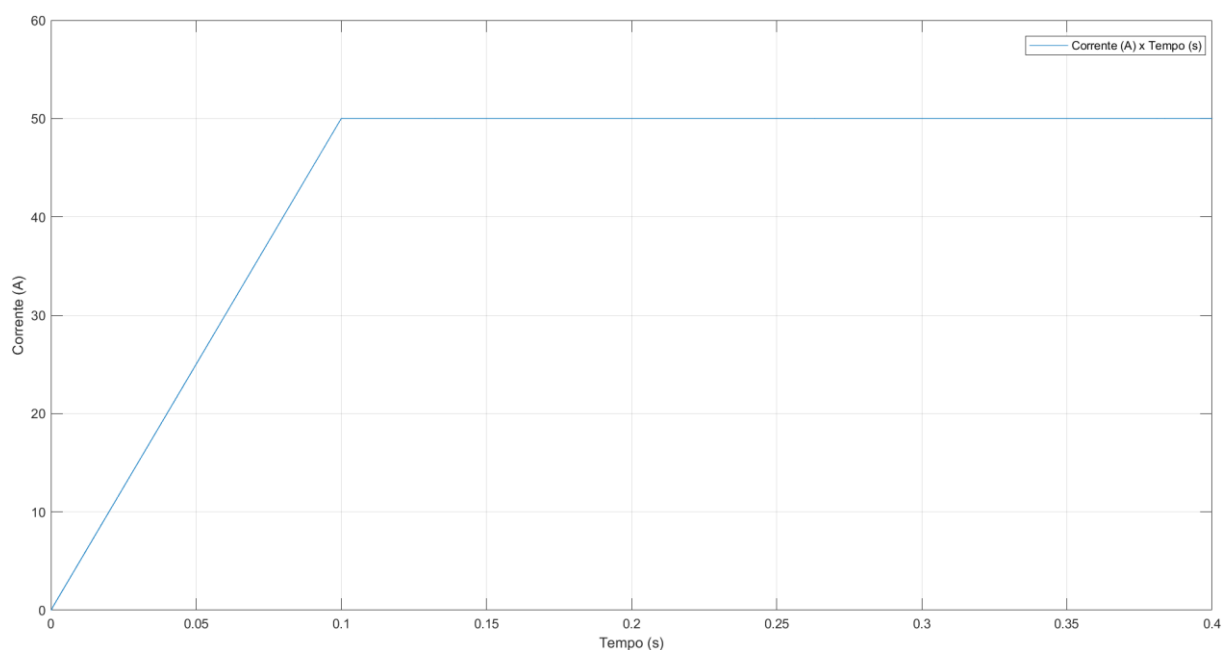
Figura 20 - Tensão do alternador veicular.



FONTE: Autor

O gráfico da Figura 21 demonstra o desempenho do controlador PI implementado para a malha de corrente do conversor Buck. Observa-se que a corrente de saída atinge rapidamente o valor nominal de 50 A estabelecido para o eletrolisador PEM, com um tempo de estabilização de aproximadamente após 0,10 segundo e sem apresentar oscilações.

Figura 21 - Resposta da corrente de saída do conversor buck em malha fechada, operando em modo corrente



FONTE: Autor

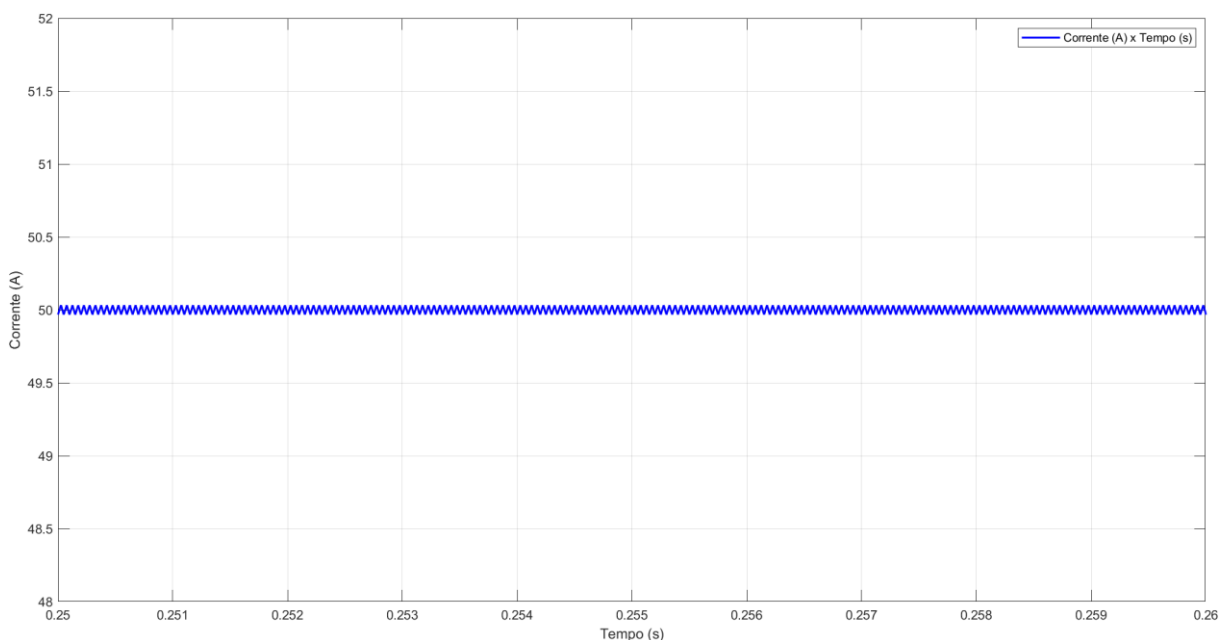
O controle opera em sua eficiência máxima, assegurando uma taxa de produção de hidrogênio constante e otimizada. A estratégia inicial de subir a corrente em rampa protege o eletrolisador contra sobrecorrentes, enquanto a estabilidade em regime permanente assegura produção contínua de H_2 durante a operação do ônibus.

Com base na análise do gráfico da Figura 22, a corrente de saída em regime permanente demonstra um controle com precisão. O valor médio da corrente está fixado em 50 A, comprovando a eficácia do controlador PI em manter o estado estacionário.

A oscilação de alta frequência observada é o *ripple* de corrente ΔIL , uma variação inevitável da corrente do indutor devido ao chaveamento. A análise revela que essa oscilação ocorre entre 49,96 A (pico mínimo) e 50,04 A (pico máximo). Isso resulta em um ΔIL de 0,08 A.

A presença de um *ripple* tão reduzido e de alta frequência, associada aos 20 kHz de chaveamento confirma a excelente qualidade de filtragem e o desempenho robusto do controle de corrente.

Figura 22 - Detalhe da Corrente de Saída (Ripple) em Regime Permanente, operando em modo corrente.



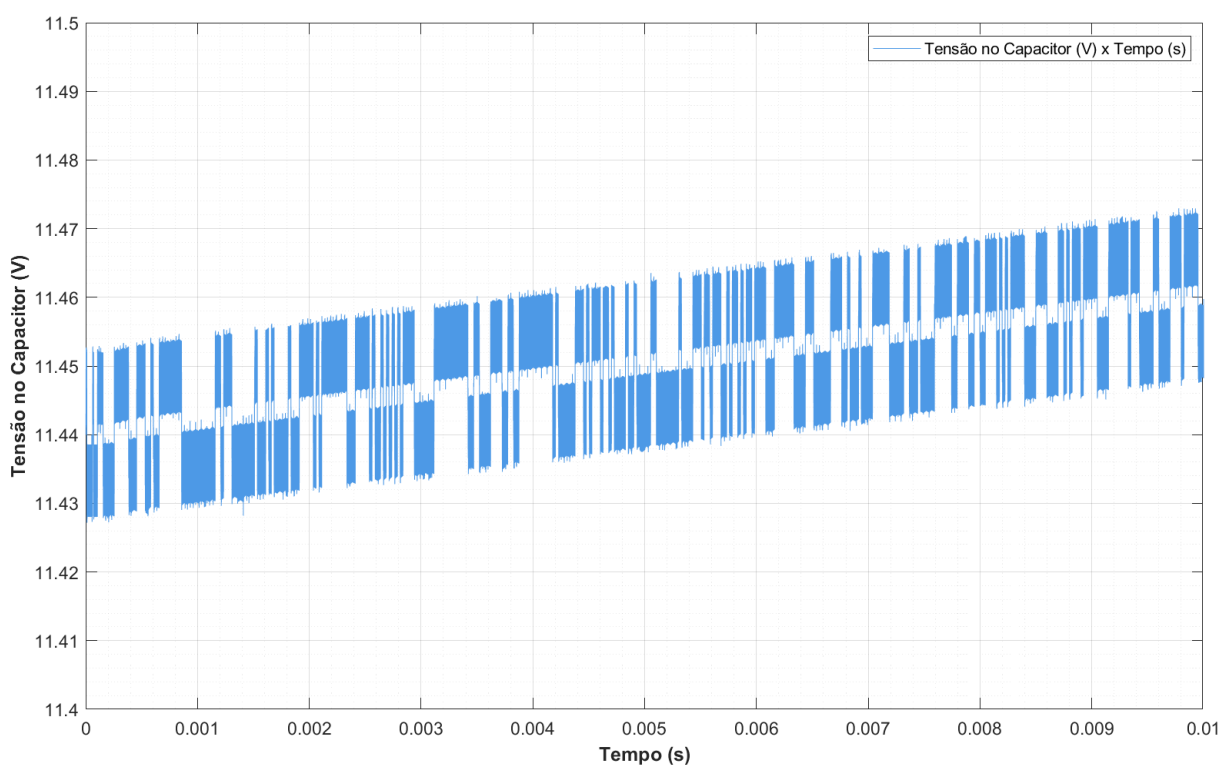
FONTE: Autor

A Figura 23 mostra a tensão no capacitor. Forma de onda importante para avaliar a qualidade de filtragem na saída do conversor Buck. Em regime permanente, a tensão de saída

estabiliza em um valor médio de aproximadamente 11,45 V, determinado pela operação da carga eletrolítica sob a corrente controlada de 50 A.

A pequena variação observada em torno desse valor médio é o *ripple* de tensão ΔV , resultado da variação da corrente no capacitor. A análise detalhada do gráfico mostra que, na região de estabilização, a tensão oscila entre o pico máximo de 11,47 V e o pico mínimo de 11,43 V. Um *ripple* tão baixo que confirma a excelente eficácia do filtro LC do conversor em suprimir as componentes de alta frequência de chaveamento, fornecendo uma tensão de alimentação CC para o eletrolisador.

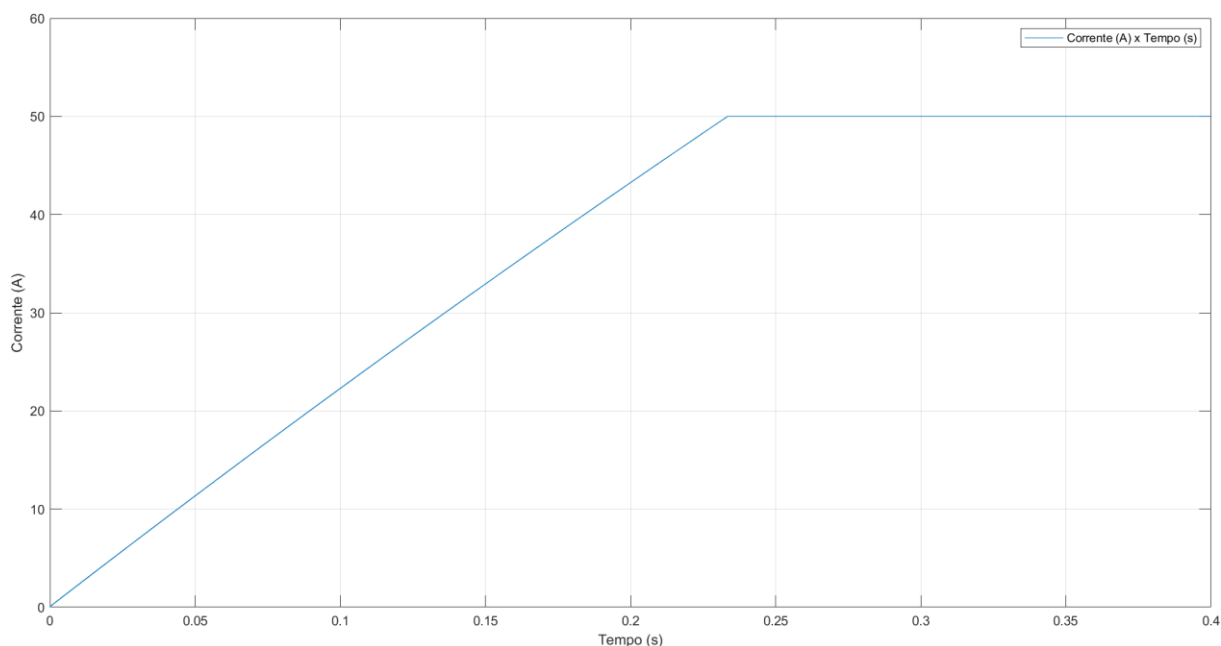
Figura 23 - Resposta da tensão no capacitor de saída, operando em modo corrente



FONTE: Autor

O gráfico da Figura 24 apresenta a resposta da corrente de saída do conversor Buck utilizando a estratégia de controle cascata tensão-corrente. Observa-se um desempenho com as seguintes características:

Figura 24 - Resposta da corrente de saída do conversor buck em malha fechada, operando em modo cascata (tensão-corrente)



FONTE: Autor

A simulação da corrente de saída demonstra o desempenho do controle de corrente do conversor Buck. Inicialmente, o sistema opera em regime transitório de $t=0$ s a aproximadamente 0,24s, onde a corrente aumenta progressivamente, em rampa, até atingir 50A. Este tempo de acomodação demonstra a estabilidade e a resposta controlada do sistema. O sistema entra no regime permanente a partir de aproximadamente 0,24 s, momento em que a corrente de saída se torna constante, mantida no valor pelo controlador PI.

A corrente de saída demonstra o desempenho do controlador de corrente (malha interna) em regime permanente, que é a base do sistema de controle cascata, como visto na Figura 25.

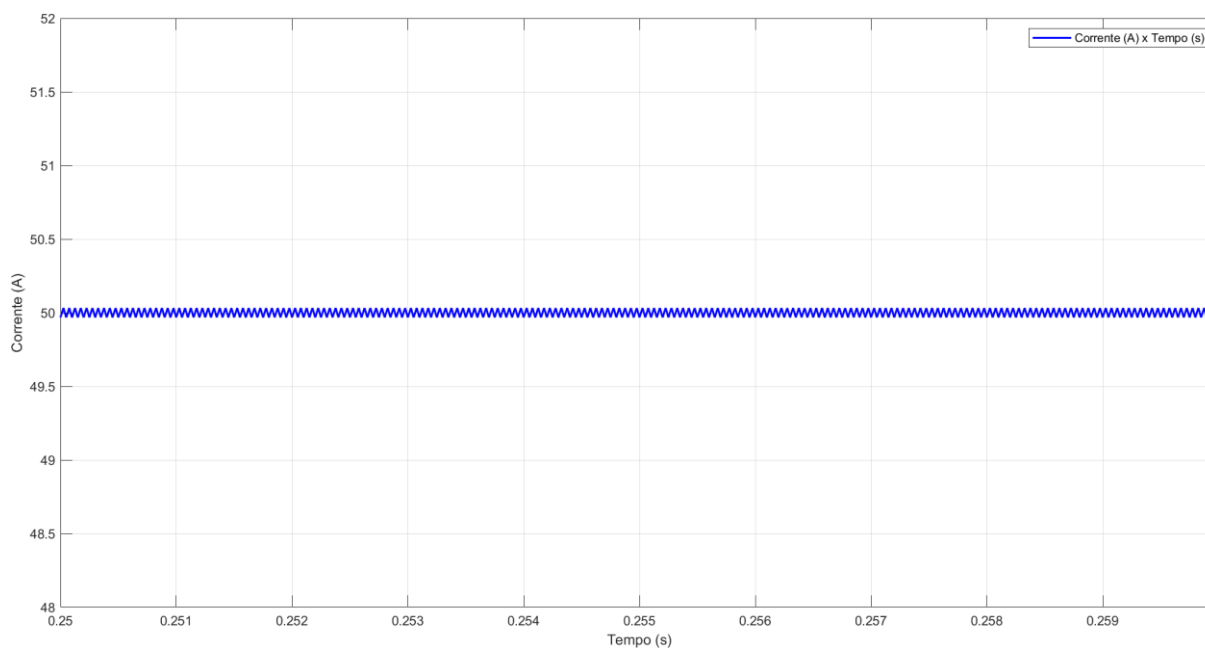
Em regime permanente, a corrente do indutor é mantida estavelmente no seu valor médio de 50 A, comprovando que a malha interna está rastreando com precisão a referência estabelecida pela malha de tensão externa.

A variação de alta frequência em torno desse valor médio é o *ripple* de corrente Delta IL, uma característica intrínseca do chaveamento do conversor Buck. O gráfico mostra que a corrente oscila entre o pico máximo de 50,04 A e o pico mínimo de 49,96 A, o que resulta em um Delta IL de apenas 0,08 A.

Este *ripple* extremamente baixo é vital no contexto do controle em cascata: um Delta IL reduzido garante que o ruído introduzido na malha de tensão seja mínimo, permitindo que a malha externa de tensão regule V_{out} com a máxima estabilidade e precisão. A frequência rápida

das oscilações confirma o uso da alta frequência de chaveamento de 20 kHz, que é crucial para alcançar essa baixa ondulação de corrente.

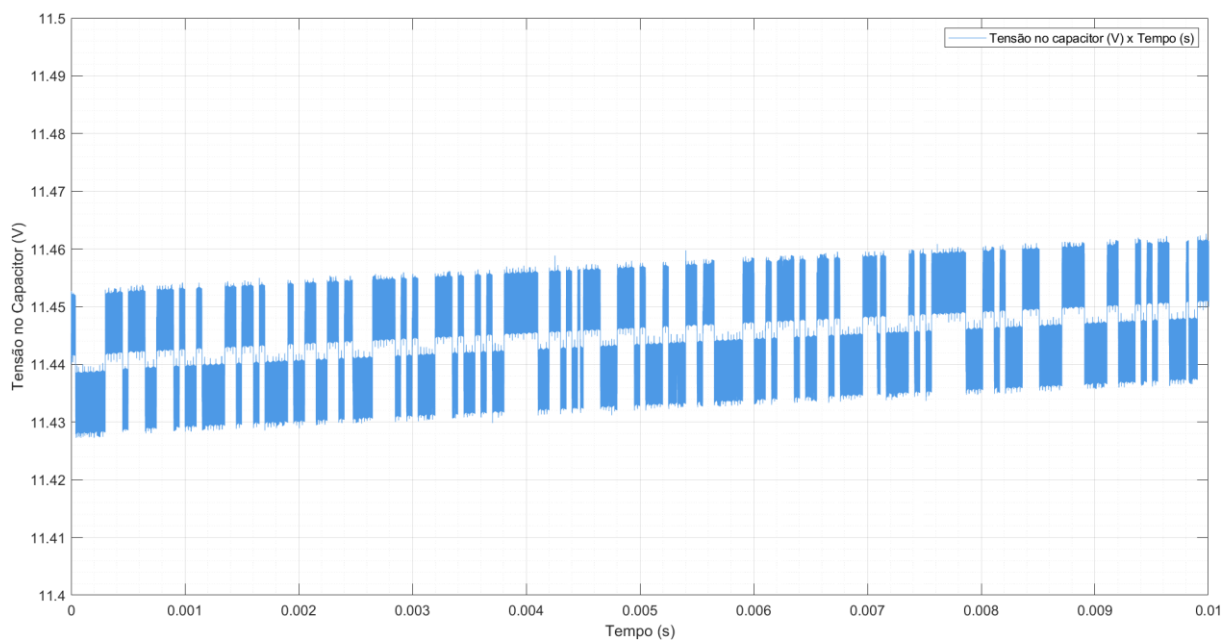
Figura 25 - Resposta da corrente de saída (Ripple) permanente com controle cascata (tensão-corrente)



FONTE: Autor

A análise do gráfico da Figura 26 mostra que, em regime, a tensão oscila entre um pico máximo de aproximadamente 11,455 V e um pico mínimo de 1,43 V, estabelecendo um Delta V de cerca de 25 mV. Tanto o *ripple* de corrente quanto o *ripple* de tensão ocorrem na Frequência de Chaveamento f_s do conversor. No projeto, f_s é de 20 kHz, o que resulta em oscilações muito rápidas e permite o uso de indutores e capacitores menores, além de facilitar a filtragem.

Figura 26 - Resposta da tensão no capacitor de saída, operando em modo cascata (tensão-corrente)



FONTE: Autor

O Controle Cascata é inerentemente mais lento em comparação com o controle de modo corrente de malha única. Isso ocorre porque a malha externa de tensão é dominante e lenta, dependendo da resposta inercial do capacitor de saída. A resposta do sistema fica limitada pela necessidade de a malha de tensão processar o erro antes de enviar a corrente para a malha interna, resultando em um tempo de acomodação maior para grandes perturbações.

5. CONCLUSÃO e CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Trabalho de Conclusão de Curso atingiu seu objetivo geral de desenvolver e validar, por meio de simulações no MATLAB/Simulink, um sistema de eletrônica de potência para alimentação de um eletrolisador PEM a partir da energia gerada por um alternador veicular, demonstrando a viabilidade técnica da produção local de hidrogênio (H_2) em ônibus. A consecução dos objetivos específicos permitiu uma abordagem metodológica sistemática e fundamentada. A revisão bibliográfica não apenas confirmou a pertinência do H_2V como vetor energético estratégico, mas também justificou tecnicamente a seleção do eletrolisador PEM como tecnologia mais adequada para aplicação veicular, considerando sua rápida resposta dinâmica (essencial para operar em sincronia com as flutuações do alternador), alta densidade de corrente e operacionalidade em baixas temperaturas ($60^{\circ}C$ a $80^{\circ}C$), quando comparadas a outras soluções. O estudo das topologias de conversores CC-CC validou a escolha do conversor Buck como solução interessante para a interface de potência, fundamentada em sua eficiência comprovada, simplicidade estrutural e capacidade intrínseca de adequar a tensão de 28 V do barramento veicular aos 11,44 V requeridos pelo *stack* eletrolítico.

O desenvolvimento do projeto e a modelagem matemática constitui importante contribuição deste trabalho. Através da modelagem por média no espaço de estados, foram derivadas as funções de transferência G_{vd} e G_{id} , fundamentais para o projeto de controle. A sintonização dos controladores PI via ferramenta SISOTOOL resultou em compensadores com excelente desempenho: o controlador de tensão atingiu margem de fase de $86,6^{\circ}$ e frequência de cruzamento de 310 Hz, enquanto o controlador de corrente alcançou largura de banda de 4,02 kHz com margem de fase de $76,3^{\circ}$, garantindo robustez e resposta rápida.

A implementação e validação do modelo completo no ambiente MATLAB/Simulink demonstraram o excelente desempenho do sistema proposto. Os resultados quantitativos revelaram que o conversor Buck mantém a corrente de saída em 50 A (ripple de 0,08 A) e tensão de saída em 11,44 V (ripple de 25 mV), com tempo de estabilização de 0,24 segundos para o controle em cascata. A análise comparativa entre estratégias de controle evidenciou características distintas: o controle em modo corrente apresentou tempo de estabilização de 0,10 segundos, demonstrando resposta mais rápida por atuar diretamente na variável de estado de dinâmica mais rápida, enquanto o controle cascata apresentou tempo de estabilização de 0,24 segundos.

A relevância deste trabalho transcende o âmbito acadêmico, em virtude da necessidade de descarbonização do setor de transportes brasileiro. Conforme dados do SEEG (2024), o setor de transportes responde por aproximadamente 48% das emissões do setor energético nacional, representando 201,6 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. Neste contexto, o sistema desenvolvido apresenta uma resposta direta aos compromissos estabelecidos na NDC brasileira (2024), que prevê o hidrogênio como alternativa para o setor de transportes até 2035, exigindo investimento em infraestrutura específica.

A abordagem proposta de produção local de hidrogênio em veículos supera três obstáculos históricos à adoção do H₂ como combustível, como a independência de infraestrutura de abastecimento, eliminando a necessidade de investimentos massivos em postos de abastecimento, maior autonomia veicular, contorna as limitações físicas de armazenamento e ocorre sustentabilidade ambiental, utilizando rotor a combustão e produzindo apenas água como subproduto.

A eletrônica de potência consolida-se como elemento habilitador central desta transição tecnológica, permitindo a integração eficiente entre o alternador veicular e o eletrolisador PEM.

Este trabalho estabelece, portanto, bases técnicas sólidas para a transição energética no transporte pesado, oferecendo uma solução pragmaticamente viável para a descarbonização da frota de ônibus brasileira. A metodologia de projeto e validação aqui apresentada constitui referência fundamental para o desenvolvimento de sistemas comerciais de produção veicular de H₂V, contribuindo significativamente para o cumprimento das metas climáticas nacionais e para a construção de um paradigma de mobilidade sustentável.

Os trabalhos futuros podem, portanto, avançar a partir desta base, focando no aprofundamento e na expansão dessas premissas iniciais. As próximas etapas de pesquisa podem ser direcionadas para:

- I. Modelar o comportamento elétrico e térmico do alternador em diferentes pontos de operação;
- II. Estabelecer os limites de potência disponível sem comprometer o carregamento da bateria e a alimentação de cargas;
- III. Quantificar os impactos da carga adicional sobre a bateria, a rede elétrica do veículo e a eficiência geral do sistema. Essas considerações constituem elementos fundamentais para determinar a viabilidade da integração de sistemas de produção de hidrogênio verde diretamente na plataforma veicular.

6. REFERÊNCIAS

- [1] AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.094. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922007066>.
- [2] ALANAZI, Fayez. Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. *Applied Sciences*, [S. l.], v. 13, n. 10, p. 6016, 2023. DOI: 10.3390/app13106016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/10/6016>.
- [3] AOYAGUE, Henry Yuzo Sasaki. Impactos dos veículos elétricos no sistema elétrico brasileiro e no meio ambiente. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/6a0a709a-9f17-48db-9486-ba00443d7948/content>.
- [4] BAKYT, Gabit Bakytuly et al. Hydrogen generator for internal combustion engine. *Revista de Pesquisa e Tecnologia Aplicada*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/377835505_HYDROGEN_GENERATOR_FOR_INTERNAL_COMBUSTION_ENGINE.
- [5] BARRETIRI, Thiago Renato; HAUS, Tiago Luis. Análise da viabilidade da utilização de hidrogênio em motores a combustão interna. *Caderno PAIC*, [S. l.], 2012-2013. Disponível em: <https://cadernopaic.fae.edu/cadernopaic/article/view/24/23>.
- [6] BRAGA, Izaac Paulo Costa. Diretrizes para utilização de hidrogênio verde no sistema de transporte urbano do Brasil. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025*. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/29df5ed8-5811-4133-b9d8-3cf71fbb7dc9/content>.
- [7] BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. Brazil's Second Nationally Determined Contribution (NDC). Brasília, DF, nov. 2024. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_November2024.pdf.
- [8] BRASIL. Senado Federal. Agência Senado. Protocolo de Kyoto. Brasília, DF: Senado Federal. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>.
- [9] C, K. et al. Advanced Power Electronics Interface for Designing Electric Vehicle Charging Architecture. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION, COMPUTING & INDUSTRY 6.0 (C2I6)*, 5., 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10895229>.
- [10] CARLSON, Henry. State of Play: Hydrogen in 2020. [S. l.]: White & Case, 2020. Disponível em: <https://www.whitecase.com/insight-alert/state-play-hydrogen-2020>.

- [11] DEUS, Felipe Rigotti Alves de. Estudo comparativo entre técnicas de controle aplicadas em um conversor buck. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1143/1/MONOGRAFIA_EstudoComparativoTécnicas.pdf.
- [12] Eletrolisadores: opções tecnológicas e novas tecnologias. O Setor Elétrico, n. 198, p. 35-42, out. 2023. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2023/10/Edicao-198_FINALSIMPLES-35-42.pdf.
- [13] ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIĆ, Dragan. Fundamentals of Power Electronics. 3. ed. New York: Springer, 2020. Disponível em: <https://share.google/rxsn5xBP582aBQ71a>.
- [14] FLAH, A. et al. Advancing Sustainable Energy Transition Through Green Hydrogen Valleys. IEEE Access, [S. l.], v. 13, p. 31442-31471, 2025. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3542554. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10890970>.
- [15] HYFINDR GmbH. PEM Electrolyser Stack Storager 40 Bar, 2025. Disponível em: <https://www.hyfindr.com/en/shop/products/pem-electrolyser-stack-storager-40-bar>.
- [16] IEA. Global Hydrogen Review 2024. Paris: International Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
- [17] IKUTA, Nick. Buck Converters Enable Efficient Power Conversion in Automotive Applications. EE Power. Disponível em: https://eepower.com/industry-articles/buck-converters-enable-efficient-power-conversion-in-automotive-applications/?utm_source
- [18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14687:2019: Hydrogen fuel quality — Product specification. Genebra: ISO, 2019. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/38075.html>.
- [19] IRENA. Green Hydrogen Strategy: A guide to design. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/>.
- [20] LACTEC. Hidrogenio verde no Brasil: reunimos o que você precisa saber. Disponível em: <https://lactec.org.br/hidrogenio-verde-no-brasil/>.
- [21] MATHEW, M. Nikhil; DHAR, Atul. Methods of on-board Hydrogen Generation in an IC Engine. Journal of Energy and Environmental Sustainability. Disponível em: <https://jees.in/index.php/jees/article/view/121/119>.
- [22] NATERI, M. S. et al. Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. International Journal of Hydrogen Energy. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.326. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921036697>.

- [23] NEWBOROUGH, Marcus; COOLEY, Graham. Desenvolvimentos no mercado global de hidrogênio: O espectro de cores do hidrogênio. Fuel Cells Bulletin. DOI: 10.1016/S1464-2859(20)30546-0. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0).
- [24] OLIVEIRA, Geraldo do Carmo Santos; SIMEÃO, Juliano Daniel. Alternadores, uma fonte eficiente de energia automotiva. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA. Disponível em: https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/mecanica/2_aufedea.pdf.
- [25] PETRY, Clóvis Antônio. Conversores CC-CC: Conversor Buck. Florianópolis, 2014. Disponível em: https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Eletronica_Potencia/2016_1/Capitulo_12.pdf.
- [26] PINDORIYA, R. M. et al. An Analytical Review on State-of-the-Art of Green Hydrogen Technology for Fuel Cell Electric Vehicles Applications. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENERGY AND FUTURE ELECTRIC TRANSPORTATION. DOI: 10.1109/SeFeT57834.2023.10245483. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10245483>.
- [27] RCD DISTRIBUIDORA. O que é um alternador? Entenda sua importância. Disponível em: <https://rcddistribuidora.com/glossario/o-que-e-um-alternador-entenda-sua-importancia>.
- [28] REPSOL. Decompose to decarbonize: How does an electrolyzer work?, 2025. Disponível em: <https://www.repsol.com/en/energy-move-forward/energy/electrolyzer/index.cshtml>.
- [29] SCOVAZZI, Tullio. Do Protocolo de Kyoto ao Acordo de Paris. Tradução de: Lucas Carlos Lima. Revista da Faculdade de Direito da UFMG, Belo Horizonte, n. 78, p. 469-476, jan./jun. 2021. DOI: 10.12818/P.0304-2340.2021v78p469. Disponível em: https://revista.direito.ufmg.br/index.php/revista/pt_BR/article/view/2178.
- [30] SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>.
- [31] SEG AUTOMOTIVE. Funcionamento do alternador. Disponível em: <https://blog.seg-automotive.com.br/funcionamento-do-alternador/>.
- [32] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J2579_202301: Standard for Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles. Warrendale: SAE International, 2023. Disponível em: https://www.sae.org/standards/j2579_202301-standard-fuel-systems-fuel-cell-hydrogen-vehicles.
- [33] SOUZA, Maria Cristina Oliveira; CORAZZA, Rosana Icassatti. Do Protocolo de Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. Desenvolvimento e Meio Ambiente, Curitiba, v. 42, p. 244-267, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v42i0.51298>.

- [34] THANAPALAN, K. et al. Design and implementation of on-board hydrogen production and storage system for hydrogen fuel cell vehicles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT CONTROL AND INFORMATION PROCESSING, 2., 2011, Harbin. Anais [...]. Harbin: IEEE, 2011. p. 484-488. DOI: 10.1109/ICICIP.2011.6008291. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6008291>.
- [35] ÜÇÖK, M. D. Prospects for hydrogen fuel cell vehicles to decarbonize road transport. Discover Sustainability, 2023. DOI: 10.1007/s43621-023-00159-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43621-023-00159-1>.
- [36] UNITED STATES. National Highway Traffic Safety Administration. Federal Motor Vehicle Safety Standards; Fuel System Integrity of Hydrogen Vehicles; Compressed Hydrogen Storage System Integrity. Washington, DC: Federal Register, 2025. Disponível em: <https://www.federalregister.gov/documents/2025/01/17/2024-31367/federal-motor-vehicle-safety-standards-fuel-system-integrity-of-hydrogen-vehicles-compressed>.
- [37] VONBUN, Christian. Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: uma revisão da literatura. Synthesis, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 68-84, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.12957/synthesis.2015.30472>.
- [38] VORWERK, D.; SCHUMANN, M.; SCHULZ, D. PEM-electrolyzer modelling and control strategies in the extended node method for hybrid power system modelling. In: INTERNATIONAL HYBRID POWER PLANTS & SYSTEMS WORKSHOP. DOI: 10.1049/icp.2024.1867. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10660423>.
- [39] WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). Climate Watch. Washington, DC, 2024. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org>.
- [40] YANG, Luo et al. A review on thermal management in proton exchange membrane fuel cells: Temperature distribution and control. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S. l.], v. 188, 113899, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113899. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123005944>.
- [41] ZHANG, Q. et al. Hydrogen as the nexus of future sustainable transport and energy systems. Nature, 2025. DOI: 10.1038/s44287-025-00178-2. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s44287-025-00178-2>.