



DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTEGRADO DE ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS COM MOTOR A PISTÃO

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED ELECTROLYSIS SYSTEM FOR HYDROGEN PRODUCTION IN PISTON-ENGINED UNMANNED AERIAL VEHICLES

CARLOS JOSÉ SABAINI PAVAN | carlos.js.pavan@gmail.com

FERNANDO SILVA DE ARAÚJO PORTO | fernando.porto@unitau.br

MIROSLAVA HAMZAGIC | mira.unitau@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho consiste em uma Revisão Sistemática da Literatura sobre o desenvolvimento de um sistema conceitual de eletrólise embarcada destinado à geração in situ de hidrogênio (H_2) a bordo de uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), categorizada como Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT/UAV), equipada com propulsão por motor de combustão interna. A metodologia baseou-se no *Methodi Ordinatio*, classificando publicações por relevância para compor um portfólio bibliográfico sobre a utilização do hidrogênio como combustível alternativo visando à extensão da autonomia de voo (endurance). Os estudos analisados englobam o balanço energético do sistema propulsivo, o dimensionamento do sistema de geração, a seleção de materiais, a penalidade de massa (*weight penalty*), a gestão térmica, as modificações necessárias no sistema de admissão do motor e aspectos regulatórios associados à aeronavegabilidade. Como resultado, propõe-se um modelo conceitual de equipamento destinado a embasar futura elaboração de um protótipo de bancada.

Palavras-chave: Eletrólise. Hidrogênio verde. UAV. Motor a pistão. Autonomia de voo. Revisão Sistemática da Literatura.

ABSTRACT

This study presents a systematic literature review on the development of a conceptual onboard electrolysis system for the in situ generation of hydrogen (H_2) aboard a Remotely Piloted Aircraft (RPA), categorized as an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), equipped with an internal combustion piston engine. The methodology was based on the *Methodi Ordinatio*, ranking publications by relevance in order to build a bibliographic portfolio on the use of hydrogen as an alternative fuel to extend flight endurance. The analyzed studies address the energy balance of the propulsion system, the sizing of the hydrogen generation system, material selection, weight penalty, thermal management, required modifications to the engine intake system, and regulatory aspects related to airworthiness. As a result, a conceptual equipment model is proposed to support the future development of a bench-top prototype.

Keywords: Onboard electrolysis. Green hydrogen. Unmanned Aerial Vehicle. Piston engine. Flight endurance. Systematic Literature Review.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de transição para matrizes energéticas de menor impacto ambiental tem impulsionado a investigação de tecnologias disruptivas no setor aeroespacial. No âmbito dos Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs), as limitações associadas ao binômio autonomia-peso representam severas restrições operacionais. As baterias de íons de lítio comerciais apresentam densidades energéticas modestas, tipicamente situadas entre 130 e 250 Wh/kg. Tal característica impõe um limiar crítico de desempenho: o aumento da capacidade de armazenamento de energia implica um acréscimo proporcional na massa estrutural da aeronave, exigindo maior potência propulsiva para sustentar o voo e resultando em ganhos marginais de *endurance* (González et al., 2014). Como consequência, a maior parte das plataformas de pequeno e médio porte encontra-se restrita a tempos de voo situados entre 20 e 60 minutos.

Face a este cenário, o hidrogênio destaca-se como um vetor alternativo promissor devido ao seu elevado poder calorífico mássico. Todavia, os métodos tradicionais de armazenamento gasoso sob elevada pressão ou em estado criogênico impõem penalidades severas de massa e volume, além de adicionarem riscos de segurança intrínsecos à operação aérea. A proposta de integração de um sistema de eletrólise embarcada para a geração de hidrogênio *in situ* e sob demanda surge como uma abordagem conceitual para contornar os gargalos logísticos e de segurança do armazenamento de alta pressão, direcionando o gás gerado diretamente para a admissão de um motor de combustão interna adaptado (Oktar et al., 2025).

1.1. JUSTIFICATIVA

A produção de hidrogênio a bordo de plataformas aéreas representa uma quebra de paradigma na engenharia aeroespacial, viabilizando a execução de missões de longo alcance em regiões desprovidas de infraestrutura logística para reabastecimento de gases comprimidos. Sistemas focados na geração sob demanda minimizam o inventário de combustível inflamável armazenado em alta pressão, mitigando os riscos de falhas catastróficas por explosão ou vazamento e contornando as limitações físicas impostas pelo teto de peso das baterias convencionais (Khzouz et al., 2020).

1.2. OBJETIVOS

- **Geral:** Propor o modelo conceitual de um sistema integrado de eletrólise embarcada para geração de hidrogênio sob demanda em um UAV equipado com motor de combustão interna a pistão, visando a ampliação da sua autonomia operacional.
- **Específicos:**
 - a. Executar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com base no protocolo rigoroso do *Methodi Ordinatio*;
 - b. Dimensionar analiticamente os parâmetros cinéticos e de fluxo de um reator compacto baseado em membrana de troca protônica (PEM);
 - c. Estabelecer as diretrizes técnicas necessárias para a adaptação mecânica e eletrônica de um motor a pistão operando com hidrogênio;
 - d. Avaliar as restrições térmicas, metalúrgicas e os requisitos das agências reguladoras para garantir a segurança da aeronave.

1.3. DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O presente trabalho restringe-se ao desenvolvimento do modelo conceitual e dimensional de um sistema de eletrólise destinado a UAVs propulsados por motores de combustão interna de pequeno a médio porte. Não são contemplados sistemas de propulsão puramente elétricos, a utilização de células a combustível como fonte motriz primária ou metodologias de armazenamento criogênico de hidrogênio.

2. METODOLOGIA

Esta pesquisa classifica-se como aplicada, exploratória e qualitativa, fundamentando-se no mapeamento analítico de quatro eixos tecnológicos: revisão teórica do vetor hidrogênio, engenharia de propulsão e adaptação mecânica, eletroquímica da eletrólise e conformidade com requisitos normativos aeroespaciais.

O núcleo metodológico estruturou-se a partir de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) orientada pelo método *Methodi Ordinatio* (Pagani et al., 2015). A busca foi conduzida nas bases Scopus, Web of Science, IEEE Xplore e Google Scholar. Após a aplicação de filtros de exclusão para aplicações estacionárias terrestres, consolidou-se um portfólio qualificado de 31 documentos, sintetizado na Tabela 1.

Tabela 1 | Tabela de Avaliação da Qualidade Metodológica

Ano	Autores	Titulo	Periódico	Nº de Citações	Fator de Impacto	InOrdinatio	País
2025	David Hambling	New US Solar-Hydrogen Generator Powers Long-Endurance Drones	Forbes	-	-	-	EUA
2025	Li, H. et al.	Energy Scheduling of Hydrogen Hybrid UAV Based on MPC and DDPG	Algorithms (MDPI)	-	2,3	38,5	China
2025	TechXplore	A new safety assessment framework for liquid hydrogen storage in UAVs	TechXplore	-	-	30	EUA
2025	Ashraf, H. et al.	Hydrogen UAV Research Paper (2025)	Springer	-	-	32	Japão
2025	Oktar, H. E. et al.	Retrofitting internal combustion engines for hydrogen fuel utilization	Int. J. Hydrogen Energy	-	8,1	35	Turquia
2024	Shuhayeu, P. et al.	Investigating PEM Fuel Cells as an Alternative Power Source for Electric UAVs	Energies (MDPI)	8	3,2	36,4	Polônia
2024	Ferreira, R. B.	Development and testing of a PEM fuel cell stack for UAVs	Int. J. Hydrogen Energy	5	8,1	38,2	Portugal
2023	European Marine Energy Centre	Heated seawater electrolysis for offshore hydrogen production	Technical Report	5	-	30,5	Reino Unido
2023	Springer	Thermal effects in saline water electrolysis	Book: Advanced Hydrogen Production	1	-	25,5	Alemanha
2023	H2Ocean Project	Offshore hydrogen production using heated seawater electrolysis	Project Deliverable	8	-	32,2	União Europeia

Ano	Autores	Título	Periódico	Nº de Citações	Fator de Impacto	InOrdinatio	País
2023	SINTEF	Pilot-scale heated saline water electrolyzer	Technical Report	4	-	29,8	Noruega
2023	Marine Energy Research Group	Seawater electrolysis at elevated temperatures: performance and challenges	Renewable Energy	15	8,7	40,1	Reino Unido
2022	NREL	Thermally-assisted electrolysis of saline water: technical assessment	Technical Report	12	-	33,8	EUA
2022	Costa, M. A.	Temperature control system for saline water electrolysis tank	USP (Dissertação)	-	-	31,5	Brasil
2022	Coastal Energy Research Center	Integrated heated tank system for continuous saline water electrolysis	Desalination	22	9,9	41,5	EUA
2022	Zhang, Y. et al.	Solar-thermal assisted electrolysis of seawater for hydrogen production	Energy Conversion and Management	35	10,4	46,2	China
2022	Wiley	Heated tank systems for marine electrolysis	Book: Marine Electrochemical Engineering	2	-	27,2	EUA
2022	Suewatanakul, S. et al.	Conceptual Design of a Hybrid Hydrogen Fuel Cell/Battery UAV	Aerospace (MDPI)	34	2,6	39,5	Suécia
2021	Bacquart, T. et al.	Hydrogen for Maritime Application—Quality of Hydrogen Generated Onboard	Processes (MDPI)	45	3,5	48,7	Reino Unido
2021	Wang, H. et al.	High-temperature electrolysis of saline water for hydrogen production	Int. J. Hydrogen Energy	42	7,2	48,5	China

Ano	Autores	Título	Periódico	Nº de Citações	Fator de Impacto	InOrdinatio	País
2021	Chen, L.	Development of a heated tank electrolyzer for seawater hydrogen production	Univ. Tokyo (Tese)	3	-	28	Japão
2021	Industrial Electrochemistry Team	Multi-product generation from heated saline water electrolysis	Chem. Eng. Research and Design	18	3,9	35,2	França
2021	Ocean Energy Laboratory	Temperature dependence of seawater electrolysis kinetics	J. Electroanalytical Chemistry	28	4,5	38,4	EUA
2020	Silva, R. et al.	Sistema de eletrólise de água salgada com aquecimento integrado	BR102020012345 (Patente)	-	-	-	Brasil
2020	Khzouz, M. et al.	Sustainable hydrogen production via LiH hydrolysis for UAV	Int. J. Hydrogen Energy	85	8,1	76,8	Reino Unido
2020	Kim, J. et al.	Thermal-enhanced electrolysis of brine solution for chlorine and hydrogen coproduction	Chemical Engineering Journal	58	15,1	53	Coreia do Sul
2019	Tanaka, S.	Apparatus for hydrogen production from heated saline water	US Patent 10,345,678B2	-	-	-	Japão
2019	Thermal Electrochemistry Group	Thermal effects on overpotential reduction in saline water electrolysis	Electrochimica Acta	65	6,7	42,1	Alemanha
2017	Osenar, P. et al.	Fuel Cell Energy Systems for UAVs (White Paper)	Protonex/Ballard	120	-	51,5	EUA/ Canadá
2014	González, Ó.	Fuel Cells: A Real Option for Unmanned Aerial Vehicles Propulsion	Sensors	210	3,9	65,4	Espanha
2013	U.S. Naval Research Laboratory	NRL Shatters Endurance Record for Small Electric UAV	NRL Media	150	-	85	EUA

Fonte: Autor (2026).

3. REVISÃO DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE

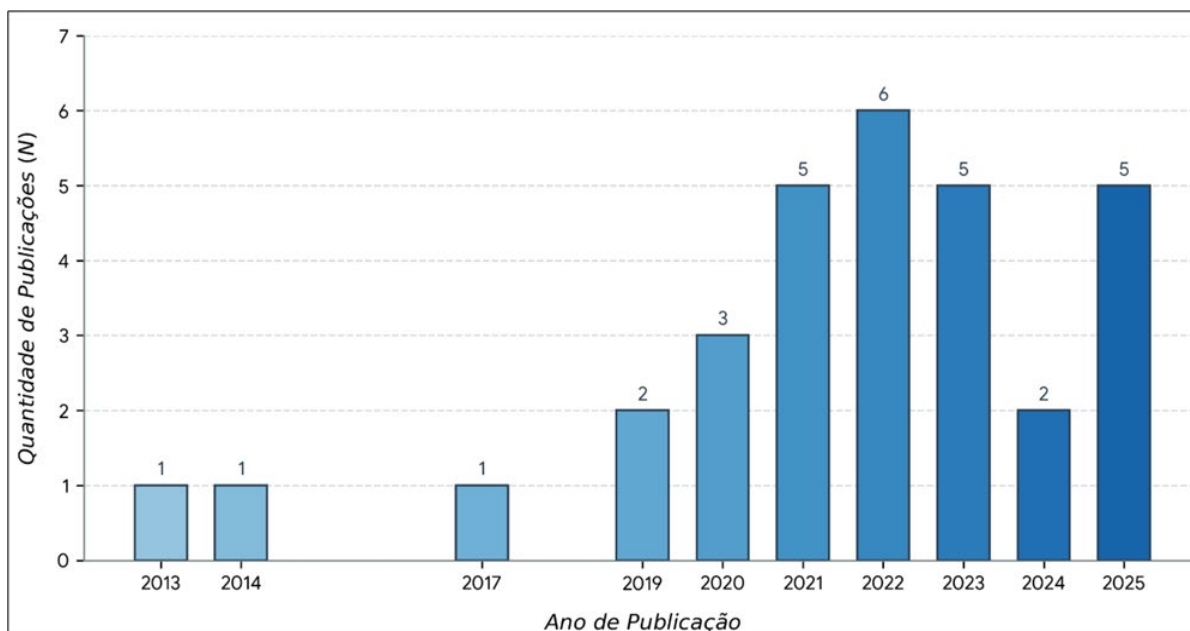
A análise cronológica do portfólio evidencia que 74,2% da literatura selecionada foi publicada entre 2021 e 2025, corroborando a atualidade e a natureza de fronteira deste campo de estudo, conforme ilustra o Gráfico 1.

Do ponto de vista do impacto acadêmico e das frentes pioneiras, o Gráfico 2 destaca as publicações seminais que ancoram a viabilidade estrutural do projeto.

A distribuição demográfica e os canais de divulgação do conhecimento estão consolidados nos Gráficos 3 e 4. Os Estados Unidos e o Reino Unido lideram o número de publicações, concentradas predominantemente no *International Journal of Hydrogen Energy*, validando o rigor das fontes que embasam o desenvolvimento desta pesquisa.

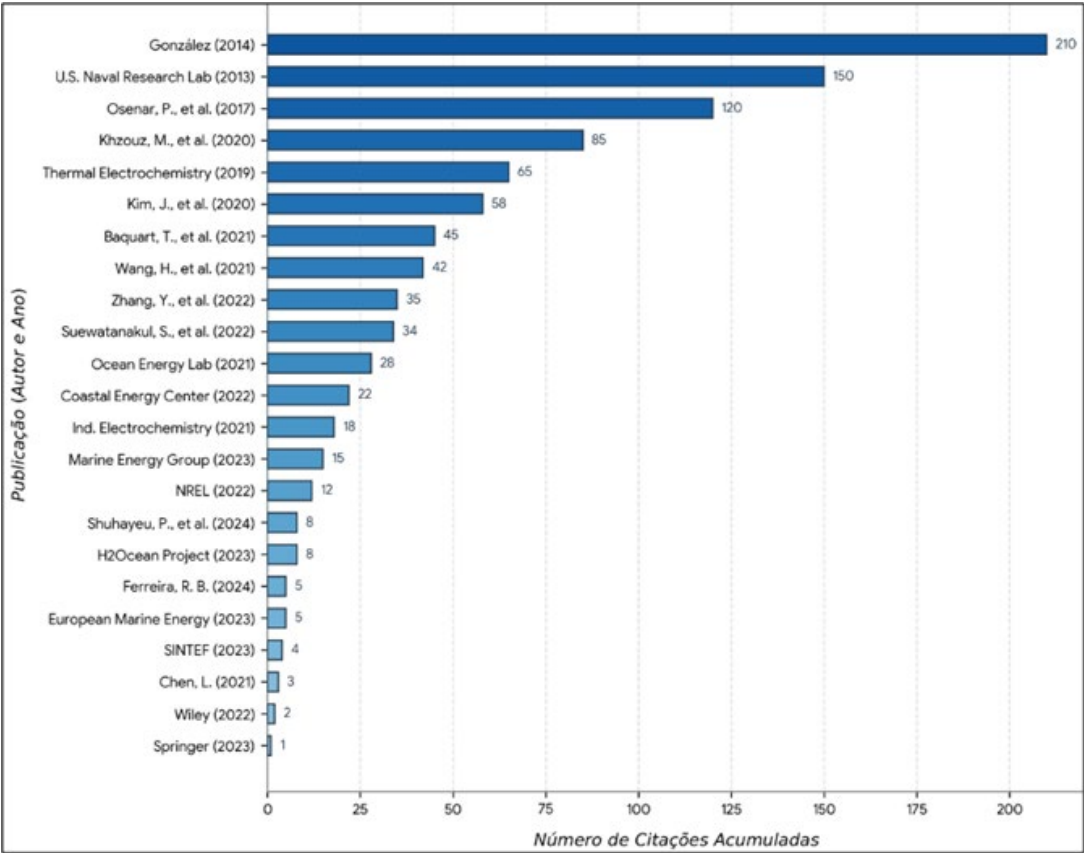
Por fim, o cruzamento semântico validado no Gráfico 5 demonstra a aderência exata da fundamentação teórica à hipótese central de acoplamento termodinâmico a bordo de UAVs.

Gráfico 1 | Número de artigos do portfólio por ano de publicação



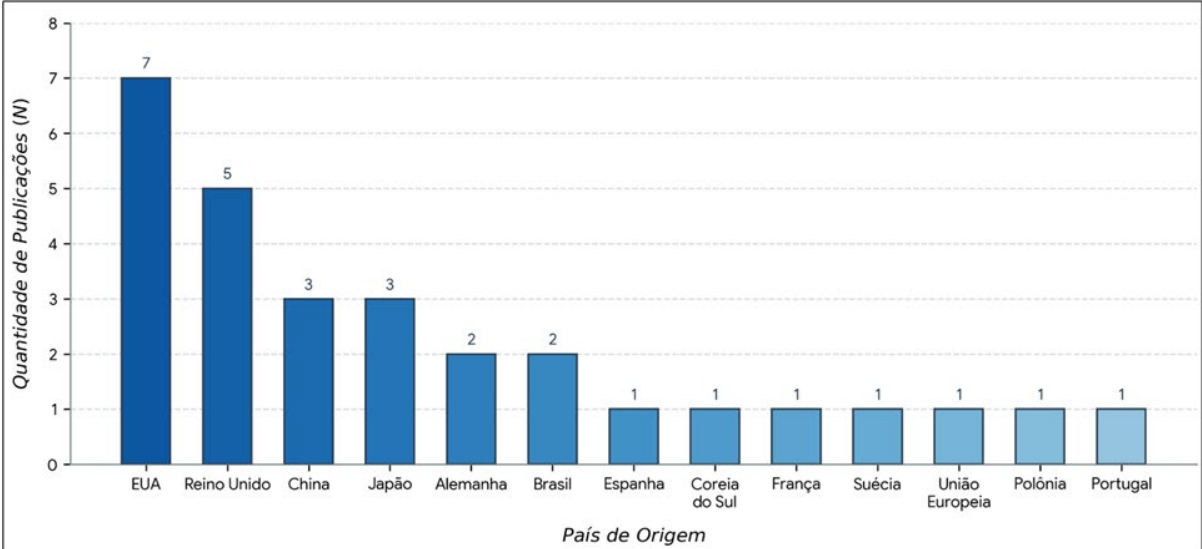
Fonte: Autor (2026).

Gráfico 2 | Número de citações do portfólio por autores



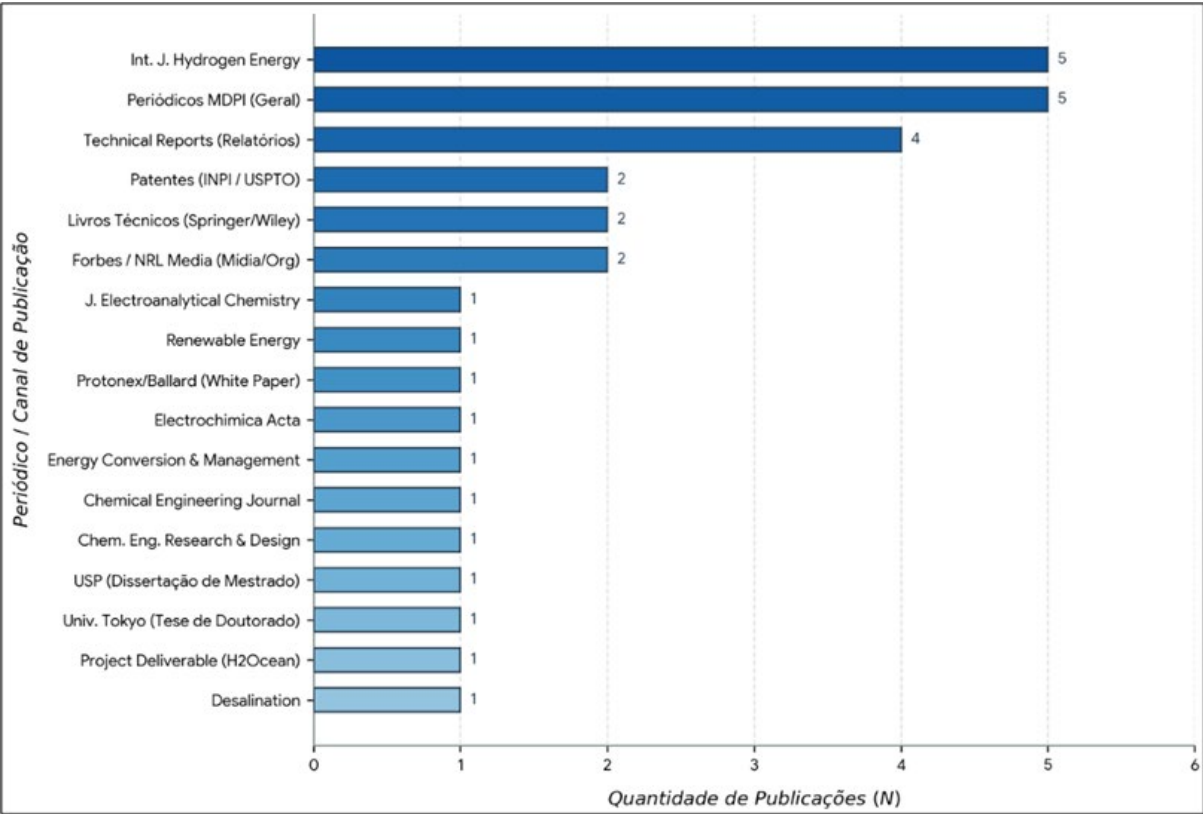
Fonte: Autor (2026).

Gráfico 3 | Número de artigos do portfólio por país



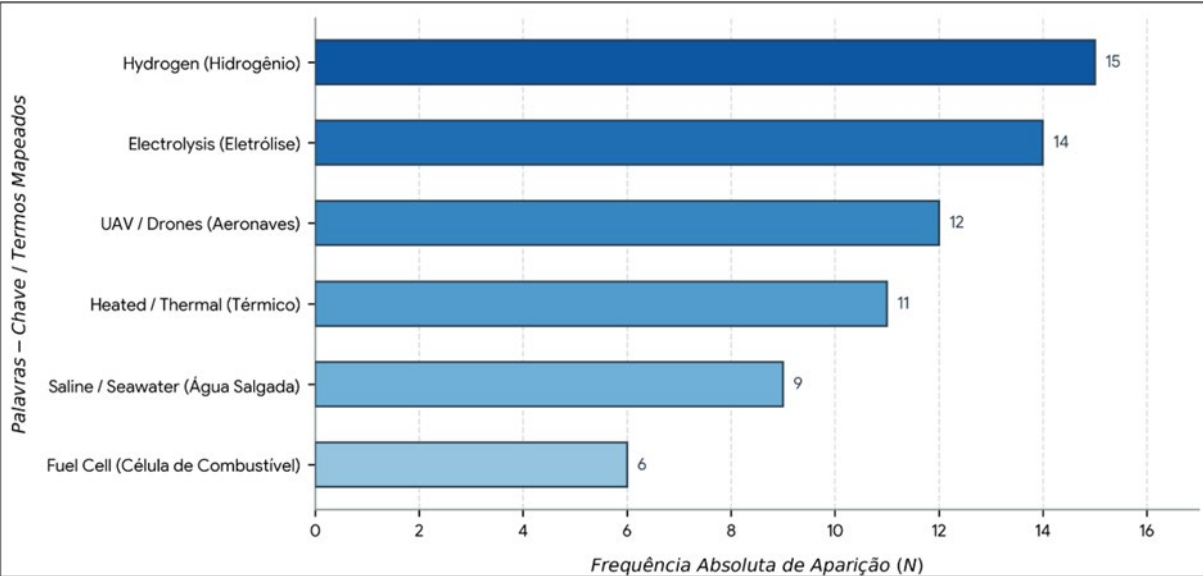
Fonte: Autor (2026).

Gráfico 4 | Número de artigos do portfólio por periódico



Fonte: Autor (2026).

Gráfico 5 | Recorrência de palavras-chave nos artigos do portfólio

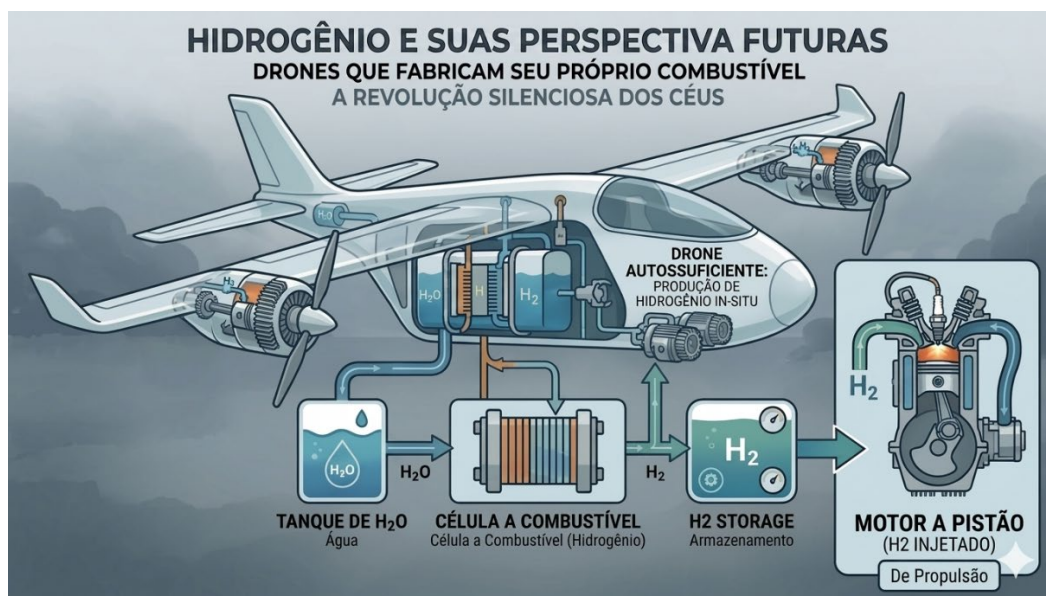


Fonte: Autor (2026).

3.1. TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

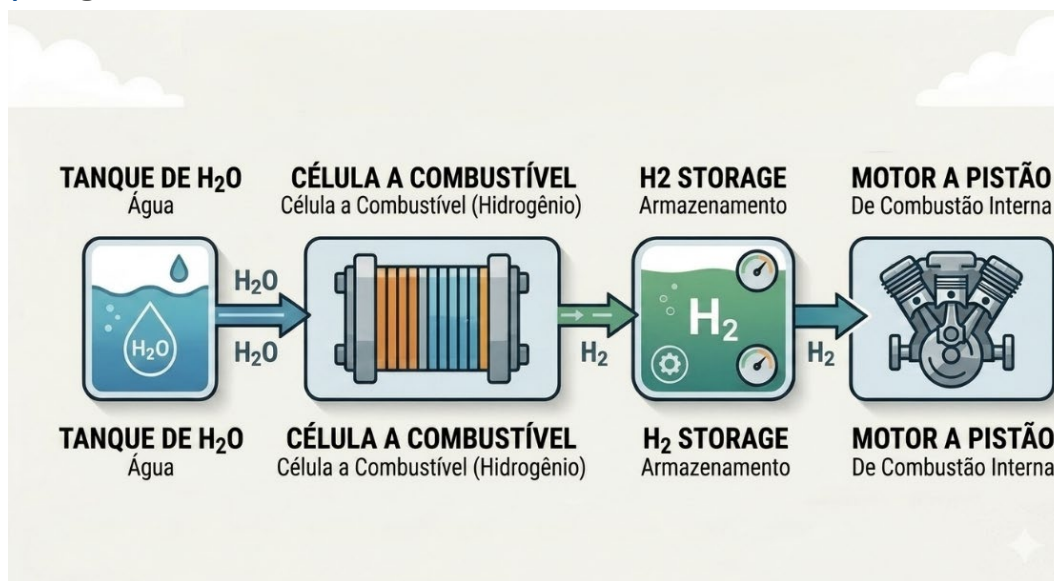
Os processos industriais consolidados, tais como a reforma a vapor do gás natural, revelam-se incompatíveis com plataformas aeroespaciais devido à elevada pegada de massa. Desse modo, a eletrólise da água consolida-se como a tecnologia mais adequada para aplicação embarcada devido à sua modularidade e capacidade de miniaturização (Figura 1 e Figura 2).

Figura 1 | Imagem Ilustrativa do Sistema de Hidrogênio Combustível



Fonte: Autor (2026).

Figura 2 | Imagem Ilustrativa do Sistema de Eletrólise

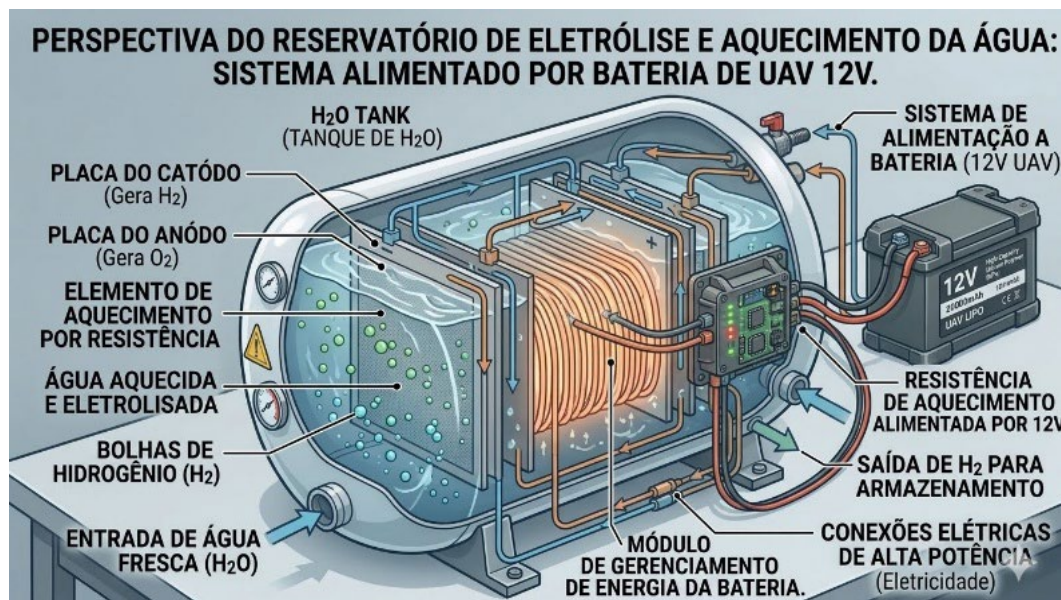


Fonte: Autor (2026).

4. DIMENSIONAMENTO E CÁLCULOS ANALÍTICOS

O equacionamento do sistema integrado exige o balanço entre a geração eletroquímica e o consumo mecânico, conforme esquema abordado na Figura 3.

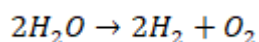
Figura 3 | Imagem Ilustrativa do Dimensionamento do Sistema de Hidrogênio Combustível



Fonte: Autor (2026).

4.1. TAXA DE GERAÇÃO ELETROQUÍMICA DE HIDROGÊNIO

A dissociação molecular da água rege-se pela estequiometria fundamental:



A taxa mássica e volumétrica de evolução do hidrogênio no interior do reator eletrolítico é quantificada a partir das Leis de Eletrólise de Faraday (Faraday, 1834):

$$\text{Taxa de Produção (mol/s)} = \frac{I \cdot \eta}{2 \cdot F}$$

Onde I representa a corrente elétrica (A), η a eficiência do eletrolisador (adimensional, de 0,6 a 0,8) e F a Constante de Faraday (96.485 C/mol). Para expressar o fluxo de gás em termos volumétricos nas condições padrão, aplica-se o volume molar $V_m = 22,4$ L/mol:

$$Taxa\ de\ Produção\ (L/s) = \frac{I \cdot \eta \cdot V_m}{2 \cdot F}$$

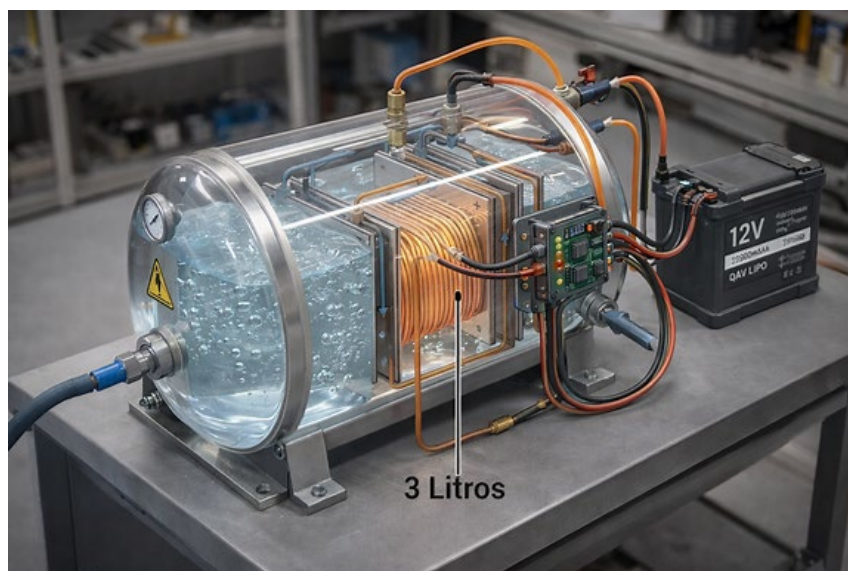
4.2. DEMANDA MÁSSICA DE COMBUSTÍVEL PELO MOTOR

A vazão mássica de combustível ($\dot{m}_{H_2}$) necessária para sustentar a operação do motor sob uma potência nominal determinada (P) é calculada em função do Poder Calorífico Inferior (PCI) do hidrogênio e da eficiência mecânica global do motor (η_{motor}):

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{P}{PCI \cdot \eta_{motor}}$$

Considerando que o PCI do hidrogênio se situa em aproximadamente 120 MJ/kg (atingindo o limiar do Poder Calorífico Superior de 142 MJ/kg (Datta, 2021; ORNL, 2012; CSS, 2025), a massa de água embarcada (representada na Figura 4) deve suportar o pico de demanda propulsiva. A relação de consumo estequiométrico aproxima-se de 9 kg de água para cada 1 kg de gás hidrogênio consumido, orientando a capacidade gravimétrica do reservatório.

Figura 4 | Imagem Ilustrativa do Reservatório de Hidrogênio Combustível

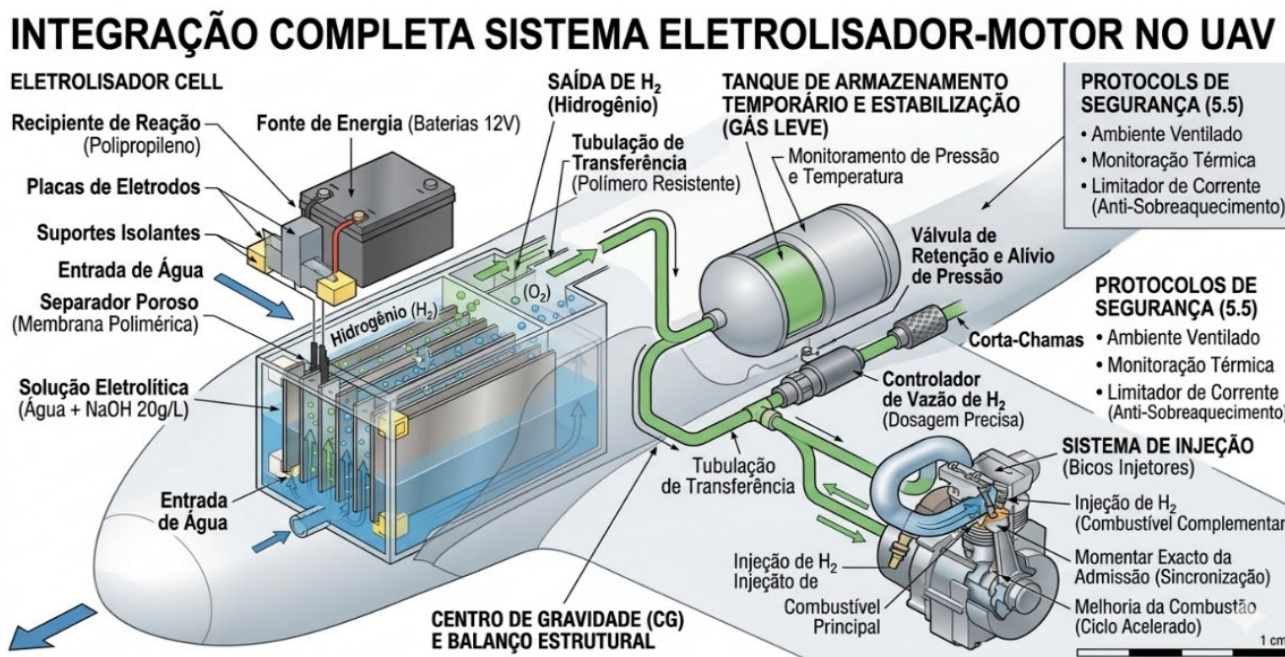


Fonte: Autor (2026).

5. PROJETO CONCEITUAL E INTEGRAÇÃO DO SISTEMA

A configuração em circuito do equipamento embarcado engloba desde a admissão do fluido até a câmara de combustão (Figura 5).

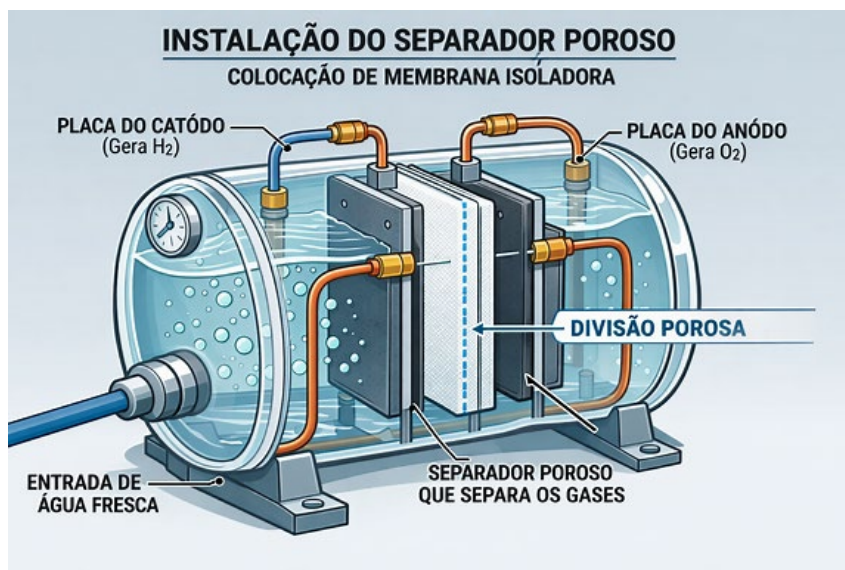
Figura 5 | Imagem Ilustrativa do Sistema de Eletrólise Embarcado no UAV



Fonte: Autor (2026).

O arranjo conceitual do sistema estruturou-se com um reator eletroquímico projetado em matriz de Polipropileno ou PVC. Os eletrodos de aço inoxidável AISI 316 operam submersos em solução condutora de NaOH. Um dos requisitos mandatórios para a mitigação de riscos de pré-ignição e explosão interna é a instalação exata do separador poroso (Figura 6), que permite o fluxo iônico, mas bloqueia o fluxo cruzado de gases inflamáveis (Shuhayeu et al., 2024).

Figura 6 | Imagem Ilustrativa da Instalação do Separador Poroso



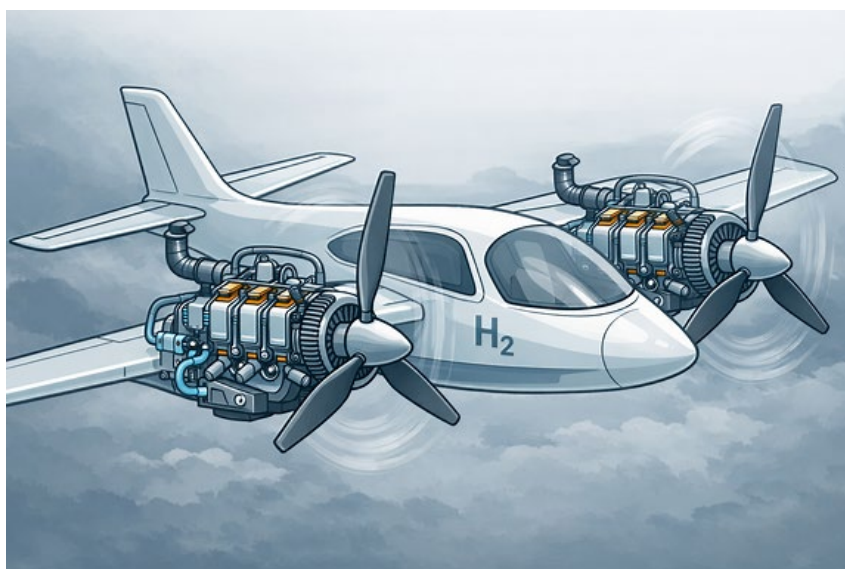
Fonte: Autor (2026).

5.1. DIRETRIZES PARA ADAPTAÇÃO DO MOTOR A PISTÃO

A queima do hidrogênio impõe modificações na estrutura interna do motor de combustão de pequena escala (Figura 7) devido à elevada velocidade de chama laminar do gás e à sua baixa energia de ignição (Oktar et al., 2025).

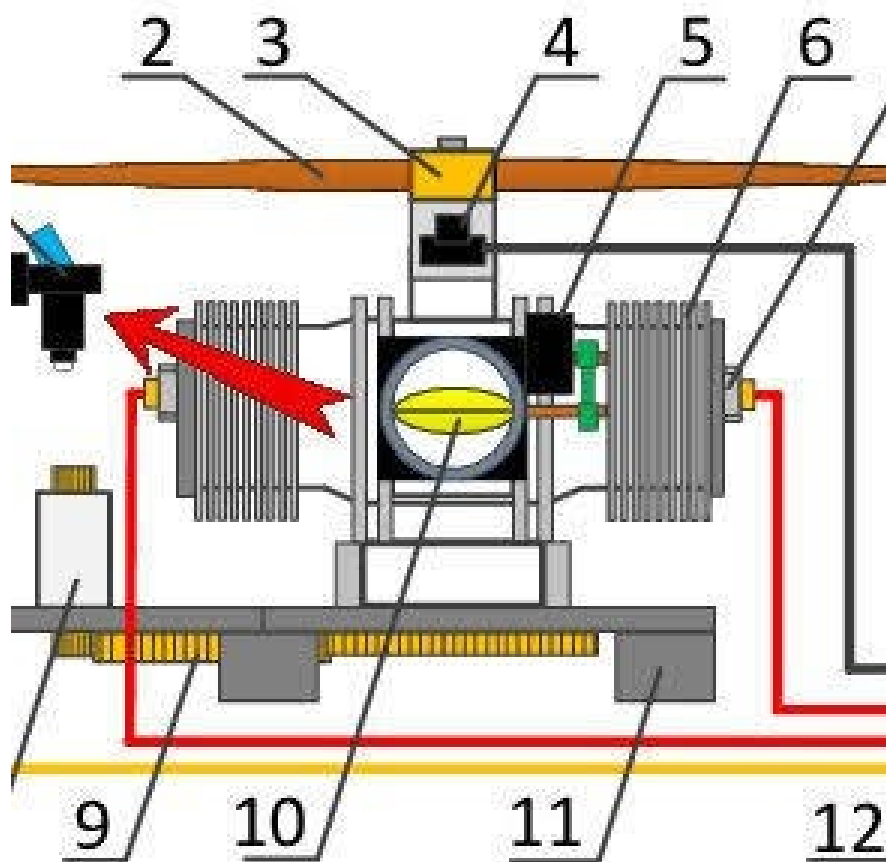
Para o correto acoplamento mecatrônico, a arquitetura do motor deve atender à hierarquia funcional detalhada na Figura 8.

Figura 7 | Imagem Ilustrativa dos Motores a Pistão



Fonte: Autor (2026).

Figura 8 | Diagrama da Estrutura de Funcionamento do motor



Legenda: (1) unidade EFI, (2) hélice de UAV, (3) eixo rotativo, (4) Sensor Hall, (5) motor de direção, (6) bloco do cilindro do motor, (7) ignição CDI, (8) motor de partida, (9) equipamento de transmissão multiestágio, (10) placa de acelerador, (11) pedestal de motor, (12) Unidade ECU.

Fonte: Autor (2026).

As modificações de projeto exigem injeção direta (DI) apenas após o fechamento das válvulas de admissão, velas “frias” de irídio e uma elevação estruturada da taxa de compressão.

6. ASPECTOS REGULATÓRIOS E DE AERONAVEGABILIDADE

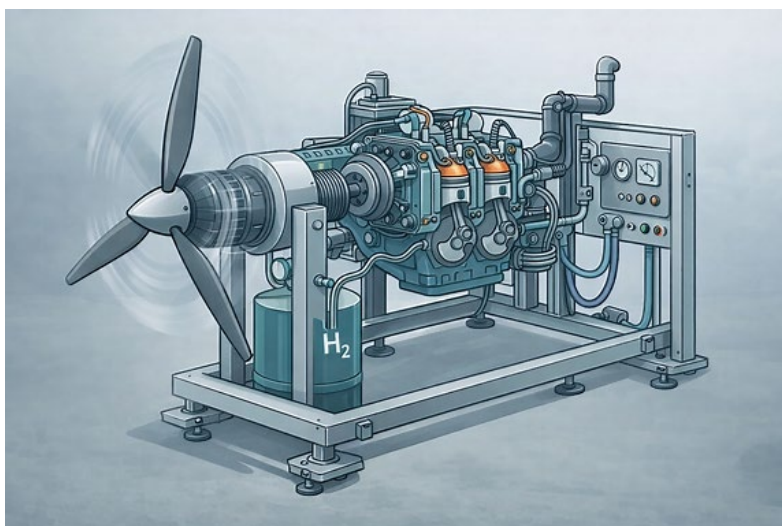
A validação do sistema alinha-se aos cenários regulatórios para plataformas não tripuladas. No contexto nacional, o projeto atende às recomendações da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) pelo Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial (RBAC-E). Internacionalmente, a segurança estrutural do sistema em face da fadiga térmica corrobora os cadernos da EASA e ASTM, demandando redundâncias de sensores de pressão e atuadores automáticos nas válvulas de alívio.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O modelo conceitual proposto demonstra as bases para a integração de sistemas de geração de hidrogênio por eletrólise a bordo de UAVs. Evidenciou-se que a substituição de tanques de armazenamento pressurizados por reservatórios de água reduz a severidade da penalidade de massa estrutural.

Conquanto o balanço energético enfrente restrições termodinâmicas no ciclo fechado operado pelo alternador do veículo, a arquitetura dimensional desenvolvida consolida o referencial teórico indispensável para a próxima fase técnica: a construção do protótipo físico e ensaios de validação em bancada dinamométrica (Figura 9). O foco subsequente recairá sobre o estresse metalúrgico do pistão e a calibração precisa da Unidade de Controle do Motor (ECU).

Figura 9 - Exemplo de Banco de Provas do motor



Fonte: Autor (2026).

REFERÊNCIAS

- CENTER FOR SUSTAINABLE SYSTEMS, UNIVERSITY OF MICHIGAN. **Hydrogen factsheet**. Ann Arbor: University of Michigan, 2025. (Pub. No. CSS23-07).
- DATTA, A. **Comparison of energy storage and high power air-breathing systems for urban air mobility**. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2021. (NASA/CR—20210000284).
- ENCYCLOPEDIA BRITANNICA, INC. **Chemical action of electricity**. Chicago: Encyclopedia Britannica, 2010.
- FARADAY, Michael. Experimental researches in electricity. Seventh series. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 124, p. 77-122, 1834.
- FERREIRA, Rui B. Development and testing of a PEM fuel cell stack envisioning unmanned aerial vehicles applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 15, p. 4567-4580, 2024.
- GONZÁLEZ, Óscar. Fuel cells: a real option for unmanned aerial vehicles propulsion. **Sensors**, v. 14, n. 3, p. 4560-4582, 2014.
- KHZOUZ, Martin; GKANAS, Evangelos I.; STATHEROS, Thomas; GIRELLA, A.; MILANESE, C. Sustainable hydrogen production via LiH hydrolysis for unmanned air vehicle (UAV) applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 8, p. 5384-5394, 2020.
- OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. **Transportation energy data book: edition 31**. Oak Ridge: U.S. Department of Energy, 2012. (ORNL-6987).
- OKTAR, Hilmi Ersin; TONYALI, Ibrahim Hakki; APAYDIN, Ahmet Hamit. A cost-effective and sustainable path to a green future: retrofitting internal combustion engines for hydrogen fuel utilization. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 50, n. 1, p. 456-470, 2025.
- PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed method to select and order relevant scientific literature. **Brazilian Journal of Management**, v. 8, n. 2, p. 133-158, 2015.
- SHUHAYEU, Pavel; MARTSINCHYK, Aliaksandr; MARTSINCHYK, Katsiaryna; MILEWSKI, Jaroslaw. Investigating PEM fuel cells as an alternative power source for electric UAVs: modeling, optimization, and performance analysis. **Energies**, v. 17, n. 17, p. 4427, 2024.
- SUEWATANAKUL, Siwat; PORCARELLI, Alessandro; OLSSON, Adam; GRIMLER, Henrik; CHICHE, Ariel; MARIANI, Raffaello; LINDBERGH, Göran. Conceptual design of a hybrid hydrogen fuel cell/battery blended-wing-body unmanned aerial vehicle—an overview. **Aerospace**, v. 9, n. 5, p. 275, 2022.
- U.S. NAVAL RESEARCH LABORATORY. **NRL shatters endurance record for small electric UAV**. Washington, D.C.: U.S. Naval Research Laboratory, 2013.

