

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Biológicas, Instituto de Ciências Exatas e Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica

Amanda dos Santos da Paixão

**INOVAÇÃO E TECNOLOGIAS DO HIDROGÊNIO EM UNIVERSIDADES: estudo
de caso transnacional**

Belo Horizonte
2025

Amanda dos Santos da Paixão

**INOVAÇÃO E TECNOLOGIAS DO HIDROGÊNIO EM UNIVERSIDADES: estudo
de caso transnacional**

Tese para defesa como pré-requisito do processo de doutoramento no Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da Universidade Federal de Minas Gerais.

Área de concentração: Gestão da Inovação, Propriedade Intelectual e Empreendedorismo

Linha de pesquisa: Empreendedorismo, Trabalho e Competências

Orientador: Prof. Dr. Allan Claudius Queiroz Barbosa.

Belo Horizonte
2025

Ficha Catalográfica

P149i
2025
T Paixão, Amanda dos Santos da.
Inovação e tecnologias do hidrogênio em universidades [manuscrito] : estudo de caso transnacional / Amanda dos Santos da Paixão. 2025.
1 recurso online (196 f. : il., gráfs., tabs., color.) : pdf.

Orientador: Allan Claudius Queiroz Barbosa.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Química (Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica).
Bibliografia: f. 98-105.
Anexos: f. 106-196.

1. Inovações tecnológicas – Teses. 2. Hidrogênio – Teses. 3. Universidades e faculdades – Teses. 4. Empreendedorismo – Teses. I. Barbosa, Allan Claudius Queiroz, Orientador. II. Título.

CDU 043

ATA DA SESSÃO DE DEFESA DA 51ª TESE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, DA DISCENTE AMANDA DOS SANTOS DA PAIXÃO, Nº DE REGISTRO 2020730167.

Aos 27 (vinte e sete) dias do mês de agosto de 2025, no Auditório I do Departamento de Química da UFMG, reuniu-se a Comissão Examinadora composta pelos Professores Doutores: Allan Claudius Queiroz Barbosa do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG (Orientador e presidente da banca), André Luiz da Silva Teixeira da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL, Rosana Zacarias Domingues da GIZ-MME, Igor Augusto de Melo Dias da SKEMA Business School, Márcia Siqueira Rapini Goulart do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG e Rochel Montero Lago Goulart do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG, para julgamento da Tese de Doutorado em Inovação Tecnológica - Área de Concentração: Gestão da Inovação, Propriedade Intelectual e Empreendedorismo, da discente Amanda dos Santos da Paixão, Tese intitulada: **“INOVAÇÃO E TECNOLOGIAS DO HIDROGÊNIO EM UNIVERSIDADES: estudo de caso transnacional”**. O Presidente da Banca abriu a sessão e apresentou a Comissão Examinadora, bem como esclareceu sobre os procedimentos que regem a defesa de tese. Após a exposição oral do trabalho pela discente e arguição pelos membros da Banca Examinadora na ordem registrada acima, com a respectiva defesa da candidata. Finda a arguição, a Banca Examinadora se reuniu, sem a presença da discente e do público, tendo deliberado unanimemente pela sua **APROVAÇÃO**. Nada mais havendo para constar, lavrou-se e fez a leitura pública da presente Ata que segue assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora e pelo coordenador do Programa. Belo Horizonte, 27 de agosto de 2025.



Professor Doutor Allan Claudius Queiroz Barbosa (Orientador e presidente da banca)
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)



Professor Doutor André Luiz da Silva Teixeira
(Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL)

“INOVAÇÃO E TECNOLOGIAS DO HIDROGÊNIO EM UNIVERSIDADES: estudo de caso transnacional.”

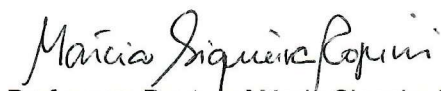
AMANDA DOS SANTOS DA PAIXÃO, Nº DE REGISTRO 2020730167.

Tese Aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Professores Doutores:



Professor Doutor Allan Claudius Queiroz
Barbosa (Orientador e presidente da banca)

(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)



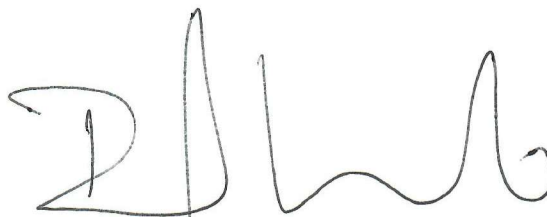
Professora Doutora Márcia Siqueira Rapini

(PPG em Inovação Tecnológica - UFMG)



Professor Doutor André Luiz da Silva Teixeira

(Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL)



Professor Doutor Rochel Montero Lago

(PPG em Inovação Tecnológica - UFMG)



Professora Doutora Rosana Zacarias
Domingues

(GIZ-MME)



Professor Doutor Francisco Vidal Barbosa

Decano do Colegiado do PPG em Inovação
Tecnológica da UFMG



Professor Doutor Igor Augusto de Melo Dias

(SKEMA Business School)

Belo Horizonte, 25 de agosto de 2025.



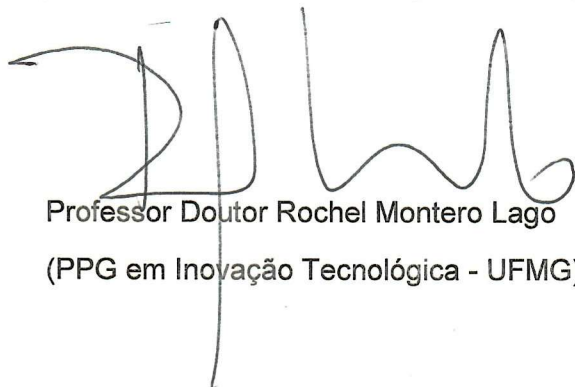
Professora Doutora Rosana Zacarias Domingues
(GIZ-MME)



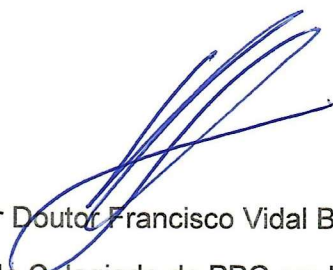
Professor Doutor Igor Augusto de Melo Dias
(SKEMA Business School)



Professora Doutora Márcia Siqueira Rapini
(PPG em Inovação Tecnológica - UFMG)



Professor Doutor Rochel Montero Lago
(PPG em Inovação Tecnológica - UFMG)



Professor Doutor Francisco Vidal Barbosa
Decano do Colegiado do PPG em Inovação Tecnológica da UFMG

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Allan Claudius, pela competência e pelo incentivo, não apenas na orientação deste trabalho, mas no estímulo em alcançar voos mais altos e vivenciar o novo.

À Professora Cristina Parente, pela carinhosa recepção na Universidade do Porto e orientação, e ao grupo Energia e Sociedade, pela rica partilha de conhecimentos.

Aos pesquisadores entrevistados, pela disponibilidade e o interesse em contribuir com esta pesquisa.

À ECI, minha primeira experiência e vivência na UFMG, especialmente aos diretores Terezinha Carvalho e Eduardo Valadares, por facilitar o percurso e incentivar a educação continuada.

Ao Escalab, especialmente à Maria, à Ana e ao Rochel, por serem minha fonte de inspiração diária no trabalho e na vida. Aos amigos que fiz e tanto me motivam: Carol, Jorge e Lets.

Aos amigos que fiz no Porto, que enriqueceram vivência. Vocês foram essenciais a cada momento de adaptação e descoberta: Mariana, Maxi, Jackson, Roberto, Cláudia e Débora; e meus cascos de bala Reginaldo, Carla, Silvane e André.

À Cíntia, meu maior agradecimento, como amiga que acompanha e entende todas as angústias e alegrias deste processo. Você é uma das minhas maiores bases nessa trajetória.

À minha mãe, que nunca mediu esforços para que eu alcançasse meus sonhos. Seu amor e incentivo são fundamentais para minhas conquistas. À família Santos, alicerce de tudo, especialmente ao meu primo Leo.

Ao meu pai, meu maior exemplo de resiliência, e à Família Paixão, que tanto amo.

Aos meus irmãos Laurinha, Bebeto e Ico, por serem meu porto seguro de carinho e companheirismo em todas as fases da vida, principalmente nos momentos mais decisivos.

À Tia-mãe Marise, Tia Dora, Bia, Ivo, Dê e Robinho: jamais esquecerei o quanto vocês fizeram por mim. Estaremos sempre juntos.

Às minhas amigas de vida que tanto me inspiram: Ana Silvia, Gra, Suellen, Ritinha, Marina, Aline e Sara. Juntas aprendemos a partilhar os desejos e a almejar a independência enquanto mulheres. Tenho por vocês imenso carinho.

Aos amigos do Kabuto, que estão comigo diariamente, tornando meus dias mais leves e alegres, especialmente: Rê, Lets e Lucas.

Aos meus amores Ana Clara, Henrique, Bia e Isadora. A titia/dindinha tem em vocês todo o amparo do mundo.

A Deus, pelas bênçãos concedidas durante a vida.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bolsa processo nº 200060/2024-4/SWE.

RESUMO

Esta tese busca analisar como universidades em diferentes sistemas nacionais de inovação participam do desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio, considerando seus tipos, aplicações industriais e distintos estágios na cadeia produtiva nos contextos brasileiro e português. A pesquisa baseia-se na corrente neoschumpeteriana e nas abordagens multissistêmicas de transições sociotécnicas, para analisar o papel das universidades no desenvolvimento de tecnologias sistêmicas complexas, considerando as contribuições e as possíveis limitações do modelo da Hélice Tríplice no contexto de tecnologias que podem demandar coordenação entre múltiplas universidades e sistemas sociotécnicos. Adotou-se estratégia metodológica de estudos de casos múltiplos, contemplando a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Universidade do Porto (UPorto), com metodologia que combina análise qualitativa, mediante entrevistas semiestruturadas com 11 pesquisadores, para mapear arranjos institucionais, tipos de tecnologia, financiamento, maturidade tecnológica e visões dos especialistas sobre a economia do hidrogênio, e análise quantitativa, que envolveu 128 projetos de pesquisa, distribuídos entre 47 instituições brasileiras, por meio de agências de fomento e fundações de pesquisa (CNPq, FINEP, ANP, FAPEMIG, FUNDEP e FCO), para contextualizar o posicionamento da UFMG no sistema nacional. Os resultados qualitativos evidenciam modelos institucionais distintos: o modelo português caracteriza-se, em sua maioria, por institutos de interface com participação empresarial direta na governança; o modelo brasileiro se organiza, majoritariamente, por departamentos universitários, com mediação de fundações de apoio, e arranjos como o projeto de extensão Escalab, no caso da UFMG. A análise sobre a fase da cadeia produtiva das tecnologias demonstra complementaridades: a UFMG concentra cerca de 80% dos desenvolvimentos em produção de hidrogênio, enquanto a UPorto apresenta distribuição equilibrada entre produção (50%), armazenamento (33%) e distribuição (33%). O mapeamento quantitativo demonstra posicionamento marginal da UFMG no sistema nacional (2,5% dos projetos totais) comparativamente à USP (21,1% dos projetos) e UFV (10,9% dos projetos). A análise temporal evidencia concentração de 73,4% dos projetos brasileiros no período 2021-2025, coincidindo com políticas de transição energética. A pesquisa contribui teoricamente para expansão das perspectivas multissistêmicas, ao demonstrar que universidades assumem papel de articulação sistêmica entre diferentes domínios sociotécnicos, evidenciando limitações do modelo da Hélice Tríplice para tecnologias que demandam coordenação horizontal entre múltiplas universidades e sistemas. Os achados sugerem que janelas de oportunidade tecnológica permitem a economias emergentes desenvolver capacidades competitivas simultaneamente a países desenvolvidos. A tese oferece evidências empíricas sobre como universidades em sistemas periféricos de inovação se posicionam no desenvolvimento técnico e econômico de tecnologias sistêmicas essenciais para transições sustentáveis.

Palavras-chave: hidrogênio; sistemas de inovação; universidades empreendedoras; transições sociotécnicas; tecnologias multissistêmicas.

ABSTRACT

This thesis seeks to analyze how universities in different national innovation systems participate in the development of hydrogen technologies, considering their types, industrial applications and different stages in the production chain in the Brazilian and Portuguese contexts. The research is based on the neo-Schumpeterian current and multisystem approaches to socio-technical transitions, to analyze the role of universities in the development of complex systemic technologies, considering the contributions and possible limitations of the Triple Helix model in the context of technologies that may require coordination between multiple universities and socio-technical systems. A methodological strategy of multiple case studies was adopted, covering the Federal University of Minas Gerais (UFMG) and the University of Porto (UPorto), with a methodology that combines qualitative analysis, through semi-structured interviews with 11 researchers, to map institutional arrangements, types of technology, funding, quantitative analysis, which involved 128 research projects, distributed among 47 Brazilian institutions, through funding agencies and research foundations (CNPq, FINEP, ANP, FAPEMIG, FUNDEP and FCO), to contextualize UFMG's position in the national system. The qualitative results show different institutional models: the Portuguese model is mostly characterized by interface institutes with direct business participation in governance; the Brazilian model is mostly organized by university departments, mediated by support foundations, and arrangements such as the Escalab extension project, in the case of UFMG. The analysis of the stage of the technology production chain shows complementarities: UFMG concentrates around 80% of developments in hydrogen production, while UPorto has a balanced distribution between production (50%), storage (33%) and distribution (33%). The quantitative mapping shows UFMG's marginal position in the national system (2.5% of total projects) compared to USP (21.1% of projects) and UFV (10.9% of projects). The temporal analysis shows a concentration of 73.4% of Brazilian projects in the 2021- 2025 period, coinciding with energy transition policies. The research contributes theoretically to the expansion of multisystem perspectives, by demonstrating that universities play a systemic articulation role between different socio-technical domains, highlighting the limitations of the Triple Helix model for technologies that require horizontal coordination between multiple universities and systems. The findings suggest that windows of technological opportunity allow emerging economies to develop competitive capabilities simultaneously with developed countries. The thesis offers empirical evidence on how universities in peripheral innovation systems position themselves in the technical and economic development of systemic technologies essential for sustainable transitions.

Keywords: hydrogen; innovation systems; entrepreneurial universities; socio-technical transitions; multisystem technologies.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ALiCE - Laboratório Associado em Engenharia Química

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DEMEGI - Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

ECOLAB - Laboratório Colaborativo em Soluções Ambientais

EMBRAPII - Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial

ESCALAB - Centro de Escalonamento de Tecnologias

FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

FCO - Fundação Christiano Ottoni

FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

FUNDEP - Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa

H₂ - Hidrogênio

HRS - Estações de Reabastecimento de Hidrogênio

HYLAB - Laboratório Colaborativo em Tecnologias do Hidrogênio

ICEx - Instituto de Ciências Exatas

IEA - International Energy Agency

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

INES - Instituto de Energia Sustentável

INESC TEC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência

IPLeiria - Instituto Politécnico de Leiria

ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica

LAQV - Laboratório Associado para a Química Verde

LAETA - Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica

LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia

LSRE-LCM - Laboratório de Processos de Separação e Reação - Laboratório de Catálise e Materiais

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

RAIL LAB - Laboratório Colaborativo em Tecnologias Ferroviárias

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

TRL - Technology Readiness Level (Nível de Prontidão Tecnológica)

UCS - Universidade de Caxias do Sul

UECE - Universidade Estadual do Ceará

UFBA - Universidade Federal da Bahia

UFG - Universidade Federal de Goiás

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UFTM - Universidade Federal do Triângulo Mineiro

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

UFV - Universidade Federal de Viçosa

UnB - Universidade de Brasília

UNESP - Universidade Estadual Paulista

UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

UNIEMP - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

UPorto - Universidade do Porto

USP - Universidade de São Paulo

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese Teórica da Tese	36
Quadro 2 – Detalhamento das Entrevistas UFMG.....	40
Quadro 3 – Detalhamento das Entrevistas UPorto	41
Quadro 4 – Classificação do Hidrogênio	44
Quadro 5 – Análise comparativa: plataforma desenvolvida versus Inova-e MCTI	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais aplicações da amônia (NH_3) e intensidade de uso.	50
Figura 2 – Posicionamento das universidades no Sistema Nacional de Hidrogênio.....	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	<i>Inovação: bases conceituais</i>	22
2.2	<i>Sistemas de Inovação</i>	25
2.3	<i>Sistemas Setoriais de Inovação</i>	27
2.4	<i>Sistemas Tecnológicos de Inovação</i>	28
2.5	<i>Perspectivas Multissistêmicas</i>	29
2.6	<i>Universidades Empreendedoras</i>	32
2.7	<i>Síntese Teórica</i>	35
3	METODOLOGIA	37
3.1	<i>Estudo de Caso Múltiplo: Justificativa e Critérios de Seleção</i>	37
3.2	<i>Planejamento dos Métodos de Coleta de Dados</i>	37
3.3	<i>Coleta de Dados Qualitativos</i>	39
3.4	<i>Coleta de Dados Quantitativos</i>	42
3.5	<i>O Locus e a tecnologia estudada: Hidrogênio com suas características técnicas e econômicas</i>	43
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	56
4.1	<i>O Caso Português: Uporto e Institutos de Interface</i>	6356
4.2	<i>O Caso Brasileiro e a UFMG</i>	63
5	ANÁLISE QUALITATIVA	68
5.1	<i>Análise por Dimensão</i>	68
5.2	<i>UFMG no contexto nacional</i>	77
5.3	<i>Análise geral sobre o posicionamento da UFMG</i>	84
5.4	<i>Análise das chamadas públicas: direcionamento setorial e estratégico</i>	84
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
7	PRODUTO TECNOLÓGICO	93
7.1	<i>Apresentação</i>	93

7.2	<i>Componentes técnicos e funcionais</i>	93
7.3	Aplicação no ESCALAB.....	95
7.4	<i>Contribuição Sistêmica ao Ecossistema de Inovação</i>	96
7.5	<i>Suporte à Formulação de Políticas Públicas Baseadas em Evidências</i>	96
7.6	<i>Expansão da Metodologia</i>	96
REFERÊNCIAS		98
ANEXO A – Transcrição das Entrevistas		106
ANEXO B – Distribuição de Projetos por Chamada Pública.....		126

1 INTRODUÇÃO

Esta tese procurou analisar as trajetórias de desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio (H_2), identificando os diferentes arranjos institucionais e áreas de especialização na cadeia produtiva desse vetor energético em duas universidades de diferentes países. Este debate se insere no contexto da mudança nos sistemas energéticos que se desenvolveu a partir da segunda metade do século XIX, e se apoia nas pesquisas seminais de Jean-Baptiste Joseph Fourier sobre o aquecimento global.

A mobilização científica e política em torno dessa temática intensificou-se durante a década de 1970 (Oliveira, 2019), devido à crise do petróleo. Diferentemente do contexto histórico, evidências contemporâneas demonstram que as perturbações sistêmicas, anteriormente centradas no setor petrolífero, ocorrem atualmente em múltiplos setores energéticos, expondo a crescente complexidade dos processos de transição. Nesse cenário, em que a crise energética impacta simultaneamente diversas categorias de combustíveis fósseis, o hidrogênio assume um potencial estratégico.

A complexidade pode ser ainda maior devido à interconectividade econômica global superior à observada há cinco décadas, o que aumenta o impacto das questões energéticas (IEA, 2022). Adicionalmente, eventos geopolíticos contemporâneos, exemplificados pelo conflito Rússia-Ucrânia, também reposicionam a energia como elemento estratégico central, estimulando iniciativas nacionais voltadas à autonomia energética (Mazzucato; Perez, 2023).

Dessa maneira, a busca global pela descarbonização da economia posiciona esse elemento como um vetor-chave na transição energética, atraindo o interesse de diversos atores e países de diferentes perfis econômicos, apesar de as nações em desenvolvimento manterem uma posição periférica nesse cenário (Abdin *et al.*, 2020; Lindner, 2023; Yap; Mclellan, 2023).

Em meio a essas transformações sistêmicas, os vetores energéticos alternativos assumem um papel relevante no cenário global de descarbonização. O H_2 é um transportador de energia que pode ter aplicações em uma variedade de processos produtivos, como os de ferro, aço, amônia, cimento, refino de petróleo e mobilidade (Zuben *et al.*, 2022). Assim, esse elemento pode ser utilizado em uma ampla gama de tecnologias de descarbonização industrial e mobilidade sustentável (Rifkin, 2003).

É importante ressaltar que essas transformações estão representadas nos marcos regulatórios internacionais, que demonstram a crescente institucionalização das respostas aos problemas climáticos e energéticos, traduzindo-se em normas específicas para o

desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao H₂. O Protocolo de Kyoto (1997) apresentou as diretrizes internacionais para a redução das emissões de gases de efeito estufa, abrindo caminho para o Acordo de Paris (2015), que estabeleceu metas quantitativas mais precisas: a redução do aumento da temperatura média global em níveis inferiores a 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com uma limitação preferencial de 1,5°C até 2030. Esse acordo reúne 196 nações signatárias, incluindo Brasil e Portugal (United Nations, 2015).

Embora o acordo estabeleça que nações desenvolvidas devem fornecer assistência financeira e tecnológica aos países em desenvolvimento, a disparidade entre os países transparece no número e na natureza das políticas públicas voltadas às tecnologias desse elemento energético. A Alemanha, por exemplo, desenvolveu 31 políticas específicas, incluindo o Fundo Especial de Clima e Transformação, que direciona investimentos para a implementação de tecnologias na produção industrial. Os Estados Unidos, desde 2003, estabeleceram 23 políticas, com destaque para o Programa de Hidrogênio e Células de Combustível. Em contraste, Portugal apresenta 14 políticas, majoritariamente focadas em gases renováveis, enquanto o Brasil não consta na base de dados da IEA com políticas específicas para esse setor (IEA, 2025).

Essa disparidade política aparece também na produção científica, que está concentrada em nações altamente industrializadas. A maior parte das pesquisas aborda aspectos técnicos da cadeia de valor e desafios da produção em escala industrial, representando os interesses e as demandas de países desenvolvidos (Aba; Sauer; Amado, 2024; Kovač; Paranos; Marciuš, 2021; Lebrouhi *et al.*, 2022; Panchenko *et al.*, 2023; Rasul *et al.*, 2022). A distribuição assimétrica da produção acadêmica, identificada por Lindner (2023), está relacionada com uma prática crescente: as nações industrializadas formulam políticas nacionais para importar H₂ verde produzido em países em desenvolvimento e com abundância de recursos energéticos renováveis.

As parcerias internacionais nesse sentido, embora contemplem projetos e cooperação científica, apresentam déficits na análise de fatores sociopolíticos, priorizando agendas econômicas dos países centrais, em detrimento do desenvolvimento integral das nações produtoras.

Não obstante a ausência de representatividade na IEA, o Brasil tem avançado nas políticas de incentivo ao H₂ nos últimos anos. Esse elemento consolidou-se como instrumento-chave em políticas energéticas nacionais, como demonstrou o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), criado em 2021 pelo Conselho Nacional de Política Energética através da

Resolução nº 6/2022 e atualizado pela Resolução nº 4 de março de 2023, que estabeleceu as bases para fortalecer o mercado.

Em paralelo às iniciativas regulatórias, esse vetor energético é tido como elemento central em uma das principais parcerias internacionais brasileiras: a cooperação Brasil-Alemanha, por meio do projeto H2Brasil, criado em 2021 pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). O Marco Legal do Hidrogênio (Lei nº 14.948/2024) complementou o programa, ao definir os parâmetros regulatórios, incluindo o limite de 7 kg de CO₂ equivalente por kg produzido.

Diante dessa crescente relevância política e econômica, pesquisar sobre a trajetória de tecnologias que envolvem o uso do H₂ constitui uma preocupação em países que buscam protagonismo na transição energética. Apesar disso, a literatura demonstra padrões cíclicos de pesquisa, nos quais as mídias e os roadmaps tecnológicos foram constantemente reformulados, seguindo uma perspectiva que carece de contextualização histórica (Yap; Mclellan, 2023).

No Brasil, embora existam estudos técnicos setoriais (CNI, 2022; Ipea, 2022; MME, 2021), análises abrangentes envolvendo os tipos de tecnologias do H₂ ainda são escassas. A contribuição de Chantre (2022) é uma exceção no campo, por analisar as perspectivas de diferentes atores institucionais, tais como representantes empresariais, governamentais e acadêmicos, sobre o futuro desse elemento, com base em opiniões de especialistas.

A análise bibliométrica realizada com a ferramenta Connected Papers, com base no estudo de Chantre (2022), confirmou a fragmentação da literatura nacional, demonstrando uma distribuição dispersa dos nós, com tamanhos específicos para o número de ocorrências e cores representativas da época das publicações. Essa visualização indica uma ausência de ligação entre os estudos existentes, o que pode comprometer o entendimento do progresso tecnológico, das demandas setoriais e das políticas públicas para a economia desse vetor energético no país.

Paralelamente, a literatura sobre transições tecnológicas, fundamentada na economia neoschumpeteriana, oferece bases conceituais sólidas que, quando articuladas com abordagens sociotécnicas contemporâneas, proporcionam compreensão mais abrangente desse caso específico. A abordagem multinível, concebida por Geels (2004), estrutura as dinâmicas de transição em três níveis – nicho, regime e paisagem –, constituindo uma das lentes teóricas mais utilizadas nos estudos contemporâneos de transições sustentáveis (Agnolucci, 2007; Bakhuis *et al.*, 2025; Høyland; Kjestveit; Østgaard Skotnes, 2023; Schwabe, 2024). Complementarmente, as perspectivas multissistêmicas desenvolvidas por Markard (2018, 2020) emergiram como contribuições relevantes, ao reconhecerem que transições tecnológicas contemporâneas,

especialmente aquelas orientadas para sustentabilidade, requerem transformações coordenadas que perpassam múltiplos sistemas sociotécnicos simultaneamente.

Nesse sentido, é relevante destacar, ainda, que a busca pela economia do hidrogênio representa uma janela de oportunidade (Geels, 2004; Rosenbloom, 2020; Perez, 2002) para as economias em desenvolvimento, em paralelo às economias líderes, uma vez que há uma busca global pelo uso desse elemento como estratégia para a descarbonização.

Portanto, a questão central que orienta esta pesquisa é: como universidades em diferentes sistemas nacionais de inovação participam do desenvolvimento de tecnologias do H₂, considerando seus tipos e distintos estágios na cadeia produtiva e os contextos em que se inserem? Adicionalmente, no caso brasileiro, qual é o panorama quantitativo da pesquisa nessa área e como ele contextualiza o caso específico da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)?

Para isso, a pesquisa se desdobrou em quatro objetivos específicos. Primeiro, mapear e descrever as tecnologias de hidrogênio desenvolvidas na UFMG e na Universidade do Porto (UPorto), com foco nos arranjos institucionais, nos tipos de tecnologia, no financiamento e na maturidade tecnológica. Segundo, categorizar as tecnologias universitárias em cada caso nacional, conforme sua inserção nos segmentos da cadeia produtiva – produção, armazenamento e distribuição – e compreender se há aplicação industrial específica. Terceiro, compreender a visão de opinião dos especialistas sobre a economia do hidrogênio em cada caso, considerando as especificidades dos sistemas de inovação. Quarto, como objetivo complementar à pesquisa na UFMG, mapear e analisar as tecnologias de hidrogênio nas universidades brasileiras, mediante busca de projetos em agências de fomento, chamadas públicas e editais.

Portanto, o estudo de dois casos em universidades de diferentes países (Universidade Federal de Minas Gerais, no Brasil, e Universidade do Porto, em Portugal) tem como lastro, a despeito das diferenças nas trajetórias nacionais, um histórico de cooperação bilateral entre Brasil e Portugal, a partir da Declaração Conjunta da XIII Cimeira Portugal-Brasil, em 2023. Nesse documento, o H₂ emerge como aspecto relevante da parceria que une a experiência portuguesa em energia renovável com o potencial brasileiro de produção em larga escala (Ministério das Relações Exteriores, 2023).

Esta tese se estrutura em cinco capítulos: após esta introdução, o segundo capítulo apresenta o referencial teórico que fundamenta a análise, articulando três pilares conceituais complementares. Primeiramente, discute-se a economia neoschumpeteriana e as teorias de sistemas de inovação, que mantêm o locus da inovação nas empresas e estabelecem as bases

institucionais e as complexidades necessárias para o desenvolvimento tecnológico. Em seguida, abordam-se as teorias de transições sociotécnicas, que integram a dimensão social e oferecem perspectivas específicas para analisar tecnologias como o hidrogênio, incluindo dinâmicas de acoplamento entre sistemas e abordagens multissistêmicas. Por fim, explora-se a literatura sobre universidades empreendedoras, para posicionar o papel das instituições de ensino superior no desenvolvimento tecnológico e na articulação com outros atores do sistema de inovação.

O terceiro capítulo detalha a metodologia empregada na pesquisa, explicitando os procedimentos de coleta e análise de dados em cada contexto nacional, bem como a caracterização técnica do hidrogênio e suas múltiplas possibilidades de inserção em diferentes aplicações setoriais. Essa contextualização técnica é essencial para trazer complexidade analítica ao estudo e posicionar adequadamente a pesquisa no debate sobre desenvolvimento tecnológico, permitindo compreender como diferentes segmentos da cadeia produtiva demandam competências científicas específicas das universidades. O quarto capítulo apresenta os resultados dos dois casos estudados, e o quinto capítulo traz as considerações finais e as recomendações decorrentes do estudo, destacando as implicações teóricas e práticas da pesquisa para o desenvolvimento de políticas de fomento às tecnologias relacionadas a esse vetor energético estratégico para a transição global rumo à sustentabilidade. Completam esta tese um produto tecnológico, bem como os anexos e as referências bibliográficas utilizadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo adotou uma abordagem conceitual que integra pilares teóricos complementares, possibilitando uma interpretação multidimensional do fenômeno em análise. O primeiro pilar fundamenta-se na economia evolucionista (Dosi, 1988; Freeman, 1995; Lundvall, 2007; Winter; Nelson, 1983), enquanto o segundo integra abordagens sociotécnicas e multissistêmicas contemporâneas. (Geels, 2004, 2019; Rosenbloom, 2020; Markard, 2008).

No presente estudo, as abordagens teóricas não foram empregadas para classificar o fenômeno em modelos pré-estabelecidos, mas sim como estruturas interpretativas que oferecem uma visão abrangente para as discussões. Essa articulação teórica permite uma avaliação mais contextualizada das instituições de ensino superior como protagonistas estratégicas na geração de conhecimento científico e tecnológico, essenciais em nações periféricas que almejam firmar uma posição na crescente economia do hidrogênio renovável.

Dessa maneira, a análise sobre as trajetórias de desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio em universidades requer articulação teórica que contemple as especificidades desse objeto de estudo. A corrente neoschumpeteriana é uma base importante para entender o papel das universidades em sistemas de inovação em países emergentes, como Brasil e Portugal. Essa abordagem oferece reflexões que ajudam a analisar essa relação (Albuquerque; Silva; Póvoa, 2005).

A abordagem multinível proposta por Geels (2002) se faz essencial, pois o hidrogênio é um elemento de transição não apenas econômica, mas também social. Essa perspectiva se estabeleceu como uma das principais referências nos estudos atuais sobre transição energética e processos de descarbonização. As abordagens multissistêmicas, propostas por Markard (2018; 2020) e Rosenbloom (2020), ganham relevância adicional ao reconhecerem que tecnologias como o hidrogênio requerem a coordenação entre diversos sistemas, ultrapassando as relações verticais usualmente destacadas na literatura sobre transições. Portanto, Markard (2018) contribui para a sistematização das interações horizontais entre diversos sistemas, ao passo que Rosenbloom (2020) fornece ferramentas analíticas para entender acoplamentos funcionais, locais emergentes de interação e padrões de interação sistêmica que são característicos das tecnologias multissistêmicas. As seções subsequentes desenvolvem cada uma dessas perspectivas teóricas, demonstrando suas contribuições específicas e as limitações identificadas, estabelecendo um conjunto de bases conceituais para a análise empírica.

É relevante ressaltar, ainda, que a compreensão do papel das universidades nas tecnologias que envolvem o hidrogênio requer uma análise contextualizada sobre diferentes

aplicações dessa tecnologia. Para isso, esta pesquisa identifica as fases das cadeias produtivas nas quais o hidrogênio apresenta potencial de aplicação, proporcionando uma conexão com as possíveis demandas industriais. Em áreas como as de siderurgia, fertilizantes, química, mobilidade, refino de petróleo, cimento e mineração, há necessidades específicas para a integração desse elemento, seja como agente redutor, seja como matéria-prima ou vetor energético.

Essa caracterização não constitui o objetivo central da pesquisa, mas oferece o suporte para analisar como as capacidades científicas desenvolvidas nas universidades se alinham ou divergem das necessidades tecnológicas específicas de cada indústria. Tal abordagem permite identificar gargalos tecnológicos em que a pesquisa acadêmica pode exercer maior influência transformadora, e também as possíveis trajetórias de transferência de conhecimento e cooperação institucional. Ao articular as atividades universitárias com as possíveis demandas industriais, o trabalho oferece uma perspectiva integrada, que contribui para a formulação de políticas de ciência, tecnologia e inovação mais precisas e contextualizadas às realidades nacionais estudadas.

O marco teórico descrito na sequência apresenta o desdobramento acerca das teorias de transições sociotécnicas, sistemas setoriais de inovação e papel das universidades nos sistemas nacionais de inovação.

2.1 Inovação: bases conceituais

O desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio em universidades requer uma compreensão dos processos tecnológicos. Essa análise inicia-se pelos fundamentos evolucionistas, que, ao romper com a visão neoclássica de equilíbrio, estabeleceram as bases para compreender a inovação como processo endógeno e transformador dos sistemas econômicos.

A teoria neoclássica, predominante no pensamento econômico até a década de 1980, fundamentou-se em uma compreensão limitada do processo inovador, ao considerá-lo como um fator exógeno ao sistema econômico (Sharif, 2006). Essa perspectiva, baseada na racionalidade e no equilíbrio dos mercados, reduzia a complexidade da inovação a um problema de alocação eficiente de recursos, desconsiderando os aspectos sistêmicos e institucionais do processo inovador. O modelo linear de inovação era considerado, pois implicava uma progressão sequencial e unidirecional, iniciando com a pesquisa básica, passando para a pesquisa aplicada, o desenvolvimento experimental, a produção e, finalmente, a difusão no mercado (Cohen; Nelson; Walsh, 2002). Como argumenta Freeman (1995), essa concepção

linear não somente ignorava as complexas retroalimentações entre diferentes etapas do processo inovador, como subestimava o papel das interações entre diferentes atores e instituições na geração e na difusão de inovações.

Foi nesse contexto que a contribuição de Joseph Schumpeter emergiu, introduzindo uma visão da inovação como força motriz da dinâmica capitalista. No início do século XX, diante de um período de intensas mudanças econômicas e sociais, Joseph Schumpeter (1939) desenvolveu a concepção de "destruição criadora", perspectiva que compreende a inovação como uma força disruptiva e transformadora do sistema econômico. Schumpeter definiu inovação como a implementação comercial bem-sucedida de algo novo, seja por produtos, seja por processos de produção ou estruturas organizacionais, posicionando-a como um motor central do progresso capitalista (Sharif, 2006). Assim, em contraste com a visão neoclássica, que pressupunha uma trajetória linear e previsível do progresso tecnológico, o autor argumentou que o processo inovador é caracterizado por descontinuidades e rupturas que transformam endogenamente uma estrutura econômica (Nelson, 1993; Nelson; Winter, 2004).

Esse processo de destruição criadora pode ocorrer em diferentes dimensões do sistema econômico. No nível microeconômico, ocorre por meio da substituição de produtos, processos e organizações obsoletas por outros mais eficientes. No nível macroeconômico, resulta em transformações estruturais que alteram a própria configuração de mercados e setores econômicos. De acordo com Perez (2010), o conceito possibilita compreender como as revoluções tecnológicas provocam mudanças não somente nas estruturas produtivas, mas também nas instituições sociais e econômicas que as sustentam (Dosi, 1988).

Schumpeter (1911) atribuiu ao empresário inovador o papel central no processo de destruição criadora. Esse empresário era caracterizado como um indivíduo dotado de qualidades, capaz de identificar oportunidades e implementar novas tecnologias produtivas, superando as resistências sociais e econômicas à mudança (Freeman, 1975). No entanto, as transformações do capitalismo nas décadas de 1920 e 1930, caracterizadas pelo surgimento das grandes corporações e pela institucionalização da pesquisa e desenvolvimento, levaram Schumpeter a reformular sua teoria.

Em *Capitalismo, Socialismo e Democracia* (1942), o autor retrata que o processo inovador se tornou mais complexo e institucionalizado, com uma grande empresa emergindo como o principal locus de atividade inovadora. Como destacam Nelson e Winter (1982), essa transição refletia uma mudança estrutural no capitalismo, em que equipes especializadas de P&D e processos sistêmicos de inovação substituíram progressivamente o papel do inventor-empresário individual. Essa evolução do pensamento schumpeteriano, conforme argumentam

Sharif (2006) e, antecipou características básicas do capitalismo moderno, como a separação entre propriedade e gestão e a crescente importância das capacidades organizacionais nos processos de inovação.

Perez (2010) demonstra que o desenvolvimento da teoria schumpeteriana foi influenciado pelo contexto histórico da Segunda Revolução Industrial, período caracterizado por mudanças tecnológicas radicais, como a eletrificação, o motor a combustão interna e os avanços da química industrial, que representaram rupturas profundas nas estruturas produtivas e sociais existentes. Apesar da contribuição seminal de Schumpeter, o desenvolvimento de uma teoria evolucionista da inovação requeria avanços conceituais. As transformações do capitalismo no pós-guerra, caracterizadas pela crescente complexidade tecnológica e pela institucionalização da P&D, demandavam arcabouços teóricos sistêmicos para compreender os processos de mudança tecnológica.

Nesse contexto, emergiu a corrente neoschumpeteriana, nas décadas de 1970 e 1980. Nelson e Winter (1982) estabeleceram as bases de uma teoria evolucionista, ao propor que as firmas operam segundo rotinas caracterizadas por padrões regulares e previsíveis de comportamento, os quais são gradualmente modificados por processos de busca e seleção. Dosi (1988) complementou essa visão ao desenvolver os conceitos de paradigmas e trajetórias tecnológicas, demonstrando como o progresso técnico segue direções específicas definidas por heurísticas de busca e conhecimentos tácitos acumulados. Essas trajetórias não são aleatórias, mas condicionadas por características cognitivas, econômicas e institucionais que delimitam o espaço de busca por soluções tecnológicas.

Na perspectiva evolucionista, embora as empresas permaneçam como lócus principal da inovação, as universidades são reconhecidas por desempenharem papéis fundamentais. Em tecnologias baseadas em ciência, como exemplifica o caso do hidrogênio, as universidades atuam como fontes de conhecimento, formação de recursos humanos especializados e, em contextos específicos, espaços de experimentação em que incertezas tecnológicas fundamentais podem ser exploradas sem retornos imediatos.

Esses fundamentos evolucionistas estabeleceram bases para compreender que a inovação não ocorre isoladamente, mas em contextos institucionais específicos nos quais interagem diversos atores e instituições. O reconhecimento de que diferentes arranjos institucionais nacionais influenciam os padrões de inovação levou ao desenvolvimento da abordagem de sistemas de inovação, que será explorada na próxima seção.

2.2 Sistemas de Inovação

A compreensão evolucionista de que a inovação emerge de processos interativos levou ao desenvolvimento de abordagens sistêmicas. Se a inovação não é um ato isolado, mas resultado de complexas interações entre atores, instituições e conhecimentos, tornou-se primordial compreender os sistemas nos quais esses elementos se articulam. Esta seção explora a evolução das abordagens sistêmicas, desde a perspectiva nacional até as especializações setoriais e tecnológicas, estabelecendo as bases para compreender o papel das universidades nesses diferentes níveis sistêmicos.

As origens das abordagens sobre sistemas de inovação remontam ao século XIX, por meio do trabalho pioneiro de Friedrich List sobre sistemas nacionais de economia política. Como destaca Freeman (1995), List foi um dos primeiros pensadores a considerar a importância das instituições nacionais e das interações entre diferentes esferas da economia no desenvolvimento industrial das nações. Em sua análise sobre o processo de industrialização alemã, List enfatizou elementos que posteriormente se tornariam centrais na teoria dos sistemas de inovação: o papel das políticas governamentais, a importância da infraestrutura nacional e a necessidade de desenvolvimento entre diferentes setores econômicos.

Freeman (1987), analisando o caso japonês, definiu o Sistema Nacional de Inovação como "uma rede de instituições nos setores públicos e privados cujas atividades e interações iniciam, importam, modificam e difundem novas tecnologias".

Paralelamente, Lundvall (1992), a partir da experiência dos países nórdicos, enfatizou a dimensão do aprendizado interativo, definindo sistemas de inovação como "elementos e relações que interagem na produção, difusão e uso de conhecimento novo e economicamente útil". Richard Nelson (1993), por sua vez, a partir de análise comparativa de 15 países, destacou como "um conjunto de instituições cujas interações determinam o desempenho inovador das empresas nacionais", refletindo o contexto americano de intensa interação universidade-indústria.

Nos sistemas nacionais de inovação, as universidades assumem papéis distintos, conforme as características institucionais e o estágio de desenvolvimento de cada país. Em economias desenvolvidas, as universidades frequentemente atuam na fronteira do conhecimento, gerando descobertas que alimentam setores de alta tecnologia.

Em contraste, em economias em *catching-up*, Albuquerque (2005) identifica que as universidades desempenham função de "antenas científicas", captando conhecimentos gerados internacionalmente e adaptando-os às condições locais. Essa diferenciação é relevante para

compreender como Brasil e Portugal, em diferentes estágios de desenvolvimento, mobilizam suas universidades para o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio.

Destaca-se que a intensificação dos processos de globalização nas últimas décadas do século XX alterou a dinâmica dos sistemas de inovação, redefinindo as interações entre participantes locais e internacionais. Nesse contexto, a capacidade de inovar e adaptar-se às mudanças globais tornou-se um elemento central para a competitividade e o desenvolvimento econômico dos países.

A globalização, no entanto, apresenta uma dinâmica complexa: por um lado, intensifica a disseminação de conhecimentos e tecnologias, por meio, por exemplo, da difusão de redes internacionais de pesquisa e desenvolvimento, criando novas oportunidades de aprendizado e colaboração; por outro, pode acentuar assimetrias tecnológicas preexistentes, consolidando as posições de países economicamente desenvolvidos que já possuem sistemas de inovação mais robustos.

As cadeias globais de valor representam essa complexidade, demonstrando de que maneira as diversas fases do processo de inovação estão distribuídas entre diferentes nações. Consequentemente, a capacidade de inovar de uma nação depende de sua inserção em redes globais de produção e conhecimento. Nesse sentido, estudos empíricos têm se dedicado a compreender a dinâmica global. Eicke e De Blasio (2022) analisam como a localização de recursos naturais, a capacidade tecnológica disponível e as políticas nacionais interferem na posição dos países nas cadeias globais de valor do hidrogênio. Complementarmente, Franzmann *et al.* (2023) utilizam modelagem computacional para simular cenários futuros e avaliar a competitividade do hidrogênio em diferentes mercados, por exemplo.

A complexidade do processo de inovação exige, portanto, diferentes níveis e abrangências de análise. Apesar disso, o conceito de Sistemas Nacionais de Inovação permanece relevante, permitindo uma compreensão sistêmica que se concentra na criação, na difusão e na utilização do conhecimento. Suas bases evidenciam a necessidade de considerar tanto as especificidades locais quanto as dinâmicas globais que moldam o cenário da inovação. A partir dessa perspectiva abrangente, diversas abordagens se dedicaram a compreender a natureza sistêmica da inovação, com enfoques distintos. Assim, como observa Geels (2004), os sistemas de inovação podem ser definidos em vários níveis, incluindo o nacional, o setorial e o regional, cada um oferecendo contribuições sobre os processos de inovação em diferentes escalas e contextos.

2.3 Sistemas Setoriais de Inovação

A análise sistêmica da inovação em diferentes setores industriais se desenvolveu a partir dos anos 1980, com os estudos de Pavitt (1984), que desenvolveu uma taxonomia dos padrões setoriais de mudança técnica. No entanto, foi a partir da década de 1990, em um contexto de intensificação da globalização e crescente reconhecimento das especificidades setoriais nos processos inovadores, que Franco Malerba (2002) desenvolveu o conceito de Sistemas Setoriais de Inovação (SSI).

Este pode ser definido como um conjunto de produtos novos estabelecidos para usos específicos e um conjunto de agentes que realizam interações para criação, produção e venda desses produtos (Malerba, 2002). O SSI se apresenta como um sistema dinâmico que se transforma com o passar do tempo em resposta a alterações nas bases de conhecimento, nas tecnologias e nos padrões de demanda. O saber tecnológico se manifesta tanto de maneira tácita quanto de forma codificada, com variações conforme as especificidades de cada setor.

Dessa forma, os SSI são estruturas complexas que se baseiam em uma matriz que abrange conhecimentos específicos, desenvolvimentos tecnológicos, fluxos de insumos e dinâmicas de demanda inerentes ao setor. A formação é composta por uma ampla variedade de atores, incluindo indivíduos, representados por consumidores, empresários e cientistas, bem como organizações, representadas por empresas, instituições acadêmicas e financeiras, cada uma com características estruturais próprias.

Nessa perspectiva sistêmica, as instituições têm um papel central no processo de inovação, ao desenvolver, disseminar e aplicar novas tecnologias setoriais. Esse processo é marcado por interações complexas entre diversos agentes e instituições, que acontecem em várias escalas geográficas e níveis de agregação institucional (Carlsson, B.; Stankiewicz, 1991; Malerba, 2002). Dessa forma, enquanto os SNI enfatizam a importância das instituições nacionais e suas interações nas fronteiras de um país, os SSI concentram-se nas especificidades setoriais que, frequentemente, ultrapassam as fronteiras nacionais. A relevância de cada ator difere entre os diferentes sistemas setoriais. A análise dos SSI deve considerar as especificidades de cada setor, incluindo a influência de instituições nacionais, como os sistemas de patentes e as regulamentações, que podem variar de país para país.

Por exemplo, na indústria farmacêutica, existe uma dinâmica inovadora caracterizada por investimentos em pesquisa e desenvolvimento (“The evolution of the pharmaceutical industry: Business History: vol 57, nº 5 - Get Access”, [S.d.]) (Malerba; Orsenigo, 2015). Por sua vez, o setor de software apresenta características próprias, em que inventores, cientistas e engenheiros assumem um papel central devido às especificidades do processo e à natureza tecnológica do segmento. Isso acontece por meio de ciclos mais curtos no tempo e uma menor

dependência de infraestrutura física, estabelecendo um contexto específico de avanço tecnológico.

No domínio da biotecnologia, encontra-se uma terceira configuração sistêmica, na qual os departamentos acadêmicos e os laboratórios desempenham um papel fundamental. Essa dinâmica setorial mostra como uma organização pode ter características operacionais e exercer influências quando inserida em diferentes contextos setoriais e nacionais (Carlsson, *et al.*, 2002; Malerba, 2004).

O hidrogênio, enquanto vetor energético multissetorial, excede as fronteiras setoriais no que tange à sua aplicação, pois precisa de desenvolvimentos específicos para cada tipo de indústria, como a indústria siderúrgica e a mobilidade, passando pela produção de amônia e os usos energéticos, cada qual com suas especificidades técnicas e necessidades próprias de ajuste tecnológico.

É importante ressaltar ainda que o desenvolvimento do hidrogênio como vetor energético, diferentemente dos combustíveis fósseis já estabelecidos, demanda inovações tecnológicas em toda a sua cadeia de valor, desde produção, armazenamento e transporte até uso final, justificando os arranjos colaborativos complexos. Essa orientação está apoiada nas políticas públicas atuais, que têm dado prioridade à infraestrutura laboratorial, e na criação de arranjos colaborativos complexos entre universidades e outros atores do sistema (IEA, 2022).

Essa interface entre as dinâmicas de inovação e as características dos contextos locais requer interconexões entre os diferentes níveis dos sistemas de inovação, desde o local até o global, reconhecendo suas complementaridades. Enquanto a abordagem dos Sistemas Setoriais de Inovação se concentra nas dinâmicas inovadoras típicas de diferentes setores industriais, os Sistemas Tecnológicos de Inovação (STI), desenvolvidos por Carlsson e Stankiewicz (1991), apresentam um arcabouço teórico distinto, ao analisar as relações entre atores e instituições para o desenvolvimento de tecnologias específicas.

2.4 Sistemas Tecnológicos de Inovação

O conceito de Sistemas Tecnológicos de Inovação surgiu no início da década de 1990 como uma perspectiva que buscava compreender como tecnologias específicas se desenvolvem e se propagam na sociedade. Os autores desenvolveram o conceito a partir de estudos da indústria de automação de fábrica na Suécia nos anos de 1980. Esse caso específico permitiu-lhes compreender como uma tecnologia emergente se desenvolve por meio da interação de diferentes atores, instituições e fluxos de conhecimento.

Carlsson e Stankiewicz (1991) estabeleceram as bases conceituais dos STI, definindo-os como redes dinâmicas de agentes que interagem em uma área tecnológica específica, sob uma infraestrutura institucional. Nessa concepção, os agentes atuam na geração, na difusão e na utilização de tecnologia, com o fluxo de conhecimento e competências assumindo papel central. Uma contribuição fundamental desses autores foi a introdução do conceito de blocos de desenvolvimento, considerados agrupamentos sinérgicos de empresas e tecnologias que, quando catalisados por agentes empreendedores, podem gerar novas oportunidades de negócios.

Bergek *et al.* (2008) desenvolveram uma abordagem que enfatizou as funções essenciais dos sistemas tecnológicos, incluindo o desenvolvimento e a difusão de conhecimento, a influência na direção da busca tecnológica, a experimentação empresarial, a formação de mercado e a legitimação. Hekkert *et al.* (2007) complementaram essa perspectiva, ao elaborar um arcabouço para análise das dinâmicas do sistema tecnológico, destacando a importância de compreender como diferentes atividades são relevantes para o desenvolvimento tecnológico.

No que diz respeito ao hidrogênio, a estrutura do STI possibilita entender as redes de participantes e instituições envolvidas na evolução dessa tecnologia, além das funções que devem ser executadas para o seu progresso. Contudo, o hidrogênio não se constitui de uma única tecnologia, claramente estabelecida, mas de um agrupamento de tecnologias interligadas, que devem evoluir ao mesmo tempo, em variados cenários setoriais. Da produção por eletrólise ao armazenamento, o transporte e as diferentes aplicações finais, cada aspecto do sistema do hidrogênio demanda desenvolvimentos tecnológicos específicos e complementares.

As limitações da abordagem do STI foram objeto de análise crítica. Markard e Truffer (2008) apontam a dificuldade metodológica em delimitar as fronteiras do sistema tecnológico, relevante no caso de tecnologias multissetoriais como o hidrogênio (Etzkowitz; Leydesdorff, 2000).

2.5 Perspectivas Multissistêmicas

A análise sobre as trajetórias de desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio em universidades demanda discussões que contemplem a complexidade inerente às transições sustentáveis contemporâneas. Nesse contexto, as perspectivas multissistêmicas, desenvolvidas por Geels (2002), Markard (2018; 2020) e Rosenbloom (2020), emergiram como contribuições nos estudos sobre transições, constituindo embasamento analítico que complementa e enriquece os fundamentos neoschumpeterianos estabelecidos nas seções anteriores.

As perspectivas multissistêmicas referem-se a abordagens teóricas que reconhecem que transições tecnológicas contemporâneas, principalmente aquelas orientadas para sustentabilidade, não ocorrem isoladamente em um único sistema sociotécnico, mas requerem transformações coordenadas que perpassam múltiplos sistemas simultaneamente (Markard, 2018; Rosenbloom, 2020). Essas abordagens constituem desenvolvimentos conceituais que possibilitam compreensão mais ampla e contextualizada de fenômenos caracterizados pela necessidade de coordenação entre múltiplos sistemas sociotécnicos.

Os sistemas sociotécnicos são caracterizados como arranjos relativamente estáveis de componentes tecnológicos, institucionais, organizacionais e sociais que evoluem e se fortalecem ao longo do tempo (Geels, 2004). Esses sistemas englobam não apenas artefatos técnicos, mas também infraestruturas, práticas de uso, conhecimentos especializados, regulamentações, significados culturais e redes de atores que se organizam segundo lógicas específicas. No contexto do hidrogênio, sistemas sociotécnicos distintos podem incluir o sistema energético (produção e distribuição de energia), o sistema de transportes (mobilidade), e o sistema industrial (processos produtivos e químicos).

Como observa Markard (2018), a literatura sobre transições sociotécnicas desenvolveu-se em três vertentes principais que, embora complementares, necessitam de articulação para compreensão integral de processos de transição contemporâneos: os Sistemas Tecnológicos de Inovação (TIS), desenvolvidos por Hekkert *et al.* (2007) e Bergek *et al.* (2008), a Perspectiva Multinível (MLP), consolidada por Geels (2002), e os Estudos Discursivos (DS).

Os Estudos Discursivos (DS) analisam como narrativas, significados e representações são construídos em torno de tecnologias emergentes, moldando expectativas coletivas e legitimidade social (Bakker *et al.*, 2011; Rosenbloom *et al.*, 2016). Essa vertente busca compreender como diferentes atores, desde empresas e políticos até mídia e sociedade civil, constroem discursos que influenciam a direção e a velocidade das transições tecnológicas. No caso do hidrogênio, os estudos discursivos retratam como diferentes grupos de atores constroem narrativas sobre o papel do hidrogênio na transição energética, criando expectativas que podem acelerar ou retardar seu desenvolvimento. Por exemplo, discursos sobre "hidrogênio verde" em comparação ao "hidrogênio cinza" refletem disputas sobre quais trajetórias tecnológicas devem receber prioridade política e investimentos.

Uma das contribuições centrais de Markard (2018) para o campo dos estudos sobre transições consiste em reconhecer a necessidade de contemplar relações tanto verticais quanto horizontais que caracterizam processos de transformação sociotécnica.

As relações verticais, abordadas pela Perspectiva Multinível, por meio de interações nicho-regime-paisagem, têm enfoque nas dinâmicas hierárquicas no âmbito de sistemas específicos. A paisagem sociotécnica, no âmbito macro, representa o cenário exógeno que cria o ambiente estrutural no qual as transições acontecem, incluindo aspectos materiais como infraestruturas físicas consolidadas, fatores imateriais como paradigmas políticos dominantes e eventos externos como crises econômicas que alteram condições sistêmicas (Geels, 2002).

Já os regimes sociotécnicos, operando no nível meso, constituem estruturas relativamente estáveis, definidas por Geels (2004) como complexo de regras semicoerentes que direcionam atividades de comunidades tecnológicas. Os nichos tecnológicos, por sua vez, constituem espaços protegidos em que inovações radicais podem emergir relativamente isoladas das pressões seletivas dominantes nos regimes estabelecidos (Kemp; Schot; Hoogma, 1998).

No contexto do hidrogênio, segundo o autor, diversos nichos coexistem em variados níveis de maturidade e direcionamentos setoriais. Exemplos concretos incluem: nichos de mobilidade, em que veículos com células de combustível disputam espaço com veículos elétricos à bateria; nichos industriais, em que hidrogênio verde compete com hidrogênio cinza em processos siderúrgicos; e nichos de armazenamento energético, em que hidrogênio concorre com baterias de lítio para balanceamento de redes elétricas com alta penetração de renováveis.

Embora as relações verticais sejam fundamentais para compreender processos de substituição tecnológica, Markard (2018) identifica que a literatura sobre transições tem dedicado atenção insuficiente às interações horizontais entre diferentes sistemas sociotécnicos. Essas interações horizontais ocorrem por meio de acoplamentos funcionais em que outputs de um sistema constituem inputs para outros sistemas, criando interdependências que demandam coordenação entre atores e instituições que tradicionalmente se movimentam de forma independente.

Exemplos sobre interações horizontais no desenvolvimento do hidrogênio incluem: a integração energia-indústria, em que excedentes de produção eólica e solar são convertidos, via eletrólise, em hidrogênio; a interface transporte-energia, em que sistemas de abastecimento de hidrogênio para veículos devem ser coordenados com planejamento de redes de distribuição energética; e os acoplamentos urbano-industriais, em que hidrogênio produzido em complexos industriais pode ser utilizado para aquecimento.

Os acoplamentos estruturais emergem quando infraestruturas físicas servem a diferentes propósitos simultaneamente. Pesquisas sobre reutilização de gasodutos existentes para

transporte de hidrogênio ou misturas hidrogênio-metano podem representar uma reconfiguração de infraestruturas originalmente projetadas para gás natural.

Uma agenda de pesquisa proposta por Markard (2018) identifica que ainda carecemos de estudos empíricos e estruturas conceituais para analisar transições que envolvem múltiplos sistemas (Rosenbloom, 2020), evidenciando lacuna que esta tese contribui para preencher, por meio da análise do papel das universidades no desenvolvimento de tecnologias multissistêmicas. A literatura existente concentra-se em discussões genéricas sobre atores e tecnologias em esferas políticas e industriais, mas não aborda as especificidades das tecnologias do hidrogênio nem contempla a perspectiva técnica em sua amplitude. É relevante acrescentar que as universidades não são consideradas como atores principais nesses marcos teóricos, embora o desenvolvimento tecnológico esteja majoritariamente conectado às instituições acadêmicas.

2.6 Universidades Empreendedoras

No contexto das tecnologias do hidrogênio, as universidades assumem papéis que vão além da transferência tecnológica. O desenvolvimento de tecnologias sistêmicas como o hidrogênio demanda não somente inovações pontuais, mas articulação de conhecimentos distribuídos entre diferentes domínios científicos e técnicos. As universidades, nesse contexto, exercem funções que vão além da geração de patentes e spin-offs, atuando como centros de articulação horizontal entre pesquisadores de diferentes áreas e instituições e como facilitadores de interações entre múltiplos sistemas de inovação.

Essa perspectiva alinha-se com a abordagem sociotécnica multinível, em que universidades podem ser consideradas simultaneamente como componentes de regimes estabelecidos, espaços de desenvolvimento de nichos tecnológicos e articuladoras entre diferentes paisagens sociotécnicas. A complexidade das transições energéticas, no que tange ao desenvolvimento do hidrogênio, exemplifica a necessidade de compreender as universidades, não como atores isolados, mas como nós de redes de conhecimento que facilitam processos de aprendizagem intersetorial e coordenação sistêmica.

A primeira revolução acadêmica, conforme argumenta Etzkowitz e Leydesdorff (2000), ocorreu no final do século XIX e no início do século XX, caracterizando-se pela integração da pesquisa científica às funções tradicionais de ensino das universidades. Constituiu-se assim uma mudança paradigmática de universidades centradas na transmissão de conhecimentos para universidades voltadas à produção de novos saberes por meio da pesquisa.

A segunda revolução acadêmica, conceito central de Etzkowitz (2001), refere-se ao processo contemporâneo mediante o qual as universidades integram uma terceira missão, de desenvolvimento econômico e social, às suas funções tradicionais de ensino e pesquisa. Segundo o teórico, "uma segunda revolução acadêmica está em curso à medida que as universidades combinam pesquisa e ensino com transferência de tecnologia" (Etzkowitz, 2001, p. 18). Essa transformação ocorre por meio de atividades de transferência de tecnologia, criação de empresas spin-off, licenciamento de propriedade intelectual e estabelecimento de parques tecnológicos e incubadoras.

A ideia de que as universidades poderiam ou deveriam ser entidades empreendedoras foi introduzida no início da década de 1980, quando debates sobre o envolvimento das instituições de ensino superior na mudança social e no crescimento econômico começaram a aparecer com mais proeminência na literatura acadêmica. Esse conceito foi articulado e desenvolvido em estudos como o de Clark (1998), que elaborou a premissa de que as universidades podem implementar atividades empreendedoras sem comprometer os valores universitários tradicionais, como processos educacionais e de pesquisa científica.

A comercialização do conhecimento acadêmico evoluiu nas últimas décadas, passando dos mecanismos tradicionais, como direitos autorais, patentes, licenças e marcas registradas, para o fenômeno mais amplo do "empreendedorismo acadêmico". Esse fenômeno, como destacado por Cunningham e Menter (2020) e por Urbano e Guerrero (2013), ocorre nas intersecções de diferentes disciplinas científicas e áreas profissionais, exigindo mecanismos de suporte específicos para transcender essas fronteiras.

Nos Estados Unidos, a Lei Bayh-Dole, implementada há aproximadamente 30 anos, marcou um ponto de inflexão, ao permitir que universidades patenteassem e comercializassem pesquisas financiadas com recursos federais, vinculando diretamente as atividades acadêmicas ao desenvolvimento econômico. No período anterior à implementação da Lei Bayh-Dole, descobertas e invenções provenientes de pesquisas financiadas pelo governo eram de propriedade governamental, o que muitas vezes dificultava a comercialização e a aplicação prática dessas tecnologias.

Com a promulgação dessa lei, as instituições acadêmicas e sem fins lucrativos passaram a ter a autoridade para patentear e comercializar as inovações desenvolvidas em suas pesquisas. Essa legislação foi um marco importante, ao incentivar a transferência de tecnologia do ambiente acadêmico para o setor privado, estimulando a inovação, o empreendedorismo e a colaboração entre universidades e empresas e contribuindo para acelerar o processo de

transformação de descobertas científicas em produtos e serviços comercializáveis (Siegel; Waldman; Link, 2003).

A universidade empreendedora engloba uma "terceira missão" de desenvolvimento econômico, além da pesquisa e do ensino, embora a forma precisa que ela assume possa variar. Essa terceira missão enfatiza a ligação das universidades com seu ambiente externo e sua contribuição para o desenvolvimento social e econômico, em particular por meio de atividades empreendedoras (Etzkowitz; Leydesdorff, 2000; Guerrero *et al.*, 2016; Mcadam; Miller; Mcadam, 2021).

Segundo Audretsch (2014), o papel das universidades empreendedoras é mais amplo do que somente gerar e transferir conhecimento; uma universidade empreendedora contribui e fornece liderança para a criação de pensamentos, ações e instituições empreendedoras.

O modelo da Hélice Tríplice, desenvolvido por Etzkowitz e Leydesdorff (2000), representa uma evolução na compreensão das relações entre universidades, empresas e governos no âmbito de sistemas de inovação. Diferentemente de modelos anteriores, que viam essas esferas como entidades estáticas com funções rigidamente definidas, a Hélice Tríplice apresenta uma visão dinâmica, em que cada esfera institucional mantém seu caráter distintivo, mas também assume parcialmente o papel das outras em determinados momentos, criando espaços de intersecção e sobreposição.

Essa perspectiva é relevante para compreender o desenvolvimento de tecnologias sistêmicas como o hidrogênio. Observa-se que universidades assumem funções típicas de coordenação e desenvolvimento de demonstrações tecnológicas, enquanto governos investem em pesquisa básica e empresas financiam projetos acadêmicos. No entanto, no contexto das tecnologias do hidrogênio, que se caracterizam pela complexidade científica e pela interdisciplinaridade, destaca-se a necessidade de arranjos institucionais que transcendam as interações tradicionais entre universidade-empresa-governo propostas pela Hélice Tríplice.

O hidrogênio requer arranjos institucionais complexos. Esse entendimento complementa a abordagem da Hélice Tríplice, ao evidenciar que, para tecnologias sistêmicas como o hidrogênio, os estudos devem contemplar, para além das relações e da comercialização tecnológica, as fases anteriores de construção da base de conhecimento científico, em que se estabelecem as fundações dos arranjos institucionais que sustentam a inovação.

Dessa maneira, a análise de tecnologias multissistêmicas como o hidrogênio evidencia limitações do modelo tríplice, demandando uma perspectiva que incorpore também as interações horizontais entre universidades e pesquisadores de diferentes áreas. Essas interações horizontais são fundamentais para o desenvolvimento tecnológico em contextos em que a

inovação requer a integração de conhecimentos distribuídos entre múltiplas áreas. As universidades, nesse contexto ampliado, exercem funções que transcendem o modelo focado na transferência tecnológica, atuando como plataformas de articulação interdisciplinar que facilitam o diálogo entre diferentes comunidades epistêmicas.

2.7 Síntese Teórica

À luz do debate realizado, a complexidade inerente ao desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio demandou uma articulação conceitual que ultrapassasse perspectivas teóricas isoladas, configurando framework analítico multidimensional capaz de apreender simultaneamente dinâmicas evolutivas, especificidades contextuais e interações sistêmicas que caracterizam processos de inovação em tecnologias emergentes. O Quadro 1 sistematiza essa articulação teórica, evidenciando como diferentes tradições conceituais contribuem complementarmente para a compreensão de fenômenos caracterizados por complexidade multissetorial e interdependência institucional.

Portanto, uma possível contribuição desta tese para a agenda de pesquisa multissistêmica reside em demonstrar como universidades estão envolvidas nesse processo. As universidades constituem espaços onde conhecimentos distribuídos entre diferentes domínios científicos são articulados para desenvolvimento de soluções tecnológicas sistêmicas. Essa função é relevante, ao considerar que a complexidade científica multidisciplinar do hidrogênio – integrando eletroquímica, ciência dos materiais, engenharia de sistemas, catálise e termodinâmica, por exemplo – demanda capacidades de pesquisa que permanecem concentradas em universidades. A natureza sistêmica dessas tecnologias exige, adicionalmente, capacidades de articulação horizontal entre diferentes áreas de conhecimento.

A evidência empírica a ser apresentada nos capítulos subsequentes demonstrará como essa articulação teórica permite compreender práticas concretas de desenvolvimento tecnológico que ultrapassam categorizações convencionais envolvendo políticas de ciência, tecnologia e inovação orientadas para transições sustentáveis.

Quadro 1 – Síntese Teórica da Tese

Perspectiva Teórica	Unidade de Análise	Temporalidade	Papel das Universidades	Aplicação ao Hidrogênio
Sistemas Nacionais de Inovação	Arranjos institucionais nacionais	Desenvolvimento histórico-institucional	"Antenas científicas" em economias emergentes; produtoras de fronteira em economias avançadas	Diferenciação entre capacidades brasileiras e portuguesas
Sistemas Setoriais de Inovação	Configurações setoriais específicas	Dinâmicas competitivas setoriais	Produção de conhecimento específico, conforme características setoriais	Perspectivas diferenciadas (química, energia, mobilidade)
Sistemas Tecnológicos de Inovação	Redes de atores em tecnologias específicas	Ciclos de desenvolvimento tecnológico	Desenvolvimento de competências específicas	Formação de redes especializadas
Perspectiva Multinível (MLP)	Interações nicho-regime-paisagem	Transições sociotécnicas de médio prazo	Desenvolvimento de nichos tecnológicos	H ₂ como nicho emergente vs. componente de regime estabelecido
Perspectiva Multissistêmica	Interações horizontais entre sistemas	Transformações coordenadas multissistêmicas	Articulações de aprendizagem intersetorial	Coordenação entre sistemas energético, industrial e de mobilidade
Universidades Empreendedoras	Terceira missão universitária	Transição para capitalismo acadêmico	Agentes diretos de desenvolvimento econômico	Desenvolvimento de spin-offs e transferência tecnológica

Fonte: elaborado pela autora.

3 METODOLOGIA

Para cumprir o propósito principal deste estudo, que é analisar as trajetórias de evolução das tecnologias do hidrogênio (H_2) em universidades, , foi preciso elaborar uma abordagem metodológica que abarcasse tanto a profundidade qualitativa dos processos e das estruturas institucionais envolvidos quanto o viés quantitativo dos avanços tecnológicos no Brasil.

3.1 Estudo de Caso Múltiplo: Justificativa e Critérios de Seleção

A adoção do estudo de caso múltiplo como estratégia metodológica central fundamenta-se na proposição de diferentes autores (Aba; Sauer; Amado, 2024; Kovač; Paranos; Marciuš, 2021; Yin, 2014), que o caracterizam como método de investigação empírica focado na análise de fenômenos contemporâneos em seus contextos reais. Essa abordagem, conforme argumenta Stake (2000), permite identificar padrões e singularidades na manifestação de um mesmo fenômeno em diferentes ambientes institucionais, preservando as particularidades de cada caso enquanto estabelece bases para compreensões mais abrangentes do objeto investigado.

No que diz respeito às fundamentações teóricas utilizadas, a análise das redes de publicações científicas serviu como um componente para embasar a escolha dos casos para estudo. Tomando como ponto focal o estudo de Chantre (2022), utilizou-se o Connected Papers como instrumento basilar para o mapeamento sistemático do campo. O procedimento metodológico baseou-se nos padrões de cocitação e referências compartilhadas, gerando representações das conexões entre publicações, nas quais a proximidade espacial denota convergência temática e a dimensão dos nós expressa o volume de citações. A configuração dos nós e suas conexões permitiu identificar clusters temáticos e lacunas na literatura, proporcionando uma perspectiva abrangente do posicionamento do trabalho de Chantre (2022) na produção científica brasileira sobre hidrogênio. Confirmou-se um relativo isolamento do artigo no campo e fundamentaram-se os critérios para a seleção subsequente das universidades para investigação pormenorizada.

3.2 Planejamento dos Métodos de Coleta de Dados

Como se tratou de um estudo de natureza qualitativa e quantitativa, o planejamento dos métodos de coleta de dados está dividido em duas fases. Na etapa qualitativa do estudo de casos múltiplos, foram utilizados roteiros semiestruturados, com o objetivo de guiar as entrevistas realizadas com pesquisadores líderes de grupos de pesquisa nos dois contextos nacionais estudados.

A escolha por entrevistar inicialmente líderes dos grupos de pesquisa e coordenadores de laboratórios esteve associada ao fato de que diversos processos de desenvolvimento tecnológico e conexão com o ecossistema de inovação são conduzidos diretamente pelos pesquisadores. Além disso, ao entrevistar esses pesquisadores, foi possível obter uma visão crítica sobre os arranjos institucionais, e conhecer em profundidade as dinâmicas de cooperação entre as atividades de pesquisa e aplicação tecnológica.

Em relação aos roteiros semiestruturados, ressalta-se que esses foram estruturados com base na literatura sobre transições tecnológicas e sistemas de inovação, sendo posteriormente validados em diferentes reuniões de trabalho, com a orientação no Brasil e a co-orientação na Universidade do Porto, em Portugal. Os roteiros englobaram três dimensões de análise: trajetória tecnológica, redes de interação e visão dos especialistas.

O escopo qualitativo da pesquisa se limitou à UFMG no contexto brasileiro e à UPorto no contexto português. A justificativa para a escolha da UFMG baseia-se em sua relevância no cenário nacional de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, além da acessibilidade da pesquisadora à instituição. No cenário nacional, o Ranking Universitário Folha (RUF) 2024 posiciona a UFMG na 5ª posição geral e na 3ª entre as universidades federais

A seleção da Universidade do Porto, por sua vez, justifica-se pela organização de seu ecossistema de inovação, caracterizado por estruturas institucionais específicas como laboratórios associados e institutos de interface, além do contexto do doutorado sanduíche, que viabilizou o acesso aprofundado às redes de pesquisa portuguesas.

Na etapa quantitativa do estudo descritivo, foram utilizados dados secundários provenientes de múltiplas agências de fomento para mapear sistematicamente o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio no sistema nacional de inovação brasileiro. É relevante destacar que a implementação da vertente quantitativa ocorreu unicamente no âmbito brasileiro. Primeiramente, o Brasil constitui um país de dimensões continentais, com um sistema universitário extenso e descentralizado, tornando necessário compreender como a UFMG se posiciona perante o cenário nacional de desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio.

Essa compreensão sistêmica situa avanços institucionais específicos no contexto mais abrangente da pesquisa nacional. Adicionalmente, como esta pesquisa não se caracteriza como um estudo comparativo, em sua essência, mas sim como uma análise de casos múltiplos com contextos distintos, a pesquisadora optou pela implementação da análise quantitativa somente no Brasil, devido à maior facilidade de acesso às informações das agências de fomento

nacionais e à necessidade de estabelecer o posicionamento da instituição estudada dentro de seu sistema nacional de inovação.

3.3 Coleta de Dados Qualitativos

Para identificar acadêmicos no contexto brasileiro, foi iniciada uma pesquisa na plataforma "Somos UFMG", associada ao sistema Lattes, utilizando a palavra-chave "hidrogênio". Essa busca retornou 12 pesquisadores principais, dos quais foram excluídos aqueles cujas pesquisas relacionavam-se exclusivamente ao peróxido de hidrogênio, mantendo-se somente pesquisadores com projetos atuais em tecnologias de hidrogênio como vetor energético. O processo de seleção foi aprimorado por meio da metodologia de amostragem por indicação, na qual os pesquisadores entrevistados recomendaram colegas com conhecimento complementar na área, culminando na obtenção de informações acerca de mais dois pesquisadores. Adicionalmente, os projetos financiados foram identificados por meio do Portal da Transparência da Fundação Christiano Ottoni (FCO) e da Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP). Portanto, quatro entrevistas foram conduzidas no cenário brasileiro: três com professores da UFMG e uma com uma pesquisadora da UFV que integra uma rede colaborativa liderada por uma pesquisadora da UFMG. Isso possibilitou compreender as dinâmicas de colaboração interinstitucional relacionadas ao avanço de tecnologias sistêmicas, como o hidrogênio.

No contexto brasileiro, foram conduzidas entre novembro de 2024 e março de 2025, tanto presencialmente quanto remotamente. Essa estratégia metodológica permitiu ampliar o escopo analítico das relações de cooperação interinstitucional, evidenciando as complexas articulações que caracterizam o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio no sistema nacional de ciência e tecnologia.

No contexto português, a busca por pesquisadores estruturou-se mediante análise do ecossistema de inovação da Universidade do Porto, contemplando suas diferentes estruturas institucionais: Laboratórios Associados, Centros Funcionais e de Competência e Institutos de Interface. A UPorto dispõe de estruturas especializadas, cuja finalidade é oferecer serviços e atividades de pesquisa e desenvolvimento em diversas áreas. Foram utilizadas as palavras-chave "energy" e "hydrogen" para identificar linhas de pesquisa relevantes nas diferentes estruturas, aplicando-se também a técnica de amostragem por indicação durante as entrevistas para identificar líderes adicionais.

Foram realizadas sete entrevistas no contexto português, entre março e agosto de 2024, conduzidas tanto presencialmente quanto remotamente, com pesquisadores vinculados às

diferentes estruturas institucionais portuguesas. Utilizou-se o mesmo roteiro de entrevistas semiestruturadas na UFMG e na Universidade do Porto. A análise de conteúdo das entrevistas envolveu técnicas de codificação e categorização, conforme Strauss (2003), permitindo categorizar os dados, a partir da plataforma Atlas.ti, segundo cada perfil de ator entrevistado. É relevante ressaltar que a estrutura inicial das categorias derivou das transcrições e passou por refinamento em discussões entre a pesquisadora, a professora coordenadora do doutorado sanduíche em Portugal e especialistas responsáveis pelo grupo de estudos em energias renováveis. Esse processo consolidou três dimensões analíticas principais: trajetória tecnológica, redes de interação e visão de especialistas.

Quadro 2 – Detalhamento das Entrevistas UFMG

Tipo de Ator	Localidade	Área do Conhecimento/Instituição	Cargo do Entrevistado	Data	Duração
Pesquisador1	Belo Horizonte	Engenharia Nuclear (UFMG)	Professora	02/10/2024	35min25s
Pesquisador2	Belo Horizonte	Química (UFMG)	Professor	16/01/2025	30min33s
Pesquisador3	Belo Horizonte	Química (UFMG)	Professora	04/02/2025	22min05s
Pesquisador4	Viçosa	Química (UFV)	Professora	13/04/2025	32min26s

Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 3 – Detalhamento das Entrevistas UPorto

Tipo de Ator	Localidade	Área do Conhecimento/Instituição	Cargo do Entrevistado	Data	Duração
Pesquisador 1	Porto	Engenharia Mecânica (INEGI/INES)	Senior Technical Coordinator	01/07/2024	49min55s
Pesquisador 2	Porto	Engenharia Ambiental (INEGI/INES)	Researcher	01/07/2024	48min36s
Pesquisador_3	Porto	Sistemas Sustentáveis de Energia (INEGI/INES)	Head of the Energy Unit	01/07/2024	48min27s
Pesquisador 4	Porto	Engenharia Química (Laboratório ALiCE/FEUP)	Researcher	09/08/2024	37min15s
Pesquisador 5	Porto	Engenharia Eletrotécnica (INESTEC)	Director do Programa Doutoral	27/06/2024	21min13s
Pesquisador 6	Porto	Engenharia Química (FEUP)	Vice Scientific Coordinator	19/07/2024	1h17min48s
Pesquisador 7	Porto	Laboratório ALiCE)	Thematic Line Coordinator	19/07/2024	37min15s
Pesquisador 8	Porto	Engenharia Mecânica (INEGI)	Director of Advanced Manufacturing	25/06/2024	40min29s

Fonte: elaborado pela autora.

3.4 Coleta de Dados Quantitativos

O processo de coleta de dados quantitativos estruturou-se a partir da análise sistemática de dados secundários, provenientes de diferentes agências de fomento e bases institucionais. Constituiu, assim, uma estratégia exploratória destinada a compreender o panorama nacional das tecnologias do hidrogênio e como UFMG se posiciona nesse cenário. O mapeamento contemplou projetos financiados nos quais universidades brasileiras participam como proponentes ou executoras no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio.

A seleção das agências de fomento analisadas fundamentou-se em critérios de representatividade e relevância no sistema nacional de inovação brasileiro. No âmbito nacional, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) constituem as principais financiadoras de projetos de inovação no país, disponibilizando o Mapa de Fomentos com informações de projetos vigentes, no caso do CNPq, e centralizando informações em plataforma digital específica, no que se refere à Finep. A Agência Nacional do Petróleo (ANP) foi incluída devido ao seu papel estratégico como agência nacional responsável pela regulamentação do hidrogênio no Brasil, conforme estabelecido pela Lei nº 14.689/2024, que institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), além de dispor de mecanismos de investimento obrigatório em P&D, por meio de dashboards específicos em seu portal eletrônico.

Cabe destacar que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi excluída da análise, embora tenha lançado em 2024 a Chamada Estratégica de PDI nº 023/2024: "Hidrogênio no Contexto do Setor Elétrico Brasileiro", primeira iniciativa específica para desenvolvimento tecnológico do hidrogênio no setor elétrico brasileiro. Essa exclusão justificou-se pela suspensão dos investimentos nos projetos do programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI), anteriormente estruturado como Redes de Inovação no Setor Elétrico (RISE). No âmbito estadual, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), como instituição de amparo à pesquisa no estado onde se localiza a UFMG, disponibiliza dados e chamadas públicas específicas no portal de transparência. Complementarmente, foram analisadas as fundações de apoio universitárias Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa

(FUNDEP) e Fundação Christiano Ottoni (FCO), que contemplam especificamente projetos desenvolvidos na UFMG, permitindo caracterizar os arranjos de financiamento que sustentam as pesquisas institucionais em hidrogênio. O mapeamento quantitativo resultou em 128 projetos de pesquisa relacionados ao hidrogênio, distribuídos entre 47 instituições brasileiras e envolvendo 89 pesquisadores. Essa base de dados permitiu caracterizar a distribuição institucional, temporal e temática dos desenvolvimentos em hidrogênio no país, posicionando a UFMG no contexto nacional e fornecendo elementos empíricos para contextualizar os achados qualitativos obtidos nas entrevistas com pesquisadores especializados.

3.5 O Lócus e a tecnologia estudada: Hidrogênio com suas características técnicas e econômicas

O H_2 é um transportador de energia que pode ser usado em aplicações em uma variedade de processos produtivos, como os do ferro, do aço, da amônia, do cimento, do refino de petróleo e do transporte (Zuben *et al.*, 2022), o que o coloca como um elemento central nas discussões sobre transição energética e autonomia energética (Lindner, 2023). Essa centralidade decorre de sua versatilidade funcional como matéria-prima, meio de armazenamento energético e combustível (Moriarty; Honnery, 2009), características que fundamentam sua relevância nas estratégias de descarbonização industrial.

Conforme retratado anteriormente, tecnologias relacionadas ao hidrogênio não emergem isoladamente, mas requerem a articulação coordenada de múltiplos atores, conhecimentos e infraestruturas em processos que transcendem fronteiras setoriais. O hidrogênio exemplifica como inovações não ocorrem de maneira isolada, mas em ecossistemas integrados, desde produção até uso final, conectando-se com as políticas públicas.

A economia do hidrogênio, por sua vez, caracteriza-se por uma dinâmica de desenvolvimento tecnológico, na qual países em diferentes estágios de maturidade industrial competem simultaneamente pela liderança em tecnologias ainda em consolidação. Esse cenário é caracterizado por um conjunto de processos de produção, armazenamento e transporte.

Do ponto de vista técnico, o H_2 apresenta propriedades físico-químicas que o distinguem como possível elemento transformador nos processos produtivos atuais. Sua densidade energética por quilograma supera os combustíveis convencionais: 2,2 vezes superior ao gás natural, 2,75 vezes à gasolina e 3 vezes ao petróleo (Lebrouhi *et al.*, 2022). Contudo, sua utilização requer procedimentos técnicos específicos, uma vez que o H_2 não se comporta naturalmente, requerendo processos de separação para sua conversão em eletricidade ou utilização como combustível (Dawood; Shafiullah; Anda, 2020), muitas vezes sem viabilidade

técnica e econômica. O estabelecimento da economia do hidrogênio está relacionado à abordagem simultânea da produção, do armazenamento, do transporte e da distribuição do hidrogênio (Bartlett; Krupnick, [S.d.]).

3.5.1 Propriedades Físico-Químicas e Classificação por Rotas de Produção

Em relação à classificação do processo produtivo, a sistematização por cores (Quadro 2) tem sido amplamente empregada para relacionar a fonte de energia e a matéria-prima utilizadas no processo com as emissões de CO₂ resultantes. Essa classificação possibilita distinguir entre os métodos de produção de hidrogênio que causam menos impacto ambiental, obtidos de fontes renováveis, e os processos que produzem mais emissões. As cores cinza, azul e verde são as mais relevantes para o cenário global atual.

Quadro 4 – Classificação do Hidrogênio

	Processo	Matéria-prima	Emissão de CO₂	Impacto Ambiental
	Gaseificação	Carvão Mineral	Alta	Alto
	Reforma a vapor	Gás Natural	Alta	Alto
	Reforma a vapor com captura CO ₂	Gás Natural	Média	Médio
	Pirólise	Metano	Baixa	Médio
	Eletrólise da água	Energia nuclear	Baixa	Médio
	Eletrólise da água	Energia da rede elétrica	Baixa	Médio
	Eletrólise da água	Energia solar/eólica	Baixa	Baixo
	Gaseificação	Resíduos, plástico, biomassa	Médio	Médio

Fonte: Adaptado de EPE (2021) e Zuben *et al.* (2022).

O hidrogênio cinza, por exemplo, é produzido por meio do processo de reforma a vapor, e utiliza o gás natural como matéria-prima. Atualmente, é o processo industrial mais utilizado para a produção de H₂ (Zuben *et al.*, 2022). O hidrogênio azul, por sua vez, também utiliza fontes fósseis, no entanto envolve a captura do carbono, cujo objetivo é impedir a liberação de CO₂ para a atmosfera. No que diz respeito ao hidrogênio verde, é produzido a partir de energia

renovável, por meio de um processo eletrolítico com baixa emissão de carbono (Zuben *et al.*, 2022).

A categorização por cores, contudo, gera questionamentos, como apontam Dawood, Shafiullah e Anda (2020). Os autores argumentam que o modelo não indica com precisão o grau de sustentabilidade do hidrogênio produzido, uma vez que não determina a quantidade de gases de efeito estufa emitidos ao longo da cadeia produtiva, incluindo subsistemas e ciclo de vida dos equipamentos usados. Além disso, a classificação prioriza a fonte energética, sem estabelecer medidas precisas sobre o nível de sustentabilidade do processo.

São os processos de produção do hidrogênio que determinam a sua classificação em categorias renováveis e não renováveis, além de conter parâmetros técnicos e ambientais distintos. O hidrogênio renovável, classificado como verde, é obtido através da eletrólise da água, processo pelo qual um eletrolisador realiza a divisão da molécula em oxigênio (O) e hidrogênio (H₂) por meio de uma corrente elétrica gerada por fontes renováveis, como a solar, a eólica ou a hidrelétrica (Lebrouhi *et al.*, 2022).

No entanto, a matriz produtiva atual é baseada em fontes não renováveis, como o gás natural e o carvão, que representam cerca de 95% do total global, gerando uma grande emissão de gases do efeito estufa, que varia entre 70 e 100 milhões de toneladas de CO₂ (Abe *et al.*, 2019). Isso demonstra uma contradição entre o potencial do hidrogênio para a descarbonização e as limitações técnico-econômicas em relação ao hidrogênio renovável na escala necessária para a transição energética.

É importante salientar que, atualmente, somente 5% do hidrogênio produzido no mundo provém da eletrólise da água (Lebrouhi *et al.*, 2022). Assim, o hidrogênio renovável e de baixo carbono ainda não alcança paridade de custos com o hidrogênio de base fóssil (Kovač; Paranos; Marciuš, 2021), demonstrando obstáculos para sua adoção em escala industrial. Apesar de não existir uma produção comercial significativa de hidrogênio verde, a discussão sobre a economia do hidrogênio ganhou um novo foco devido ao seu potencial de alterar a matriz energética, o que pode contribuir para a independência energética dos países, ao mesmo tempo em que diminui a dependência de combustíveis fósseis (Lindner, 2023).

O H₂ é um dos elementos químicos mais leves e abundantes no universo (IEA, 2023). A demanda mundial atingiu 115 Mt em 2018, sendo 73 Mt de hidrogênio puro destinados principalmente à produção de amônia e refino de petróleo (96% da demanda). Os 42 Mt restantes, em misturas gasosas, foram utilizados na produção de metanol (29%), redução direta na siderurgia (7%) e outras aplicações (IEA, 2019).

O cenário atual, conforme relatório da Agência Internacional de Energia (2024), evidencia a persistência do padrão de consumo tradicional. As aplicações industriais consolidadas mantêm sua predominância, enquanto novos usos em energia limpa, incluindo indústria pesada, transporte de longa distância e armazenamento energético, ainda representam menos de 1% da demanda global. Contudo, houve um crescimento de 40% nessas novas aplicações, em comparação com 2022, sinalizando uma tendência emergente de diversificação (RadarH₂, 2024; IEA, 2024).

Dessa maneira, no setor químico industrial, o hidrogênio afeta múltiplos papéis estratégicos. Sua utilização é fundamental no refino de petróleo, em processos de hidrocrackeamento e hidrotratamento; na síntese de amônia, componente essencial para fertilizantes; na produção de metanol, um importante intermediário químico; e na fabricação direta de fertilizantes (Guariero *et al.*, 2022).

No entanto, a matriz produtiva atual do hidrogênio apresenta desafios para a sustentabilidade ambiental. A predominância de fontes fósseis, como gás natural e carvão, reflete a composição da matriz energética global, na qual os combustíveis fósseis representam cerca de 80% (petróleo, 30%, carvão, 27%, gás natural, 24%). A eletrólise da água, processo considerado mais sustentável, responde por apenas 5% da produção total (Zuben *et al.*, 2022; IEA, 2023). Essa dependência de combustíveis fósseis não apenas perpetua padrões de emissão de gases de efeito estufa (GEE), mas também representa um obstáculo à transição energética.

O contexto das mudanças climáticas, conforme destacado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), afeta a necessidade de transformação da produção de hidrogênio. Com as emissões globais atingindo níveis históricos em 2019, a meta de limitar o aquecimento global a 1,5°C requer mudanças drásticas nos padrões de produção e consumo de energia. O cenário de altas emissões, que projeta um aquecimento de até 5,7°C até 2100, ressalta a importância de desenvolver alternativas sustentáveis (Nazir *et al.*, 2020).

A eletrólise da água é considerada o processo mais utilizado para a produção do H₂, constituindo-se como elemento estratégico nas políticas de descarbonização global. apresentam diferentes níveis de maturidade tecnológica, sendo a Eletrólise Alcalina (AWE) e a Eletrólise por Membrana de Troca de Prótons (PEM) as mais estabelecidas comercialmente, enquanto a Eletrólise por Membrana de Troca Aniônica (AEM) e a Eletrólise de Óxido Sólido (SOEC) encontram-se em estágios mais iniciais de desenvolvimento (Schmidt *et al.*, 2017).

3.5.2 Aplicações Setoriais do H₂

A análise sobre aplicações industriais do hidrogênio é relevante para compreender como tecnologias sistêmicas se desenvolvem a partir da interação entre usos consolidados e aplicações emergentes. Conforme evidenciado por Malerba (2004), diferentes setores apresentam características específicas de conhecimento, tecnologia e demanda que influenciam os padrões de inovação. No caso do hidrogênio, as aplicações industriais tradicionais (representam aquilo que Geels (2002) caracterizaria como regimes sociotécnicos estabelecidos, em que o H₂ já tem função consolidada e mercados estruturados).

a) Refino de Petróleo e Indústria Petroquímica

As refinarias de petróleo são as maiores consumidoras de hidrogênio no mundo, responsáveis por cerca de 52% do consumo total de moléculas de hidrogênio (Zuben *et al.*, 2022).

O refino do petróleo bruto é um termo abrangente que inclui processos para separar diferentes tipos de óleo, como gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, gasolina, diesel, querosene e óleo combustível. O objetivo do refino é transformar o petróleo em uma mistura complexa de hidrocarbonetos com diferentes propriedades físicas e químicas, permitindo frações mais simples e úteis. Para atender a requisitos e padrões de qualidade do mercado de petróleo, processos de tratamento específicos são necessários para converter cadeias de hidrocarbonetos em cadeias mais curtas. O hidrotratamento e o hidrocrackeamento são os dois principais processos que utilizam hidrogênio (Nazir *et al.*, 2020).

O processo de reforma do hidrocarboneto é um método para converter combustíveis em H₂ utilizando técnicas de reforma. O hidrocarboneto é convertido em H₂ e CO₂ no processo de reforma a vapor. O processo consiste em várias etapas principais, incluindo a geração de gás de reforma ou síntese, o deslocamento de gás de água e a purificação de gás. As matérias-primas usadas nesse processo incluem metano, gás natural e outros gases contendo metano, que são combinados com hidrocarbonetos leves, como etano, propano, butano, pentano, nafta leve ou pesada e biometanol ou bioetanol. O processo de reforma a vapor é altamente desenvolvido, e amplamente utilizado para produção de H₂ em grande escala (Nazir *et al.*, 2020).

b) Produção de Amônia e Fertilizantes

A amônia (NH₃) destaca-se como um composto químico fundamental na indústria, caracterizada por uma estrutura molecular formada por um átomo central de nitrogênio ligado a três átomos de hidrogênio. Em condições ambientais padrões, apresenta-se como um gás incolor com odor característico. Sua produção industrial em larga escala é viabilizada pelo processo Haber-Bosch, uma rota tecnológica que promove a propriedade catalítica entre

nitrogênio gasoso (N_2) e hidrogênio gasoso (H_2) sob condições termodinâmicas específicas, em temperaturas próximas a $500^\circ C$ e pressões elevadas (Zhao *et al.*, 2024; Afif *et al.*, 2016).

A viabilização industrial do processo Haber-Bosch é pautado na disponibilidade e no processamento de suas matérias-primas principais. Nesse contexto, enquanto o nitrogênio é produzido diretamente da atmosfera por processos criogênicos de separação do ar, o hidrogênio apresenta uma matriz de produção diversificada, com a predominância de combustíveis fósseis.

A reforma a vapor proveniente do gás natural consiste na principal rota, respondendo por aproximadamente 75% da produção global de hidrogênio para síntese de amônia. Tecnologias alternativas, como eletrólise da água, gaseificação de biomassa e processamento de resíduos, embora promissoras do ponto de vista da sustentabilidade, ainda não possuem viabilidade técnico-econômica em escala industrial (Zhao *et al.*, 2024).

As aplicações industriais da amônia abrangem tanto seu uso em forma pura quanto sua aplicação como matéria-prima nas sínteses de compostos nitrogenados. No cenário global, aproximadamente 80% da produção de NH_3 destina-se à produção de fertilizantes. (Radar H_2 , 2024). Em aplicações não agrícolas, a amônia também desempenha funções essenciais. Na indústria química, por exemplo, é utilizada como matéria-prima para a produção de ácido nítrico, que compõe a fabricação de corantes, fibras sintéticas e materiais poliméricos. Além disso, integra processos de síntese de explosivos (Afif *et al.*, 2016).

Dessa maneira, no contexto da transição energética, a amônia é considerada um potencial vetor energético, devido à sua capacidade de armazenamento e transporte de hidrogênio em sistemas móveis. A aplicação abrange células de combustíveis e motores de combustão interna (Afif *et al.*, 2016).

A infraestrutura logística existente para amônia constitui outro fator relevante a ser considerado em sua avaliação como vetor energético. Como um dos produtos químicos comercializados globalmente, a NH_3 dispõe de uma rede de transporte e armazenamento bem desenvolvida (Valera-Medina *et al.*, 2018). Em contrapartida, o transporte de hidrogênio puro apresenta desafios técnicos específicos, incluindo requisitos de materiais especiais para contenção, condições de alta pressão para armazenamento e questões relacionadas à difusão molecular.

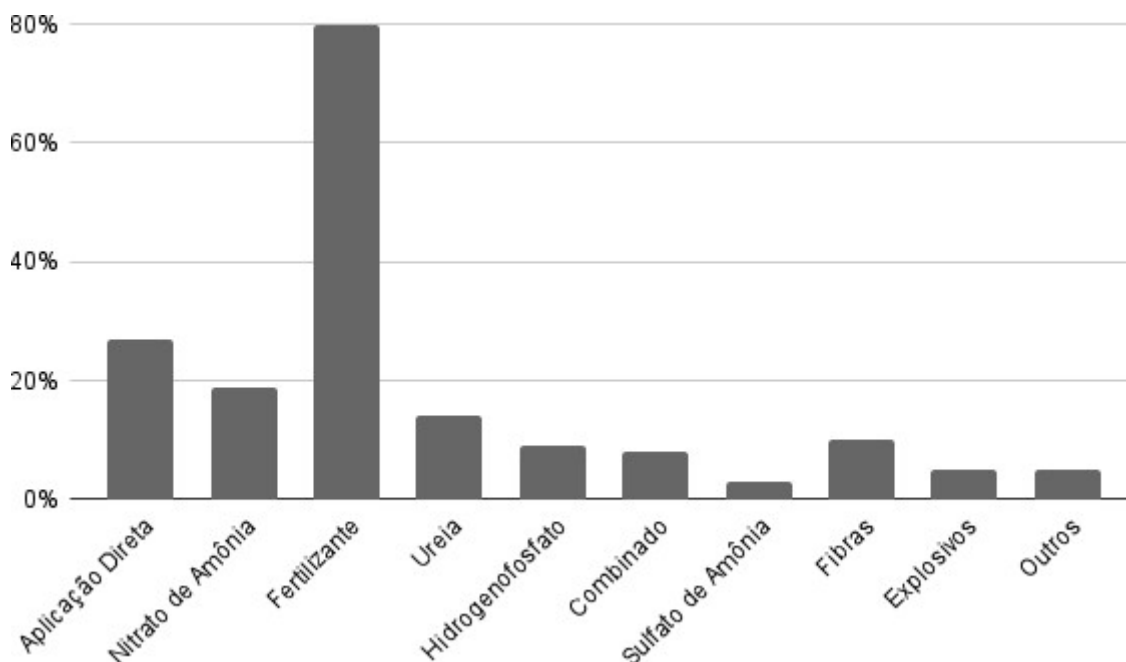
Entretanto, embora os protocolos de segurança sejam estabelecidos para a possibilidade de utilização industrial, os aspectos ambientais apresentam desafios adicionais para sua implementação como vetor energético. Com relação a emissões de gases de efeito estufa, o processo predominante de produção via reforma a vapor resulta na geração de 2,4 Mt de CO_2 por tonelada de NH_3 produzida, o que supera em duas vezes, por exemplo, as emissões da

produção siderúrgica, e em quatro vezes aquelas oriundas da fabricação de cimento (Negro; Noussan; Chiaramonti, 2023). Essa intensa emissão exige uma avaliação crítica de sua implementação em larga escala, e o uso do hidrogênio renovável na produção da amônia pode ser uma alternativa (Irena *et al.*, 2022).

A produção de amônia por rotas renováveis mantém a estrutura fundamental do processo Haber-Bosch, diferenciando-se apenas na etapa inicial. Nesse processo, a eletrólise da água para obtenção do hidrogênio por fontes renováveis, como solar e eólica, pode substituir o processo convencional de reforma do vapor do gás natural, enquanto as etapas subsequentes de separação do ar para obtenção de nitrogênio e síntese catalítica da amônia permanecem inalteradas (Negro; Noussan; Chiaramonti, 2023). No entanto, um ponto a ser observado é que a conversão de energia elétrica em química apresenta eficiência limitada: a produção de 100 kWh de hidrogênio demanda cerca de 138 kWh de eletricidade renovável (Negro; Noussan; Chiaramonti, 2023).

O Brasil é um dos maiores importadores globais de fertilizantes, consumindo cerca de 8% do total mundial, mas produzindo apenas uma pequena fração de sua demanda interna. Para contextualizar em números, a IFA (2024) demonstra que enquanto o Brasil importa mais de 80% de seus fertilizantes nitrogenados, países como China e Rússia não apenas são autossuficientes, como figuram entre os principais exportadores globais. Portugal também apresenta uma dependência de importações, porém em volumes menores, alinhados com sua menor extensão territorial e demanda agrícola (RadarH₂, 2024).

Figura 1 – Principais aplicações da amônia (NH_3) e intensidade de uso



Fonte: Adaptado de Afif *et al.* (2016).

c) Siderurgia e Metalurgia

O aço constitui um elemento fundamental para o desenvolvimento industrial global. É uma liga metálica composta predominantemente de ferro e carbono, além de outros elementos, como manganês, silício, fósforo, enxofre e oxigênio, em menores proporções. A versatilidade desse material permite sua aplicação em diversos setores estratégicos, desde infraestrutura e construção civil até manufatura de bens de consumo e equipamentos de precisão, o que evidencia sua relevância para a economia mundial.

A indústria siderúrgica caracteriza-se pela intensidade de capital e economia de escala, o que demanda investimentos robustos em instalações produtivas, com longos ciclos de retorno financeiro. Segundo dados da Worldsteel Association (2025), a produção global atingiu 1.892,2 Mt de aço bruto em 2023, com concentração na China, responsável por 1.019,1 Mt (53,9%). A estrutura produtiva global dessa indústria apresenta uma distribuição heterogênea de tecnologias, influenciada por fatores históricos e econômicos e pela disponibilidade de recursos regionais.

A China, responsável por cerca de 60% da produção mundial de aço, opera predominantemente com altos-fornos convencionais (BF-BOF), que são intensivos no uso de carvão mineral e exigem elevados investimentos em infraestrutura fixa. De forma semelhante,

o Brasil mantém uma estrutura produtiva baseada em altos-fornos, embora utilize carvão vegetal em algumas de suas plantas (fonte) Worldsteel Association (2025)

Em contraste, regiões como Europa e Estados Unidos apresentam um perfil tecnológico mais diversificado, com uma maior participação de fornos elétricos a arco (EAF) – cerca de 70% nos EUA e 40-45% na Europa –, devido à maior disponibilidade de sucata metálica e, no caso americano, acesso a gás natural a custos competitivos. Essa heterogeneidade tecnológica global, somada ao alto custo de capital das instalações siderúrgicas existentes, com vida útil aproximada de 20 a 30 anos, e à natureza de comércio internacional do aço, impõe desafios específicos para a transição tecnológica em diferentes regiões, exigindo estratégias de descarbonização adaptadas às realidades locais (Worldsteel Association, 2025).

No contexto das mudanças climáticas, o setor apresenta desafios para sua descarbonização. A complexidade desse processo deriva da múltipla função do carbono na produção do aço: além de fonte energética para atingir as elevadas temperaturas requeridas, atua como elemento químico essencial, tanto na composição do material quanto na redução do minério de ferro. Essa característica, associada aos investimentos em ativos de longa duração (20-30 anos) e à natureza globalizada do mercado, demanda uma abordagem estratégica para a transição tecnológica.

As estratégias de descarbonização do setor siderúrgico têm sido desenvolvidas em duas frentes temporais distintas. No horizonte 2020-2030, conforme análise do roadmap da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), predominam medidas focadas em eficiência material (43%) e tecnologias de desempenho (51%).

Uma primeira vertente, de eficiência material, fundamenta-se no desenvolvimento de aços de alta resistência e na otimização estrutural dos produtos, o que permite reduções no consumo de material por unidade de produto final. Em contrapartida, mas em menor volume, o cenário atual projeta um aumento na demanda de aço para infraestruturas de energia renovável, na fabricação de pás eólicas e sistemas de transmissão de energia. Esse crescimento está relacionado à expansão do setor de energias limpas e à necessidade de estruturas robustas para suportar essas tecnologias emergentes.

Para o horizonte 2020-2050, o roadmap da IEA projeta uma mudança nas estratégias, com menor ênfase em medidas incrementais e maior participação de tecnologias disruptivas. Esse cenário contempla a consolidação do CCUS (16%) e a diversificação tecnológica, por meio de eletrificação (4%), hidrogênio (8%) e bioenergia (6%), além de outros processos (5%), totalizando 39% das soluções propostas. Essa transição reflete a necessidade de transformações estruturais nos processos produtivos, para atingir as metas estabelecidas no Acordo de Paris.

Em linhas gerais, o processo tradicional de produção do aço em alto-forno (BF) inicia-se com a mistura de minério de ferro, coque e calcário. O coque, produto de carbono duro, poroso e quase puro, é obtido pelo aquecimento do carvão na ausência de ar, utilizado tanto como combustível quanto como agente redutor no alto-forno. Nesse processo, forma-se monóxido de carbono, que reage com óxido de ferro para produzir ferro-gusa fundido e dióxido de carbono.

Em uma segunda etapa, o ferro-gusa é transferido para um conversor, onde, a partir da injeção de oxigênio, ocorre a remoção do carbono presente no ferro, com emissão adicional de CO₂. Nesse ciclo completo, incluindo os processos de redução e combustão, ocorre em média a emissão de 1,73 t de CO₂ por tonelada de aço produzido (Bartlett; Krupnick, [S.d.]).

É importante ressaltar que, embora o hidrogênio apresente grande potencial como agente redutor, o carbono mantém sua dominância na redução de óxidos de ferro, uma vez que o coque desempenha papel estrutural de difícil substituição no alto-forno. Esse cenário reforça a necessidade de desenvolvimento contínuo de tecnologias que permitam a integração gradual do hidrogênio nos processos siderúrgicos existentes.

O cenário siderúrgico mundial, segundo a World Steel Association (2024), é liderado por 50 empresas, que, juntas, produziram 1.892,2 milhões de toneladas de aço bruto, em 2023. Entre elas, cinco contam com operações no Brasil, sendo apenas uma de capital nacional, a Gerdau (33ª posição). As outras quatro são as multinacionais ArcelorMittal (2ª posição), Nippon Steel (4ª posição), POSCO (7ª posição) e Ternium/Techint (26ª posição). A China Baowu lidera o ranking global, com produção de 130,77 Mt/ano, evidenciando a expressiva presença chinesa no setor. A participação dessas empresas no mercado brasileiro reflete a relevância do país no cenário siderúrgico global, mesmo com representação limitada de empresas nacionais entre as 50 maiores produtoras mundiais. Portugal não aparece no ranking.

d) Mobilidade e Transportes

A demanda por hidrogênio atingiu um recorde histórico em 2022, mas continua concentrada em aplicações tradicionais. Como ressaltado anteriormente, a demanda continua centralizada na indústria e no refino, com menos de 0,1% proveniente de novas aplicações na indústria pesada, no transporte ou na geração de energia (IEA, 2023).

Assim, o hidrogênio tem potencial para ser usado em escala no transporte, em sistemas de geração de energia com células de combustível, em motores de combustão interna ou turbinas (Abe *et al.*, 2019). Como exemplo, a produção de H₂ nos EUA é de cerca de 14 milhões de toneladas/ano, o que é suficiente para abastecer cerca de 35 milhões de carros ou cerca de 8 milhões de residências (Nazir *et al.*, 2020).

No entanto, é importante ressaltar que a viabilidade econômica da produção de hidrogênio e a segurança do suprimento de energia são os principais desafios para alcançar a chamada economia do hidrogênio.

3.6 Síntese Metodológica

Estratégia de pesquisa:	Qualitativa descritiva com componente quantitativo complementar
Abordagem:	Pesquisa de campo - Estudo de casos múltiplos
Questões de pesquisa	
Questão central: Como universidades em diferentes sistemas nacionais de inovação participam do desenvolvimento de tecnologias do H ₂ , considerando seus tipos e distintos estágios na cadeia produtiva e os contextos em que se inserem?	
Questão complementar: No caso brasileiro, qual é o panorama quantitativo da pesquisa nessa área e como ele contextualiza o caso específico da UFMG?	
Objetivo Geral	
Analisar as trajetórias de desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio (H ₂), identificando os diferentes arranjos institucionais e as áreas de especialização na cadeia produtiva desse vetor energético em duas universidades de diferentes países.	
Casos	
Caso 1: UFMG (Brasil)	
Caso 2: UPorto (Portugal)	
Delimitação do Campo: Relevância institucional, cooperação bilateral Brasil-Portugal, recorte tecnológico em H ₂ como vetor energético (2020-2025).	

Métodos de coleta de dados
1ª Fase – Entrevistas semiestruturadas no contexto português
8 pesquisadores de laboratórios associados e institutos (LAQV, LAETA, ALiCE, INEGI, INESC TEC)
Período: março-agosto 2024
2ª Fase – Entrevistas semiestruturadas no contexto brasileiro
4 pesquisadores (3 UFMG, 1 UFV); Departamentos: Engenharia Nuclear, Química
Período: novembro 2024 a março 2025
3ª Fase – Análise documental e mapeamento quantitativo
Fontes: CNPq, FINEP, ANP, FAPEMIG, FUNDEP, FCO
Resultado: 128 projetos, 89 pesquisadores, 47 instituições (2003-2025)
Métodos de tratamento e análise dos dados
Análise Quantitativa: Categorização temporal, institucional, por cadeia produtiva, rotas tecnológicas e setores.
Análise Qualitativa: Análise de conteúdo (Atlas.ti); Dimensões: trajetórias tecnológicas, redes de interação, visão de especialistas.
Triangulação metodológica: Integração de dados quantitativos e qualitativos com validação através de orientações.

Resultados Empíricos:
- Reconhecimento de diferentes estruturas institucionais: o modelo português (instituições que interagem com a personalidade jurídica) em contraste com o brasileiro (departamentos universitários).
- Mapeamento de especializações tecnológicas complementares: UFMG concentrada em produção (80%) vs. UPorto equilibrada (50% produção, 33% armazenamento, 33% distribuição).
- posicionamento marginal da UFMG (2,5% dos projetos nacionais) comparado à USP (21,1% projetos ANP) e UFV (10,9% projetos CNPq).
Teóricos:
- Expansão da literatura multissistêmica: universidades como coordenadoras de acoplamentos funcionais entre sistemas (energia-química-mobilidade).
- Limitações da Hélice Tríplice: necessidade de contemplar coordenação horizontal entre universidades, não apenas vertical universidade-empresa-governo.
- Evidência de catching-up tecnológico: janelas de oportunidade permitem a economias emergentes desenvolver capacidades competitivas simultaneamente a países avançados.
Práticos:
- Estrutura sistematizada implementável pelo ESCALAB para conexão universidade-indústria em tecnologias de H2
- Recomendações para reorientação estratégica da UFMG: articulação entre arranjos internos e participação sistemática em chamadas específicas

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Esta seção apresenta os resultados obtidos no contexto brasileiro, centrado na Universidade Federal de Minas Gerais, contemplando tanto a análise institucional específica quanto o mapeamento sistêmico do desenvolvimento tecnológico em hidrogênio no sistema nacional de inovação. O caso português, por sua vez, focado na Universidade do Porto, envolve a análise dos arranjos institucionais, tais como laboratórios associados e grupos de pesquisa.

Os resultados são estruturados conforme três dimensões analíticas centrais:

i) Dimensão Institucional: caracteriza as trajetórias de desenvolvimento tecnológico específicas de cada universidade, contemplando arranjos institucionais, redes de colaboração, tipos de tecnologia, financiamento e maturidade tecnológica.

ii) Dimensão Tecnológica: analisa o posicionamento das universidades estudadas, incluindo produção, armazenamento e distribuição, para compreender se há aplicação industrial específica.

iii) Dimensão Sistêmica: busca compreender a visão de especialistas sobre a economia do hidrogênio em cada caso, considerando as especificidades dos sistemas de inovação.

Para apresentar os resultados dessas três dimensões, foi necessária uma descrição dos sistemas científicos dos dois países.

4.1 O Caso Português: Uporto e Institutos de Interface

Os laboratórios associados constituem estruturas fundamentais no sistema científico português, estabelecidos no início do século XXI como entidades de investigação e desenvolvimento tecnológico reconhecidas pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). No contexto da Universidade do Porto, três laboratórios associados desenvolvem pesquisas em áreas estratégicas: o Laboratório Associado para a Química Verde (LAQV), vinculado à Rede de Química e Tecnologia (REQUIMTE); o Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeroespacial (LAETA); e o Laboratório Associado em Engenharia Química (ALiCE).

A Rede de Química e Tecnologia (REQUIMTE) iniciou suas atividades em 1996, estabelecida por pesquisadores da Universidade NOVA de Lisboa e da Universidade do Porto. A partir das áreas metropolitanas de Lisboa e Porto, a rede expandiu suas atividades para Aveiro, Coimbra, Évora e outras localidades do território português, constituindo uma estrutura nacional de investigação em química.

Em janeiro de 2003, a REQUIMTE formalizou-se como organização científica sem fins lucrativos. Esse processo de institucionalização foi antecedido pelo reconhecimento do

Ministro da Ciência e Ensino Superior português, em novembro de 2001, que designou a REQUIMTE como entidade anfitriã do Centro de Excelência em Química Verde, posteriormente denominado Laboratório Associado para a Química Verde (LAQV).

O LAQV estabeleceu objetivos específicos: realizar investigação em Química Sustentável, desenvolver produtos e tecnologias limpas e apoiar a indústria na implementação de processos químicos não agressivos e na valorização de resíduos industriais e agrícolas. A estrutura do laboratório integra docentes, investigadores e funcionários da Universidade de Aveiro, da Universidade NOVA de Lisboa e da Universidade do Porto, além de profissionais de outras instituições de ensino superior e centros de investigação.

As atividades de pesquisa do LAQV organizam-se em seis linhas temáticas: Energy – Clean & Renewable; Environment – Monitoring & Analysis; Food & Nutrition; Functional Materials; Health & Wellbeing; e Resource Efficiency – Sustainable Processing. Essa estrutura alinha-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas para 2020-2030, às diretrizes da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) e à agenda nacional portuguesa para inovação 2020-30.

O LAQV desenvolve investigações nos campos de Química, Bioquímica, Engenharia Química e suas aplicações, contando com financiamentos nacionais e internacionais para seus projetos de pesquisa. Essa capacidade de captação de recursos pode ser exemplificada pelo projeto SunStorage, sob responsabilidade do professor Adélio Mendes, no LAQV-REQUIMTE. O projeto, financiado pelo programa nacional P2020/COMPETE (SAICTPAC/0046/2015 - POCI-01-0145-FEDER-016387), desenvolve pesquisas em conversão direta e eficiente da luz solar em combustíveis químicos e eletroquímicos armazenáveis, utilizando dispositivos PEC (Photoelectrochemical Cells) para converter luz solar em energia eletroquímica em baterias de fluxo redox (RFB) e realizar a conversão de CO₂ em CO e metanol.

O Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeroespacial (LAETA), estabelecido em 2006, constitui uma estrutura de investigação científica que reflete a evolução do sistema científico português em direção a modelos colaborativos integrados. Reconhecido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), instituição governamental responsável pelo financiamento e pela avaliação do sistema científico nacional português, o LAETA opera sem personalidade jurídica própria, desenvolvendo investigação científica e promovendo inovação tecnológica em setores estratégicos para Portugal.

A estrutura organizacional do LAETA integra quatro instituições de gestão: o Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), vinculado à

Universidade do Porto; o Instituto de Engenharia Mecânica (IDMEC), do Instituto Superior Técnico; a Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI); e o AEROG (Aeronautics and Astronautics Research Group), ambos da Universidade de Coimbra. Essa configuração articula-se com quatro principais instituições de ensino superior: Universidade do Porto, Técnico de Lisboa, Universidade de Coimbra e Universidade da Beira Interior.

O laboratório estrutura suas atividades em cinco linhas temáticas: Energia Sustentável, Transportes de Superfície, Espaço e Aeronáutica, Produção Avançada, e Saúde e Segurança. Essa organização alinha-se com sua missão de promover inovações impulsionadas pela ciência e pela transferência de conhecimento para a indústria, abordando as diferentes etapas da cadeia de valor da pesquisa, as necessidades dos setores-alvo e os desafios sociais relacionados.

O LAETA integra redes de colaboração nacional e internacional, por meio de diversas parcerias. Em âmbito internacional, participa de sociedades e comunidades científicas, além de plataformas temáticas e associações como a International Energy Agency (IEA) e a Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE). No contexto nacional, vincula-se a infraestruturas de investigação da FCT e laboratórios colaborativos como o HYLAB (focado em tecnologias do hidrogênio), o ECOLAB (direcionado a soluções ambientais) e o RAIL LAB (especializado em tecnologias ferroviárias).

As atividades de pesquisa do LAETA podem ser exemplificadas pelo projeto de requalificação da força de trabalho da União Europeia para frotas de hidrogênio e operação e manutenção de infraestrutura. Esse projeto aborda o desafio de formar técnicos capacitados para manter trens de força H₂ e gerenciar Estações de Reabastecimento de Hidrogênio (HRS), atendendo às necessidades emergentes do setor de mobilidade baseada em hidrogênio.

Para o período 2021-2030, o LAETA estabeleceu objetivos setoriais específicos. No setor de energia, busca implementar localmente metas nacionais, europeias e internacionais relacionadas às mudanças climáticas, focando em sistema energético, gestão e recuperação de sistemas naturais e melhoria de infraestruturas existentes. No setor de transportes, visa promover meios mais sustentáveis, com meta de redução de 25% nas emissões de gases de efeito estufa até 2030 em comparação com 2005, especialmente nos subsetores automóvel, aeronáutico e ferroviário, priorizando durabilidade, reciclabilidade e segurança dos veículos.

O Laboratório Associado em Engenharia Química (ALiCE) representa atualmente o maior dessa natureza em Portugal, reunindo mais de 450 investigadores, dos quais 40% são doutorados. Ao longo de duas décadas, consolidou-se como centro de referência nacional,

integrando as competências de pesquisa e desenvolvimento de três unidades fundamentais: CEFT, LEPABE e LSRE-LCM.

O ALiCE fundamenta sua atuação na convergência de três unidades de pesquisa complementares. O Centro de Estudos de Fenômenos de Transporte (CEFT) dedica-se à investigação de processos fundamentais em engenharia química. O Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia (LEPABE) concentra-se no desenvolvimento de soluções tecnológicas sustentáveis. E o Laboratório de Processos de Separação e Reação – Laboratório de Catálise e Materiais (LSRE-LCM) foca em processos químicos avançados. Essa estrutura integrada fortalece a capacidade do laboratório de desenvolver pesquisa tanto fundamental quanto aplicada.

A missão do ALiCE centra-se no avanço do conhecimento científico e tecnológico para o desenvolvimento de processos e produtos inovadores e sustentáveis, respondendo aos desafios da sociedade e às demandas do desenvolvimento industrial. Essa missão materializa-se em uma abordagem que combina pesquisa fundamental com aplicações práticas, estabelecendo pontes efetivas entre o conhecimento acadêmico e as necessidades do setor produtivo.

A estrutura institucional do ALiCE opera sem personalidade jurídica própria, funcionando essencialmente como estrutura de pesquisa dentro do ambiente universitário. Sua gestão é compartilhada entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e o Instituto Politécnico de Leiria (IPLEiria), tendo sua principal localização no Departamento de Engenharia Química da FEUP. Essa configuração institucional permite a integração entre pesquisa acadêmica e aplicações industriais.

O laboratório organiza suas atividades em cinco linhas temáticas: Indústria Química, BioIndústria, Materiais, Energia e Ambiente. Na linha temática de energia, que representa uma área de pesquisa particularmente ativa, desenvolvem-se investigações em três vertentes principais: coleta, conversão e armazenamento de energia de fontes renováveis; tecnologias de produção de hidrogênio e combustíveis sintéticos; e eficiência energética e conforto. O ALiCE mantém parcerias estratégicas com empresas internacionais de destaque, como ExxonMobil Chemical Company, ArcelorMittal, Evonik e Novo Nordisk.

Além das atividades de pesquisa fundamental, o laboratório atua na transferência de tecnologia para a indústria, contribuindo para a competitividade das empresas nacionais através da aplicação de conhecimento multidisciplinar. Essa atuação já resultou na criação de spin-offs, demonstrando sua capacidade de converter conhecimento científico em empreendimentos tecnológicos.

O portfólio de serviços do ALiCE abrange as áreas de engenharia química, biológica, ambiental, de materiais e de energia. Seus serviços incluem pesquisa e desenvolvimento, projeto e implementação de equipamentos e soluções para testes em escala-piloto, análises químicas, físicas e mecânicas complexas, além de consultoria científica e técnica especializada.

O financiamento do laboratório caracteriza-se por sua diversidade de fontes, incluindo financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) como Laboratório Associado, projetos de pesquisa competitiva nacionais e europeus, colaborações com a indústria e outros fundos de pesquisa. As empresas participam como parceiras em projetos específicos ou através de acordos de colaboração em pesquisa, sem participação formal na governança da instituição.

Os laboratórios associados – LAQV, LAETA e ALiCE – compartilham características estruturantes que definem sua atuação no sistema científico português. Os três operam sem personalidade jurídica própria e recebem financiamento-base da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), caracterizando-se como estruturas de pesquisa integradas ao ambiente universitário. Cada laboratório desenvolveu expertise em áreas específicas: o LAQV, na química sustentável, o LAETA, em energia, transportes e aeroespacial, e o ALiCE, em engenharia química.

Apesar das diferentes áreas de atuação, todos mantêm forte alinhamento com objetivos de desenvolvimento sustentável, e estabelecem pontes com o setor produtivo, ainda que de formas distintas. O LAQV organiza-se em seis linhas temáticas, que priorizam sustentabilidade e inovação. Já o LAETA estrutura-se em cinco áreas focadas em desafios tecnológicos específicos, enquanto o ALiCE desenvolve cinco linhas de pesquisa orientadas para processos e produtos industriais. Uma distinção notável reside em suas estruturas de gestão: enquanto o LAQV integra três universidades principais, o LAETA articula quatro instituições de gestão, e o ALiCE opera sob gestão compartilhada entre uma universidade e um instituto politécnico.

Essa configuração dos laboratórios associados, embora eficaz para a pesquisa científica, apresenta limitações quanto à flexibilidade administrativa e à interação direta com o mercado. É nesse contexto que emergem os institutos de interface, estruturas com personalidade jurídica própria e maior autonomia administrativa, estabelecidas especificamente para facilitar a transferência de tecnologia e a prestação de serviços ao setor produtivo.

Os institutos de interface emergiram no contexto português como organizações que estabelecem uma ponte entre o ambiente acadêmico e o setor produtivo. No âmbito da Universidade do Porto, destacam-se o Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI) e o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC).

O INEGI emergiu a partir do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), em 1986, estabelecendo-se como um Centro de Tecnologia e Inovação (CTI). Desde sua concepção, o instituto dedica-se à realização de atividades de investigação científica e desenvolvimento, combinando pesquisa fundamental e aplicada, com particular atenção à valorização econômica dos resultados e à prestação de serviços no campo da inovação tecnológica.

Para viabilizar essa missão, o INEGI estruturou-se como uma associação científica e técnica de direito privado, sem fins lucrativos, obtendo o estatuto de utilidade pública. Essa configuração jurídica confere ao instituto a flexibilidade necessária para filiar-se a organismos, associações e agências, tanto nacionais quanto estrangeiras, além de permitir a subscrição de capital social em sociedades comerciais, em Portugal e no exterior, potencializando a valorização econômica dos resultados de P&D e o desenvolvimento tecnológico industrial.

O modelo de governança do INEGI reflete sua vocação para integrar academia e indústria. Os associados fundadores – Universidade do Porto, Associação dos Antigos Alunos do Departamento de Engenharia Mecânica (ADEMEC), Associação Portuguesa de Gestão e Engenharia Industrial (APGEI) e Associação dos Industriais Metalúrgicos, Metalomecânicos e Afins de Portugal (AIMMAP) – estabeleceram uma estrutura que permite a contínua incorporação de novos parceiros.

A admissão de novos associados efetivos, sejam pessoas, sejam associações ou instituições comprometidas com o desenvolvimento industrial, ocorre mediante deliberação da Assembleia Geral ou do Conselho Geral e de Supervisão, com posterior ratificação em Assembleia Geral. Essa abertura resultou em uma composição societária que equilibra interesses públicos e privados, com 51,5% de fundos associativos privados – distribuídos entre empresas como EDP Renováveis, Bosch Termotecnologia e TotalEnergies Renewables Portugal – e 48,3% de fundos públicos, sendo 42,5% da Universidade do Porto.

A estrutura institucional consolidada permite ao INEGI organizar suas atividades de investigação de forma sistemática e abrangente. Seis grupos de pesquisa – Materiais e Processos de Fabrico; Estruturas & Sistemas Mecânicos; Energia, Ambiente & Sustentabilidade; Sistemas & Controlo Inteligentes; Biomecânica; e Gestão e Engenharia Industrial – articulam-se com oito linhas temáticas estratégicas. Essas linhas, que incluem Desenvolvimento de Produto, Fabrico Aditivo, Processos de Fabrico, Materiais Compósitos, Indústria 4.0, Biomecânica, Energia e Descarbonização, e Sustentabilidade e Circularidade, permitem uma abordagem integrada dos desafios tecnológicos contemporâneos.

O campo energético exemplifica a capacidade do instituto de converter sua estrutura organizacional em resultados práticos. Com integração de competências multidisciplinares e parcerias industriais estratégicas, o INEGI desenvolve tecnologias para energia eólica, sistemas de armazenamento e conversão de energia, incluindo projetos inovadores em hidrogênio verde e eficiência energética industrial. Essa atuação não apenas responde às diretrizes estratégicas da União Europeia para transição energética e descarbonização, como demonstra a capacidade do instituto de transformar pesquisa em soluções concretas.

A experiência acumulada e a estrutura consolidada do INEGI materializam-se em um portfólio abrangente de serviços laboratoriais e consultoria especializada. As competências desenvolvidas nos grupos de pesquisa traduzem-se em serviços que abarcam desde Energia Eólica e Solar Fotovoltaica até Previsão de Energia Renovável, estendendo-se a áreas como Economia Circular, Gestão e Engenharia Industrial, Tecnologias de Produção e Estudos Ambientais. Essa capacidade de oferecer soluções integradas reflete a maturidade institucional do INEGI e sua efetividade em cumprir sua missão de ser ponte entre o conhecimento acadêmico e as necessidades industriais.

O Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC) constitui-se como uma associação científica e técnica sem fins lucrativos, estabelecida por tempo indeterminado. Com uma equipe de aproximadamente 1000 pesquisadores, dos quais 340 são doutores, o instituto desenvolve atividades fundamentais de pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico, transferência de tecnologia, consultoria e programas de treinamento avançado.

A estrutura jurídica do INESC TEC permite que o instituto se filie, associe ou adira a organismos com objetivos afins, sejam eles nacionais, sejam estrangeiros ou internacionais, e participe no capital de empresas como instrumento de prossecução de seu objeto. O modelo institucional fundamenta-se em uma estrutura de associados composta pela Universidade do Porto, o Instituto Politécnico do Porto, o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores (INESC) e a Universidade do Minho. A adesão de novos associados far-se-á por proposta do Conselho de Administração, de qualquer associado ou a pedido da entidade interessada, mediante especificação dos motivos de adesão e do contributo pretendido para os fins associativos.

As atividades do instituto concentram-se em áreas estratégicas como Engenharia e Gestão Industrial, Robótica, Tecnologia da Informação, Ciência da Computação, Telecomunicações e Eletrônica, Energia e Gestão da Inovação. Essa atuação é fortalecida por parcerias internacionais estabelecidas a partir dos programas CMU Portugal (Carnegie Mellon

University), MIT Portugal (Massachusetts Institute of Technology) e UT Austin Portugal (University of Texas at Austin).

O INESC TEC participa ativamente em mais de cinquenta associações e clusters setoriais, incluindo 6G-IA (6G Smart Networks and Services Industry Association), ACPMR (Associação Cluster Portugal Mineral Resources), AEDCP (Associação Portuguesa para o Cluster das Indústrias Aeronáutica, do Espaço e da Defesa), APICCAPS (Associação Portuguesa dos Industriais de Calçado) e BATPOWER (Associação Portuguesa para o Cluster das Baterias). O instituto também fomenta a criação de spin-offs de base tecnológica para explorar a propriedade intelectual desenvolvida internamente.

O financiamento das atividades, conforme relatório de 2024, estrutura-se em três fontes principais: 65% dos recursos são provenientes de programas nacionais, 28% são originários de programas da Comissão Europeia e o restante é derivado de vendas e serviços prestados. A expressiva atuação internacional do instituto materializa-se em 70 projetos ativos financiados pela União Europeia, demonstrando sua capacidade de participação em iniciativas do programa Horizonte 2020.

Os modelos institucionais do INESC TEC e do INEGI representam diferentes concepções de articulação entre academia e indústria no sistema português de inovação. As duas instituições, constituídas como associações privadas sem fins lucrativos, desenvolveram estruturas organizacionais com características próprias em sua composição e governança. A estrutura do INEGI compreende participação empresarial, com 51,5% dos fundos associativos provenientes do setor privado e 48,3% de origem pública, consolidando um modelo que integra diretamente os interesses industriais em seus processos decisórios. O INESC TEC, por sua vez, assenta sua base associativa em instituições acadêmicas e de investigação, estabelecendo relações com o setor produtivo mediante participação em clusters setoriais e desenvolvimento de projetos específicos.

4.2 O Caso Brasileiro e a UFMG

O caso brasileiro e a UFMG devem ser observados inicialmente à luz do papel do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que ocupa posição central no sistema brasileiro de ciência, tecnologia e inovação, sendo uma das principais agências de fomento à pesquisa em áreas estratégicas para o desenvolvimento nacional. Fundado em 1951 e vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), o CNPq tem como missão fomentar a ciência, a tecnologia e a inovação, além de atuar na

formulação de suas políticas, contribuindo para o avanço das fronteiras do conhecimento, o desenvolvimento sustentável e a soberania nacional.

A relevância do CNPq para o presente estudo deriva de sua representatividade, com presença em diversas universidades do país, e de seu papel estruturante na formação e na consolidação de grupos de pesquisa. Para esta pesquisa, utilizou-se o Painel de Fomento em Ciência, Tecnologia e Inovação do CNPq, plataforma lançada em maio de 2023 e atualizada mensalmente, que disponibiliza dados vigentes sobre todas as linhas de atuação da agência.

A Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) apresenta perfil complementar ao CNPq, com enfoque na promoção da inovação por meio da articulação entre universidades e setor produtivo. Sua atuação distingue-se pelo financiamento de projetos de maior envergadura e complexidade, frequentemente em estágios mais avançados de desenvolvimento tecnológico, posicionando-se como relevante para a transposição de conhecimentos gerados no ambiente acadêmico para aplicações industriais. A análise dos projetos financiados pela FINEP permite, portanto, identificar iniciativas com potencial de implementação no médio prazo e caracterizar os modelos de cooperação universidade-empresa no desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio.

A FINEP também está vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), e apresenta características relevantes que a colocam como agente estratégico no sistema nacional de fomento à pesquisa científica e tecnológica. Sua missão institucional orienta-se para a promoção do desenvolvimento econômico e social brasileiro, mediante o fomento público à ciência, à tecnologia e à inovação, em um espectro abrangente de instituições, contemplando desde empresas e universidades até institutos tecnológicos e outras organizações de natureza pública ou privada. Sua atuação difere no arcabouço institucional brasileiro, estabelecendo complementaridades funcionais com outros órgãos de fomento, como o CNPq.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) tem um papel fundamental no financiamento de pesquisas científicas e tecnológicas, por meio da obrigatoriedade de investimento em pesquisa científica e tecnológica. Essa atuação ultrapassa os limites convencionais da regulação, sendo um mecanismo institucional de fomento à inovação no contexto energético brasileiro.

No arcabouço normativo recentemente estabelecido, destaca-se a centralidade atribuída à ANP no âmbito das tecnologias do hidrogênio. A Lei nº 14.689, de 2 de janeiro de 2024, que institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), designa a ANP como entidade responsável pela regulamentação desse vetor energético no Brasil. Essa atribuição legal potencializa a

relevância dos mecanismos de fomento à pesquisa operacionalizados pela agência, estabelecendo nexos institucionais entre a função regulatória e a indução ao desenvolvimento tecnológico nesse campo específico.

Uma característica fundamental dos programas de P&D geridos por essas agências reside na especificidade de seu modelo de financiamento, que se distingue substancialmente das modalidades convencionais de fomento público direto à pesquisa. A legislação setorial impõe às empresas reguladas pela ANP e pela ANEEL a obrigatoriedade de destinar percentuais predeterminados de seu faturamento para atividades de P&D.

No contexto do setor petrolífero, a Lei nº 9.478/1997 (Lei do Petróleo) estabelece em seu artigo 50 que os contratos de concessão devem contemplar o investimento em P&D correspondente a 1% da receita bruta proveniente da produção em campos de grande volume ou rentabilidade excepcional. De modo análogo, no âmbito do setor elétrico, a Lei nº 9.991/2000 prescreve percentuais específicos de investimento compulsório em P&D, variáveis conforme o segmento de atuação das empresas (geração, transmissão ou distribuição), oscilando entre 0,5% e 1% da receita operacional líquida.

Essa modalidade de financiamento compulsório é um mecanismo de estímulo à pesquisa, distinto dos instrumentos operados por agências tradicionais de fomento, na medida em que institui fluxos financeiros perenes vinculados diretamente ao desempenho econômico dos setores regulados. Tal característica confere previsibilidade aos investimentos em P&D, potencialmente atenuando os efeitos de contingenciamentos orçamentários que frequentemente comprometem os mecanismos convencionais de financiamento público à pesquisa científica.

Na esfera estadual, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) representa um importante alicerce para o desenvolvimento científico e tecnológico regional, com foco em áreas prioritárias para o estado. Seu portfólio abrange tanto chamadas universais, que contemplam áreas de conhecimento, quanto editais direcionados a setores específicos, como o energético, refletindo prioridades estabelecidas nas políticas estaduais de ciência, tecnologia e inovação.

As fundações de apoio analisadas, como a Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP) e a Fundação Christiano Ottoni (FCO), são interfaces administrativas que viabilizam a execução de projetos universitários por diversas fontes de financiamento. Embora vinculadas à Universidade Federal de Minas Gerais, essas fundações apresentam abrangências distintas: enquanto a FCO concentra-se predominantemente na gestão de projetos executados na própria UFMG, a FUNDEP possui escopo mais amplo, administrando iniciativas desenvolvidas em múltiplas instituições. A análise dos projetos geridos por essas fundações

permite identificar arranjos colaborativos não captados pelos mecanismos tradicionais de financiamento, incluindo parcerias estabelecidas diretamente com empresas e órgãos governamentais.

A UFMG diferencia-se dos arranjos para desenvolvimento de tecnologias aplicadas em relação ao modelo europeu representado pela Universidade do Porto. Enquanto o sistema português atua por meio de institutos especializados, como INEGI e INESC TEC, que funcionam como interfaces diretas entre academia e indústria, a UFMG desenvolve suas capacidades tecnológicas mediante um arranjo institucional mais disperso.

Na UFMG, as atividades de pesquisa em tecnologias do hidrogênio distribuem-se entre estruturas organizacionais distintas, destacando-se o Departamento de Engenharia Nuclear, o Departamento de Engenharia Química e o Instituto de Ciências Exatas, especificamente o Departamento de Química, maior departamento do ICEx, com aproximadamente 30% dos depósitos de patentes da universidade (UFMG, 2024). O modelo brasileiro também se dá por meio do intermédio de fundações de apoio, representadas, por exemplo, pela FUNDEP e pela FCO, retratadas durante o estudo.

Os arranjos para desenvolvimento tecnológico na UFMG envolvem, adicionalmente, projetos de extensão que funcionam como mecanismos de articulação entre capacidades acadêmicas e demandas externas. O ESCALAB, centro de escalonamento de tecnologias das áreas de química, física e engenharia, exemplifica esse modelo, constituindo-se como parceria estratégica entre o Centro de Inovação e Tecnologia SENAI Minas Gerais e a UFMG). Essa iniciativa envolve pesquisadores das áreas químicas e de engenharia, com predominância de especialistas em química, desenvolvendo atividades de escalonamento tecnológico que aproximam descobertas laboratoriais de aplicações industriais. Os pesquisadores das áreas de química e energia nuclear na UFMG que desenvolvem projetos relacionados ao hidrogênio caracterizam-se por estarem majoritariamente vinculados a departamentos específicos, trabalhando em laboratórios próprios das unidades acadêmicas.

Os achados desta tese estão estruturados em duas seções complementares. A primeira seção apresenta a análise qualitativa dos dados, organizados segundo três dimensões analíticas estabelecidas. A segunda seção expõe os resultados quantitativos do levantamento do sistema brasileiro de inovação em hidrogênio. Embora não se trate de um estudo comparativo na essência, são realizadas reflexões sobre as similaridades e as diferenças entre as universidades, contemplando as especificidades dos arranjos institucionais e dos contextos nacionais.

A primeira dimensão, denominada Dimensão Institucional, caracteriza as trajetórias de desenvolvimento tecnológico específicas de cada universidade, contemplando os arranjos

institucionais que sustentam as atividades de pesquisa e desenvolvimento em hidrogênio. Essa dimensão abrange as redes de colaboração estabelecidas pelas universidades, tanto no âmbito acadêmico quanto no campo empresarial, além dos tipos de tecnologia desenvolvida e o grau de especialização alcançado em cada área. Também são analisadas as fontes e os mecanismos de financiamento utilizados pelos grupos de pesquisa, bem como o nível de maturidade tecnológica alcançado.

A Dimensão Tecnológica, por sua vez, analisa o posicionamento das universidades estudadas na cadeia de valor do hidrogênio, buscando compreender se há aplicações industriais específicas sendo desenvolvidas. Essa dimensão abrange as tecnologias de produção de hidrogênio desenvolvidas pelos grupos de pesquisa, incluindo métodos de eletrólise, reforma de combustíveis fósseis e processos biológicos. Adicionalmente, analisam-se as soluções propostas para armazenamento do hidrogênio, considerando aspectos tanto técnicos quanto de viabilidade econômica, além dos sistemas de distribuição e as aplicações industriais específicas identificadas nos projetos de pesquisa.

A terceira dimensão, chamada Dimensão Sistêmica, examina a visão de especialistas sobre a economia do hidrogênio em cada caso, considerando as especificidades dos sistemas nacionais de inovação. Essa dimensão busca compreender as perspectivas sobre o desenvolvimento futuro do mercado de hidrogênio, identificando os principais gargalos e oportunidades sistêmicas que influenciam o avanço da tecnologia. Também analisa o papel das universidades no ecossistema mais amplo de inovação, considerando suas interações com empresas, governo e outras instituições de pesquisa.

Para uma melhor compreensão, os resultados encontram-se organizados de forma sequencial, por dimensão, iniciando com o posicionamento da UFMG, seguido pelo da Universidade do Porto. Essa estrutura permite uma compreensão mais clara do posicionamento de cada universidade, dentro de cada dimensão analítica, facilitando a identificação de suas especificidades, pontos fortes e estratégias de desenvolvimento tecnológico em hidrogênio.

A segunda seção apresenta os resultados quantitativos obtidos no levantamento do sistema brasileiro de inovação em hidrogênio, ressaltando a atuação das universidades tanto como proponentes quanto como executoras nos incentivos públicos. Essa análise quantitativa permite compreender a dimensão e a distribuição dos recursos destinados à pesquisa em hidrogênio no Brasil, além de posicionar a UFMG no contexto nacional, oferecendo uma perspectiva complementar aos achados qualitativos das três dimensões analíticas.

5 ANÁLISE QUALITATIVA

5.1 Análise por Dimensão

5.1.1 Dimensão Institucional: UFMG

A trajetória inicial vinculada à UFMG se diferencia das demais por ser um planejamento: a criação de um plano estratégico para a inclusão do hidrogênio no processo de transição energética em Minas Gerais. O projeto explora e delinea possibilidades de produção em grande escala do hidrogênio, com recursos renováveis abundantes na matriz energética, concentrando-se principalmente em estudos sobre energia solar e eólica, bem como potenciais hidrelétricos. Pode ser classificado como uma análise que antecede progressos tecnológicos específicos, ao estabelecer as condições sistêmicas para sua implementação.

Essa visão está alinhada às abordagens multissistêmicas de Markard (2018), no que tange aos acoplamentos funcionais. Outputs de sistemas energéticos renováveis constituem inputs para sistemas de produção de hidrogênio. No que diz respeito à estrutura institucional para este projeto, a UFMG desempenha o papel de líder. Contudo, recebe o apoio de pesquisadores da Universidade Federal de Ouro Preto para sua execução. O auxílio financeiro proporcionado pela FAPEMIG exemplifica uma estratégia de desenvolvimento regional que utiliza instrumentos estaduais de incentivo para abordar questões de importância nacional, evidenciando a forma como fundações estaduais têm a capacidade de exercer uma função relevante em um cenário mais abrangente.

Diferentemente do primeiro projeto, focado em uma visão sistêmica, o segundo representa um desenvolvimento tecnológico aplicado, voltado para pilhas de combustível de óxido sólido que podem ser revertidas. As tecnologias SOFC se distinguem de alternativas comerciais tradicionais, como as pilhas PEM (Membrana de Troca de Próton), devido à sua capacidade de operar a temperaturas elevadas, permitindo a recuperação do calor produzido em reações eletroquímicas, com o objetivo de melhorar a eficiência energética total do sistema.

O atual nível de maturidade tecnológica encontra-se em TRL (Nível de Prontidão Tecnológica) entre 4 e 6, o que caracteriza uma fase intermediária que requer avanços complementares em questões relacionadas à escalabilidade e à integração sistêmica antes da sua comercialização. Contudo, tais características são potenciais para futuras vantagens competitivas, fundamentadas em uma eficiência superior.

A estrutura de financiamento combina fundos do CNPq e do SENAI, além de investimento empresarial direto da Galp, uma companhia portuguesa do ramo energético. Um

dos aspectos desse projeto é a realização de estudos de viabilidade econômica, por meio da contratação de especialistas em economia para a análise de custos. Há, ainda, uma colaboração da Universidade Federal do Rio de Janeiro no desenvolvimento.

A terceira direção tecnológica se distingue pela diversificação de pesquisas que equilibram graus de risco tecnológico e diferentes prazos de desenvolvimento. A primeira linha de pesquisa concentra-se em water splitting fotocatalítico para produção de hidrogênio verde, através da síntese de catalisadores específicos para otimização de conversão solar direta. O estágio tecnológico atual está posicionado entre TRL 2 e 3, indicando um nível de pesquisa básica em que os resultados e a viabilidade comercial ainda são restritos. O direcionamento permanece predominantemente acadêmico, concentrando-se na publicação de artigos científicos que auxiliem no progresso do conhecimento essencial necessário para avanços futuros.

A segunda linha explora conversão térmica de biomassa através de decomposição catalítica que libera hidrogênio mediante processos termoquímicos. O estágio de maturidade tecnológica alcançou TRL 4-5, englobando a participação em programas de inovação e a criação de estudos de viabilidade técnica e econômica que demonstram uma preocupação para uso comercial.

A terceira tecnologia consiste em um catalisador, desenvolvido em parceria com a Universidade Federal de Viçosa e a UNIFEI, com o propósito de regular a liberação de hidrogênio mediante o uso de nióbio. A maturidade tecnológica se encontra no estágio TRL 3-4, indicando uma fase de desenvolvimento conceitual que necessita de validação em ambiente relevante. O financiamento do projeto foi concedido pela FAPEMIG.

Um outro arranjo com participação no desenvolvimento foi o Centro de Escalonamento de Tecnologias e Modelagem de Negócios da UFMG, no qual o projeto foi acelerado. Foi sugerido que uma parte do processo fosse pivotada, devido à importação de um insumo de alto custo e à geração de um resíduo específico.

5.1.2 Dimensão Institucional: Uporto

O avanço das tecnologias relacionadas ao hidrogênio na Universidade do Porto difere daquele observado na UFMG. Tal circunstância ocorre porque a Universidade do Porto estabelece parcerias com Laboratórios e Institutos. A instituição propõe estruturas organizacionais híbridas, que facilitam a transição entre a investigação acadêmica e a aplicação comercial, utilizando mecanismos específicos para a coordenação entre a universidade e a indústria.

Uma das tecnologias foca na criação de sistemas avançados para armazenamento de hidrogênio no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI). O pesquisador mencionado exerce suas atividades em duas áreas tecnológicas que se complementam. A proposta inicial foca em inovações relacionadas ao transporte de hidrogênio líquido em temperaturas criogênicas extremamente reduzidas. A segunda linha de investigação elabora reservatórios com pressão intermediária de 450 bar, voltados para utilizações industriais tradicionais. A maturidade tecnológica dos projetos encontra-se nos níveis TRL 5-6, o que implica que são protótipos funcionais que necessitam da realização de testes de validação operacional, antes de sua introdução no mercado.

O INEGI, um instituto de interface que possui autonomia jurídica e participa ativamente da governança empresarial, realiza a orientação comercial por meio de uma colaboração estruturada com empresas do setor energético. O capital social é constituído pela contribuição de empresas como EDP Renováveis, Bosch Termotecnologia e TotalEnergies. O financiamento caracteriza-se pela prevalência de recursos industriais diretos, refletindo um modelo no qual as empresas contratam desenvolvimento tecnológico particular para satisfazer suas necessidades comerciais específicas.

A segunda trajetória foca na criação de ferramentas sistêmicas voltadas para a gestão integrada da produção de hidrogênio. Esses programas possibilitam o planejamento da produção de hidrogênio fundamentado na previsão de energia renovável, englobando a integração de eletrolisadores, sistemas de compressão, infraestruturas de armazenamento e ligações com redes elétricas. A maturidade tecnológica encontra-se na faixa de TRL 3-4. O financiamento é efetuado por meio da Galp Energia.

A terceira rota concentra-se na elaboração de dispositivos eletroquímicos destinados à produção e à conversão de hidrogênio, desenvolvida no Laboratório Associado em Engenharia Química (ALiCE). O principal enfoque tecnológico centra-se nos eletrolisadores de membrana de troca de próton (PEM). A tecnologia aplicada abrange o desenvolvimento de células de combustível destinadas a drones, aproveitando as características do hidrogênio para ampliar a autonomia operacional em comparação com sistemas que utilizam baterias.

Os eletrolisadores PEM encontram-se em um nível avançado de maturidade tecnológica, apresentando protótipos funcionais que estão na etapa final de avaliação de durabilidade. Os sistemas de células de combustível para drones estão situados nos níveis de TRL 6 a 7, ao passo que os materiais catalíticos permanecem nos níveis 3 a 4.

A quarta rota foca na integração de tecnologias relacionadas ao hidrogênio com sistemas elétricos tradicionais, sendo desenvolvida no Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC). A tecnologia mais amplamente utilizada foca na aplicação do hidrogênio para o armazenamento de energia elétrica, possibilitando a transferência de energia de períodos de abundância para momentos de escassez, por meio da conversão eletroquímica. A inovação consiste na aplicação de eletrolisadores como cargas flexíveis, capazes de oferecer serviços de equilíbrio ao sistema elétrico.

A maturidade tecnológica para o armazenamento sazonal encontra-se em TRL 3-4, enquanto as aplicações voltadas para serviços de balanceamento situam-se em TRL 2-3. Isso evidencia a urgência de um aprimoramento adicional nas questões referentes à integração sistêmica e nos modelos regulatórios apropriados.

A organização estrutural do INESC TEC, uma instituição científica e técnica sem fins lucrativos, baseada em entidades acadêmicas, favorece o desenvolvimento de competências em integração de sistemas, através da participação em redes de pesquisa europeias. O financiamento ocorre por meio de projetos europeus de ampla magnitude que integram habilidades acadêmicas, com a colaboração do setor empresarial.

A quinta trajetória concentra-se na melhoria de sistemas integrados destinados a aplicações marítimas e em ambientes não conectados à rede elétrica. A tecnologia central integra células de combustível, eletrolisadores e sistemas de armazenamento, visando aplicações marítimas que exigem uma prolongada autonomia energética. A maturidade tecnológica varia conforme os componentes, sendo que as células de combustível e os eletrolisadores alcançam o nível TRL 9 devido à sua disponibilidade comercial, enquanto sistemas integrados destinados a aplicações marítimas específicas situam-se entre os níveis TRL 5 e 7, carecendo de validação operacional. O financiamento combina recursos públicos obtidos por meio de programas europeus com recursos filantrópicos provenientes de fundações privadas.

A sexta trajetória foca no desenvolvimento de materiais catalíticos voltados para aplicações em eletrolisadores, promovido pelo Laboratório Associado em Engenharia Química (ALiCE). A tecnologia central desenvolve catalisadores para eletrolisadores AEM (Membrana de Troca de Íons), os quais apresentam a capacidade de empregar materiais menos nobres em relação às tecnologias PEM tradicionais. A maturidade tecnológica situa-se em TRL 3-4, o que sinaliza que o desenvolvimento de materiais requer validação experimental extensiva antes da sua aplicação comercial. A pesquisa apresenta uma orientação acadêmica, por meio de colaborações com instituições espanholas na elaboração de células de combustível PEM. A

maior parte do financiamento provém de recursos públicos, especialmente da Fundação para a Ciência e Tecnologia e de programas da União Europeia.

A demanda por materiais de baixo custo, verificada no contexto português e na UFMG, evidencia de que forma as instituições acadêmicas buscam inovações viáveis do ponto de vista econômico. Essa direção está em consonância com o avanço conceitual da universidade empreendedora (Etzkowitz, 2001) e o modelo da Hélice Tríplice, que sugere interações dinâmicas entre universidade, empresa e governo, ao considerar que cada esfera pode desempenhar papéis de outras. No entanto, o avanço de tecnologias sistêmicas como o hidrogênio expõe restrições que vão além da discussão sobre "quem desempenha qual função". A complexidade não reside na sobreposição funcional entre as três esferas, mas na necessidade de uma coordenação multissistêmica que o modelo não evidencia. A Hélice Tríplice não explora as interações horizontais entre participantes de uma mesma esfera, como a coordenação entre diversas universidades, vista nas redes UFMG-UFV-UNIFEI no Brasil e nas parcerias entre instituições portuguesas, por exemplo.

Outro ponto são as maneiras de justificar o uso de tecnologias. Tais maneiras vão além das considerações técnicas, e incluem narrativas sobre um hidrogênio mais renovável. Esse tipo de construção discursiva está em consonância com os Estudos Discursivos (ED) relacionados a transições sociotécnicas, uma das três principais vertentes reconhecidas por Markard (2018) para a completa compreensão dos processos de transição contemporânea. Conforme Rosenbloom *et al.* (2016), os Estudos Discursivos analisam como narrativas, significados e representações são construídos em torno de tecnologias emergentes, moldando expectativas coletivas e legitimidade social. Nesse contexto, as discussões acadêmicas acerca do "hidrogênio verde" em comparação com outras rotas refletem disputas sobre quais caminhos tecnológicos devem ser priorizados em termos de políticas e investimentos, ressaltando que as universidades não apenas criam tecnologias, mas também contribuem para a formação de expectativas coletivas que afetam a direção e o ritmo das transições energéticas.

A inclusão das universidades relaciona, de forma simultânea, a produção de conhecimento científico, a orientação em direção à viabilidade econômica, a validação de discursos, a coordenação entre instituições e a promoção de conexões sistêmicas. Essa multifuncionalidade indica a necessidade de ampliar as teorias contemporâneas, a fim de contemplar os novos papéis das universidades em contextos em que a inovação demanda uma participação complexa das instituições.

5.1.3 Dimensão Tecnológica na UFMG

O desenvolvimento das tecnologias relacionadas ao hidrogênio na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) concentra-se na produção, complementada pelo armazenamento. Nesse contexto, existem quatro tecnologias que exploram distintas rotas tecnológicas. A geração de hidrogênio verde, mediante um simulador de energia solar, possibilita a conversão direta da irradiação solar em hidrogênio, por processos fotocatalíticos que eliminam a necessidade de eletricidade intermediária. Essa tecnologia não possui aplicação industrial específica, mantendo uma orientação acadêmica, conforme evidenciado pela pesquisadora responsável. A produção de hidrogênio resultante da conversão de biomassa utiliza a decomposição térmica de materiais orgânicos para gerar hidrogênio, aproveitando a abundância de recursos agrícolas. Essa tecnologia demonstra avanços em direção ao escalonamento e à evidência de interesse empresarial emergente. A pesquisadora responsável destaca que essa linha tecnológica já incorporou estudos de viabilidade técnica e econômica, diferenciando-se das demais por apresentar uma orientação comercial crescente e um interesse de empresas na produção de combustíveis renováveis a partir da biomassa. As pilhas de combustível de óxido sólido, quando operadas reversivelmente como eletrolisadores, posicionam-se no campo da produção, convertendo energia elétrica em hidrogênio através da transformação de metano e dióxido de carbono. Essa capacidade reversível permite o uso da mesma infraestrutura tecnológica, tanto para o armazenamento quanto para a conversão de hidrogênio.

As pilhas de combustível de óxido sólido, ao funcionarem como dispositivos para a conversão de hidrogênio em energia elétrica, destinam-se prioritariamente ao setor de transportes, com ênfase em aplicações ferroviárias voltadas para o transporte de cargas pesadas. Essa especialização aproveita as características do hidrogênio, que proporcionam vantagens competitivas em mobilidade de alta capacidade, em que a densidade energética e a autonomia são fatores críticos. O desenvolvimento desse setor envolve análises econômicas, desde suas fases iniciais, além de estabelecer parcerias internacionais, destacando uma crescente orientação para a viabilização comercial no âmbito ferroviário nacional. As tecnologias de produção estão focadas principalmente no setor energético, empregando diferentes abordagens. A produção por meio de energia solar visa explorar o potencial fotovoltaico brasileiro, embora ainda careça de uma aplicação industrial específica, devido a limitações de eficiência. A conversão de biomassa integra-se ao setor energético utilizando recursos orgânicos nacionais, em consonância com princípios de economia circular e revelando um crescente interesse por parte das empresas. O armazenamento por meio de catalisadores de boridrato de sódio desperta particular interesse no setor de mineração, em que as empresas podem empregar os

catalisadores desenvolvidos em aplicações industriais que demandam uma liberação controlada de hidrogênio.

5.1.4 Dimensão Tecnológica na Universidade do Porto

O desenvolvimento das tecnologias relacionadas ao hidrogênio na Universidade do Porto concentra-se no armazenamento, complementado pela produção. Nesse cenário, identificam-se cinco tecnologias que buscam diferentes trajetórias tecnológicas e arranjos institucionais especializados. Os reservatórios criogênicos, elaborados pelo INEGI, funcionam em condições extremas de temperatura, voltados para aplicações aeroespaciais, e empregam materiais compostos especializados que somente um número restrito de fabricantes globais domina. Essa tecnologia alcança níveis de prontidão tecnológica (TRL) entre 5 e 6, demonstrando proximidade com utilizações comerciais e destacando-se pela escassez mundial de fornecedores qualificados.

As ferramentas de gestão energética, também desenvolvidas no INEGI, integram a produção de hidrogênio com fontes renováveis intermitentes, por meio de otimização temporal avançada, possibilitando um planejamento de produção fundamentado em previsões meteorológicas e um equilíbrio entre a venda de energia elétrica e o armazenamento na forma de hidrogênio.

Os eletrolisadores de membrana de troca protônica (PEM) personalizados, concebidos no Laboratório Alice, atendem a demandas industriais específicas de empresas que almejam internalizar tecnologias que anteriormente foram adquiridas externamente, evidenciando maturidade comercial e orientação para requisitos técnicos particulares.

Os sistemas de integração com redes elétricas, desenvolvidos no INESC TEC, utilizam eletrolisadores como cargas flexíveis para a prestação de serviços auxiliares ao sistema elétrico, explorando múltiplas fontes de receita que podem garantir a viabilidade econômica de projetos de hidrogênio. Por fim, os sistemas offshore marítimos, desenvolvidos na Universidade do Porto (FEUP), utilizam produção química in situ, através de processos baseados em sais que geram hidrogênio mediante a adição de água e catalisadores específicos, adaptando-se a contextos em que as infraestruturas convencionais são limitadas.

As inovações tecnológicas são direcionadas ao setor aeroespacial e energético, explorando nichos de mercado específicos e oportunidades sistêmicas diferenciadas. Os reservatórios criogênicos são destinados ao setor espacial, voltados para lançadores e aplicações aeronáuticas, aproveitando habilidades técnicas em materiais de alta performance e promovendo o desenvolvimento de capacidades nacionais em segmentos estratégicos com

elevada barreira de entrada. As ferramentas de gestão energética se integram ao setor elétrico de Portugal, capitalizando a alta penetração de energias renováveis no país e focando na otimização de sistemas energéticos híbridos que combinam produção, armazenamento e comercialização de energia. Os eletrolisadores atendem tanto ao setor de equipamentos industriais quanto à mobilidade especializada, com utilização em drones que necessitam de maior autonomia energética em relação aos sistemas convencionais à base de bateria. A integração com sistemas elétricos explora o mercado de serviços auxiliares, em que os eletrolisadores operam como cargas flexíveis, podendo gerar receitas anuais que chegam a centenas de milhares de euros em Portugal, viabilizando economicamente sistemas de hidrogênio por meio de diversas fontes de receita. Os sistemas marítimos off-grid são direcionados ao setor naval e portuário, aproveitando vantagens geológicas específicas de Portugal, por meio de cavernas salinas para armazenamento e posicionamento estratégico no Atlântico, criando oportunidades para o fornecimento de tecnologias especializadas em mercados ibéricos e atlânticos, onde soluções autônomas para ambientes marítimos apresentam uma demanda crescente.

5.1.5 Dimensão Sistêmica na UFMG

Os pesquisadores da UFMG reconhecem simultaneamente o potencial estratégico do hidrogênio para o Brasil e as limitações sistêmicas que comprometem sua viabilização comercial imediata. A análise evidencia gargalos que vão além das limitações tecnológicas isoladas para abordar restrições de recursos e infraestrutura.

A disponibilidade de água emerge como limitação crítica, considerando as mudanças climáticas aceleradas que evidenciam escassez hídrica crescente em múltiplas regiões do país. Essa preocupação reflete a necessidade de articulação entre políticas energéticas e gestão de recursos hídricos que vai além dos desenvolvimentos tecnológicos isolados. Os gargalos econômicos são identificados como a principal barreira para adoção comercial acelerada, com custos elevados impedindo o uso mais rápido da tecnologia.

As capacidades do Brasil se baseiam em vantagens comparativas evidentes em fontes de energia renováveis, particularmente por meio da habilidade de fornecer energia limpa, por meio de tecnologias fotovoltaicas e eólicas espalhadas pelo país. O interesse internacional, exemplificado pelo interesse alemão no hidrogênio brasileiro, é interpretado como validação externa dessas potencialidades. Contudo, os especialistas mantêm avaliação crítica, reconhecendo defasagens comparativas e necessidades substanciais de financiamento para superar atrasos em relação aos países desenvolvidos.

O hidrogênio é posicionado como tecnologia importante, mas não única, na transição energética, com reconhecimento de que os processos de transformação energética seguirão trajetórias múltiplas e contextualmente específicas. A análise reconhece a viabilidade da produção de hidrogênio, conforme situações locais, contextos nacionais e aplicações específicas, evidenciando maturidade analítica que rejeita narrativas simplificadas sobre dominância tecnológica única.

Os desafios de escalonamento constituem gargalos críticos identificados pelos especialistas, particularmente devido a custos elevados de equipamentos especializados e limitações de infraestrutura laboratorial nacional. Os especialistas articulam perspectiva equilibrada, que reconhece a importância do hidrogênio na transição energética sem aderir a visões de solução universal, posicionando-o como parte da solução energética brasileira. A avaliação sobre capacidades nacionais é realista, reconhecendo o estágio inicial de desenvolvimento, comparado internacionalmente, mas identificando potencial significativo que demanda melhor coordenação entre pesquisa, políticas públicas e setor privado.

5.1.6 Dimensão Sistêmica na UPorto

Os especialistas portugueses demonstram perspectiva que integra experiência histórica com análise técnica contextualizada no âmbito das políticas energéticas europeias, refletindo estágio mais avançado de desenvolvimento institucional e inserção consolidada em redes internacionais de cooperação tecnológica. A perspectiva histórica reconhece padrões cíclicos no desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio, identificando períodos de redução do entusiasmo internacional seguidos de ressurgimentos determinados por fatores políticos e econômicos que transcendem méritos técnicos isolados.

A análise temporal contextualiza o desenvolvimento contemporâneo do hidrogênio como consequência da maturidade prévia de infraestruturas de energia renovável. Os especialistas reconhecem que, embora o armazenamento de energias renováveis seja tecnicamente viável desde os anos 2000, a relevância comercial dessa discussão dependia da disponibilidade suficiente de energias renováveis para sustentar a competitividade econômica. Essa perspectiva evidencia a compreensão de que a viabilização do hidrogênio verde demanda condições sistêmicas específicas, que requerem maturidade prévia de infraestruturas complementares.

Os gargalos tecnológicos específicos são reconhecidos mesmo em tecnologias consolidadas, especialmente questões de custo associadas ao uso de materiais nobres em tecnologias PEM, sem perspectivas de mudança significativa. Os especialistas identificam

limitações sistêmicas básicas no transporte de hidrogênio, reconhecendo gastos elevados de recursos financeiros e energéticos nesses processos. Adicionalmente, limitações operacionais são especificadas, como a necessidade de água ultrapura em eletrolisadores, quando seria preferível utilizar água do mar.

A visão sistêmica integra reconhecimento da importância do hidrogênio na transição energética com perspectiva realista sobre a necessidade de coexistência de múltiplas tecnologias. Os especialistas priorizam aplicações locais, em que o hidrogênio seja produzido e consumido proximamente, devido a limitações econômicas de transporte de longa distância. Essa abordagem reflete a compreensão de que a viabilidade econômica do hidrogênio pode depender de modelos comerciais que integrem múltiplas fontes de receita por meio de serviços sistêmicos.

As vantagens geológicas específicas de Portugal são identificadas como potencial competitivo em armazenamento subterrâneo, através de formações salinas adequadas para grandes quantidades de hidrogênio. O potencial de autossuficiência energética é reconhecido, apesar do tamanho limitado do país, com perspectiva realista sobre capacidades de exportação para países vizinhos, via transporte marítimo. Contudo, os especialistas reconhecem limitações econômicas sistêmicas, identificando custos como principal problema que demanda redução significativa tanto de equipamentos quanto de produção para viabilizar competitividade comercial.

A comunidade científica portuguesa evidencia debate interno sobre o papel estratégico do hidrogênio, com perspectivas críticas questionando sua caracterização como vetor energético e considerando-o passo intermediário nos processos de conversão energética. Essa diversidade de perspectivas reflete tensões entre narrativas promocionais e avaliações técnicas rigorosas que questionam a eficiência sistêmica de rotas baseadas em múltiplas conversões energéticas, características das aplicações do hidrogênio como vetor energético.

5.2 UFMG no contexto nacional

A inclusão da análise quantitativa nesta pesquisa fundamenta-se na necessidade de contextualizar o posicionamento da UFMG no panorama nacional de desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio. Essa dimensão permite situar os achados qualitativos específicos em um quadro mais abrangente do sistema nacional de inovação brasileiro, oferecendo base empírica para as conclusões da pesquisa.

O Brasil, enquanto país de dimensões continentais, com sistema universitário extenso e descentralizado, demanda a compreensão sistêmica que o mapeamento quantitativo pode proporcionar. A análise qualitativa centrada na UFMG, embora ofereça profundidade sobre arranjos institucionais específicos, apresentaria limitações de representatividade, se não fosse complementada pela perspectiva quantitativa nacional.

A organização dos tópicos inicia-se com o mapeamento geral dos projetos por agências de fomento. Em seguida, o estudo da distribuição institucional dos projetos possibilita determinar quais universidades possuem a maior concentração de projetos, posicionando cada instituição no cenário nacional e demonstrando padrões de concentração ou dispersão das atividades de pesquisa. A categorização dos projetos por segmentos da cadeia produtiva constitui dimensão analítica central, que identifica especializações tecnológicas específicas, para avaliar se o sistema nacional desenvolve capacidades equilibradas entre produção, armazenamento, distribuição e aplicações ou se apresenta concentrações em segmentos específicos que podem indicar lacunas sistêmicas.

A análise das tecnologias por setores de aplicação complementa essa perspectiva, ao identificar quais demandas industriais específicas orientam o desenvolvimento tecnológico universitário, permitindo compreender o alinhamento entre pesquisa acadêmica e necessidades setoriais. Essa organização metodológica alimenta diretamente as conclusões da pesquisa, ao demonstrar empiricamente padrões sistêmicos que transcendem características institucionais específicas.

A identificação da concentração de 73,4% dos projetos brasileiros no período 2021-2025 evidencia alinhamento temporal com políticas nacionais de transição energética, sustentando argumentos sobre a influência de políticas públicas no direcionamento da pesquisa universitária. Simultaneamente, a concentração identificada em tecnologias de produção (80% dos projetos), em detrimento de armazenamento e distribuição, revela lacuna sistêmica que fundamenta recomendações de reorientação das políticas de fomento. Consequentemente, a análise quantitativa não apenas contextualiza os achados qualitativos. Ela fornece também evidências empíricas que sustentam contribuições teóricas sobre o papel das universidades em tecnologias sistêmicas complexas e orientam recomendações práticas para otimização do sistema nacional de inovação em hidrogênio.

Essa organização metodológica visa fornecer base empírica sólida, que permita validar ou problematizar os achados qualitativos, mediante evidências quantitativas, estabelecendo fundamentos para conclusões que contemplem tanto a profundidade dos casos específicos quanto a amplitude do sistema nacional de inovação.

5.2.1 Panorama Nacional Tecnologias do H₂: CNPq

O levantamento sistemático identificou 128 projetos relacionados ao hidrogênio, distribuídos entre 47 instituições brasileiras e executados por 89 pesquisadores, no período de 2003-2025. Essa base empírica foi construída por meio da análise de seis agências de fomento: CNPq, com 46 projetos, ANP, com 38 projetos, FINEP, com 26 projetos, FAPEMIG, com 10 projetos, FUNDEP, com três projetos, e FCO, com sete projetos.

A progressão temporal dos investimentos indica três fases distintas das políticas governamentais para o segmento. Entre 2003 e 2020, foram identificados 34 projetos, representando 26,6% do total. O período 2021-2022 concentra 52 projetos, o equivalente a 40,6% do total, evidenciando crescimento coincidente com o lançamento do Programa Nacional do Hidrogênio. O intervalo de 2023 a 2025 contempla 42 projetos, representando 32,8% do total, o que sugere a consolidação dos investimentos.

O CNPq organiza seus investimentos em duas formas principais. As chamadas específicas têm 16 projetos, que constituem 34,8% do total da agência. Desses, 11 projetos são da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2022, que se relaciona ao Programa Combustível do Futuro e à Iniciativa Brasileira do Hidrogênio. Os outros cinco projetos vêm da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 24/2022, que é focada no Sistema Brasileiro de Laboratórios de Hidrogênio. As chamadas universais, por sua vez, concentram 30 projetos, equivalentes a 65,2% do total, sendo seis projetos da Universal 2023 e quatro projetos da Universal 2021, demonstrando interesse orgânico da comunidade científica pelo tema.

A Universidade Federal de Viçosa aparece com maior número de iniciativas – cinco projetos, o que corresponde a 10,9% do total do CNPq –, concentrando pesquisas em processos biológicos para produção de hidrogênio e tecnologias de armazenamento no estado sólido. O Instituto Tecnológico de Aeronáutica contribui com três projetos, equivalentes a 6,5% do total, desenvolvendo especialização em aplicações aeronáuticas e tecnologias de plasma para conversão de biogás. A Universidade Federal da Bahia, a Universidade Federal de Itajubá e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte apresentam participação idêntica, com dois projetos cada, representando 4,3% do total do CNPq. A UFBA concentra desenvolvimento de catalisadores para reforma de biogás e processos fotocatalíticos, enquanto a UNIFEI foca no desenvolvimento de centro de hidrogênio verde e gestão térmica de eletrolisadores, e a UFRN trabalha com novos materiais para produção de hidrogênio e captura de CO₂.

A UFMG aparece com dois projetos na Chamada Universal 2023, representando 4,3% do total do CNPq. O primeiro projeto, coordenado pela área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, desenvolve uma pesquisa sobre "Uso dos gases de pirólise de biomassa como

agente redutor e fonte de hidrogênio para a siderurgia", com vigência de janeiro de 2024 a janeiro de 2027. Esse projeto insere-se no segmento de aplicações industriais, especificamente voltado ao setor siderúrgico, abordando tanto produção quanto utilização de hidrogênio como agente redutor. O segundo projeto, da área de Engenharia Sanitária, foca no "Aumento da produção de metano no biogás e minimização de emissões de metano e sulfeto de hidrogênio no efluente líquido no tratamento de esgoto doméstico", com vigência de dezembro de 2023 a dezembro de 2026. Insere-se no segmento de produção por meio de processos biológicos e tratamento de efluentes.

Outras universidades com participação individual incluem UnB, UCS, USP, UNICAMP, UECE, UNESP, UFG, UFU e UFTM, que somadas representam 15 projetos correspondentes, evidenciando distribuição dispersa da pesquisa nacional entre múltiplas instituições. A segmentação por partes da cadeia produtiva evidencia concentração em tecnologias de produção, com 35 projetos, representando 76,1% do total do CNPq. Essa concentração se distribui entre eletrólise, com 11 projetos equivalentes, processos fotocatalíticos, com nove projetos, processos biológicos, com sete projetos, e reforma de biogás, com quatro projetos.

A distribuição setorial indica que o setor energético concentra 22 projetos, representando 47,8% do total do CNPq, seguido pelo setor de transportes, com oito projetos, equivalentes a 17,4%, a indústria química, com cinco projetos, correspondentes a 10,9%, e o setor siderúrgico, com um projeto, representando 2,2% do total – precisamente o projeto coordenado pela UFMG.

Assim, com dois projetos representando 4,3% do total, a UFMG apresenta participação equivalente às universidades UFBA, UNIFEI e UFRN, posicionando-se no segundo escalão de instituições mais ativas na pesquisa nacional financiada pelo CNPq.

5.2.2 Panorama Nacional Tecnologias do H₂: FINEP

A FINEP possui um perfil distinto, marcado por uma proximidade maior com as necessidades comerciais e uma maior participação empresarial. Os investimentos concentram-se em 16 projetos, para o período de 2021 a 2025, em contraste com 10 projetos no período de 2003 a 2020. As empresas participam de nove projetos, correspondendo a 34,6% do total. As fundações universitárias formam o grupo mais extenso, com 13 projetos, representando 50% do total, apesar de possuírem apenas 18,7 milhões de reais, o que representa 19,3% dos recursos. A FUNDEP aparece como fundação executora, gerenciando projeto de 1,98 milhão de reais para desenvolvimento de sistemas fotoquímicos e fotoeletroquímicos baseados em

semicondutores. A Fundação de Apoio da UFBA administra projeto de 4,82 milhões de reais para laboratório de materiais e fábrica de hidrogênio. A Fundação de Apoio da UFRGS executa projeto de 1,59 milhão de reais para materiais multifuncionais para geração de combustíveis renováveis. A Fundação Casimiro Montenegro Filho (ITA) gerencia projeto de 4,99 milhões de reais para tecnologias laboratoriais de sistema propulsivo a hidrogênio.

Os institutos de pesquisa executam quatro projetos, correspondentes a 15,4% do total, com 15,6 milhões de reais, representando 16,2% dos recursos, incluindo participação do Instituto UNIEMP e de outras organizações de pesquisa aplicada. A UFMG, por meio da FUNDEP, atua como executora em um projeto de 1,98 milhão de reais destinado ao desenvolvimento de sistemas fotoquímicos e fotoelétricos.

A FINEP apresenta distribuição equilibrada, o que contrasta com a concentração observada no CNPq. A produção concentra 10 projetos, representando 38,5% do total, com 38,9 milhões de reais, incluindo desenvolvimento de eletrolisadores alcalinos pela Clark Tecnologia, eletrolisadores de alta eficiência pela WEG, sistemas fotoquímicos e fotoeletroquímicos, coordenados pela UFMG, via FUNDEP, materiais avançados com nióbio e produção de hidrogênio renovável a partir de reforma de biogás, pela SANEPAR. O armazenamento e a distribuição contemplam quatro projetos, correspondentes a 15,4%, com 4,8 milhões de reais, incluindo desenvolvimento de tanques de hidreto metálico, pela TUPY, para armazenamento veicular no estado sólido, e vasos de pressão em materiais compósitos, pela Forza Composites, para aplicações de mobilidade. A categoria infraestrutura e sistemas integra quatro projetos, representando 15,4%, com 23,2 milhões de reais, incluindo laboratórios especializados na UFBA, infraestrutura para testes de sistemas propulsivos no ITA e unidades transportáveis modulares de produção e armazenamento pela STW Soluções.

A análise setorial expressa que o setor de mobilidade e transportes concentra a maior parte dos projetos, com nove iniciativas, representando 34,6% do total e 40,9 milhões de reais, incluindo aeronaves cargueiras remotamente pilotadas pela AKAER, aeronaves classe 1 com propulsão híbrida elétrico-hidrogênio pela ACS e sistemas de mobilidade urbana com bicicletas elétricas e hidrogênio pela Bike Fácil. O setor energético contempla sete projetos, equivalentes a 26,9%, com 30,4 milhões de reais, concentrando desenvolvimento de eletrolisadores e sistemas de gestão de energias renováveis, pela Argo Soluções, e unidades modulares de geração elétrica, pela Hidro Industrial. O setor de materiais e infraestrutura representa três projetos, correspondentes a 11,5%, com 10,8 milhões de reais, incluindo laboratórios especializados e materiais avançados. O setor químico e industrial abrange três projetos

equivalentes a 11,5% e 5,8 milhões de reais, focando em materiais multifuncionais e processos químicos avançados.

5.2.3 Panorama Nacional Tecnologias do H₂: ANP

A Agência Nacional do Petróleo subsidia 38 projetos, por meio de um mecanismo de investimento compulsório em pesquisa e desenvolvimento pelas companhias do ramo. A Universidade de São Paulo lidera, com oito projetos, representando 21,1% do total da ANP, concentrados principalmente no Centro de Pesquisa para Inovação em Gás. A UFC contribui com três projetos, representando 7,9% e concentrando pesquisas em armazenamento subterrâneo de hidrogênio. A UFSCAR, através do LIEC, e a PUC-RS participam com dois projetos cada, representando 5,3% do total. Outras universidades com participação individual incluem UFRJ, ITA e UNICAMP, cada uma com um projeto, representando 2,6% do total da ANP.

O Sistema SENAI aparece como segunda instituição executora, com sete projetos, equivalentes a 18,4%, distribuídos entre unidades do Rio de Janeiro, da Bahia e do Rio Grande do Norte. A própria Petrobras atua como executora em seis projetos, correspondentes a 15,8%, evidenciando estratégia de desenvolvimento interno de capacidades. A UFMG, em colaboração com a UNIFEI, participa de um projeto que representa 2,6% do total ANP, demonstrando uma participação reduzida na implementação de projetos ligados ao hidrogênio, em contraste com a liderança da USP, que detém 21,1% dos projetos.

Dessa forma, a produção contempla 22 projetos, representando 57,9% do total, distribuídos entre eletrólise da água (nove projetos), reforma de etanol (quatro projetos), decomposição de amônia (dois projetos) e reforma de metano (2 projetos). Já o armazenamento e a distribuição incorporam quatro projetos, correspondentes a 10,5%, focando em armazenamento subterrâneo, coordenado pela UFC, e adaptação de infraestruturas de transporte. A categoria outros representa dois projetos, equivalentes a 5,3%, incluindo detecção de vazamentos e validação metrológica.

Com relação às aplicações, o setor energético concentra 17 projetos, representando 44,7% do total, incluindo integração com refinarias e sistemas power-to-X offshore. O setor de transportes contempla nove projetos, equivalentes a 23,7%, focando em células a combustível e aplicações veiculares. A indústria química representa cinco projetos, correspondentes a 13,2%, direcionados a processos de refino e petroquímica. O setor de petróleo e gás conta com quatro projetos que equivalem a 10,5% do total e focam na integração com operações tradicionais.

5.2.4 Panorama Estadual Tecnologias do H₂: FAPEMIG e Fundações

A FAPEMIG apoia 10 projetos, distribuídos entre seis instituições mineiras. A UNIFEI e a UFU lideram com três projetos cada, representando 30,0% do total estadual. A UNIFEI concentra pesquisas em produção de hidrogênio verde por diferentes rotas e estudos sistêmicos sobre potencial estadual, incluindo projeto de avaliação teórico-experimental e projeto de melhoramento de biogás. Já a UFU desenvolveu especialização em decomposição de ácido fórmico, através de dois projetos, além de projeto sobre fragilização de materiais por hidrogênio. Outras instituições mineiras incluem: UFV, com um projeto sobre nanocatalisadores de nióbio; UFVJM, com um projeto sobre catalisadores; UFJF, com um projeto sobre armazenamento em estado sólido; e CEFET-MG, com um projeto sobre reforma catalítica de etanol. A UFMG não aparece diretamente nos projetos aprovados da FAPEMIG analisados.

Sendo assim, a produção aponta concentração de oito projetos, representando 80,0% do total, abrangendo eletrólise, coordenada pela UNIFEI, decomposição de ácido fórmico, pela UFU, nanocatalisadores, pela UFV, e reforma de etanol, pelo CEFET-MG. O armazenamento contempla um projeto, equivalente a 10,0%, através da UFJF, com armazenamento em estado sólido. Não há projetos específicos de distribuição ou infraestrutura na FAPEMIG.

Quanto às aplicações setoriais na FAPEMIG, o setor energético concentra seis projetos representando 60,0% do total, incluindo avaliação de hidrogênio verde em Minas Gerais e desenvolvimento de catalisadores. A indústria química contempla dois projetos, equivalentes a 20,0%, focando decomposição de ácido fórmico. O setor siderúrgico representa um projeto, correspondente a 10,0%, direcionado à fragilização de materiais. Múltiplos setores abrangem um projeto com aproveitamento de biogás.

As fundações de apoio FUNDEP e FCO demonstram arranjos de financiamento diversificados. A FUNDEP administra três projetos: produção de hidrogênio com nanopartículas semicondutoras financiado, pela FAPEMIG, desenvolvimento de aços resistentes a sulfeto de hidrogênio, financiado pela EMBRAPII, e sistema de adição de hidrogênio em motores diesel, financiado pela CSN INOVA. A FCO gerencia sete projetos concentrados no Departamento de Engenharia Mecânica e Departamento de Química, incluindo desenvolvimento de nanocatalisadores financiado por Horeb Brasil e EMBRAPII, eficiência energética em motores flex financiado via Programa Rota 2030, e projetos de capacitação financiados pelo Programa H₂ Brasil.

O setor energético representa um projeto, com produção por nanopartículas. O setor de transportes/mineração também contempla um projeto, com motores diesel para mineração, assim como a indústria metalúrgica, que abrange um projeto com aços resistentes a ambientes com hidrogênio.

A produção representa um projeto, equivalente a 14,3%, sobre análise de eletrólise ferroviária. Aplicações concentram quatro projetos, correspondentes a 57,1%, incluindo nanocatalisadores e proteção contra fragilização. Capacitação abrange dois projetos, equivalentes a 28,6%, em hidrogênio verde. O setor de transportes concentra dois projetos, representando 28,6%, incluindo motores flex e transporte ferroviário. Combustíveis/energia contemplam dois projetos, equivalentes a 28,6%, com nanocatalisadores. A indústria metalúrgica representa um projeto, com proteção de materiais e a capacitação profissional abrange dois projetos, com cursos especializados em hidrogênio verde.

5.3 Análise geral sobre o posicionamento da UFMG

A análise quantitativa abrangente demonstra **dispersão** dos projetos de hidrogênio entre universidades brasileiras, com a UFMG ocupando posição secundária no cenário nacional. Entre as 47 instituições mapeadas, observa-se distribuição pulverizada: a USP lidera com 21,1% dos projetos ANP, a UFV concentra 10,9% dos projetos CNPq e o ITA mantém presença consistente em múltiplas agências, evidenciando que nem mesmo as universidades líderes concentram parcela majoritária dos investimentos nacionais.

A UFMG representa 2,5% do total de 128 projetos nacionais, com participação distribuída entre diferentes agências: dois projetos no CNPq, um projeto na FINEP, via FUNDEP, colaboração com a UNIFEI em um projeto ANP, projetos das fundações FCO e FUNDEP e ausência de projetos na FAPEMIG. Embora o cenário nacional apresente dispersão institucional, algumas universidades desenvolveram estratégias de articulação mais efetivas: a UFV coordena rede de 21 pesquisadores em sete instituições mineiras, enquanto a USP concentra recursos em centro especializado.

5.4 Análise das chamadas públicas: direcionamento setorial e estratégico

A análise global das chamadas públicas que originaram os 128 projetos nacionais evidencia predominância de chamadas universais (aproximadamente 60% do total) sobre chamadas específicas direcionadas ao hidrogênio, corroborando que o interesse científico nacional pelo tema emerge organicamente da comunidade acadêmica, independentemente de direcionamentos políticos explícitos.

As chamadas específicas concentram-se prioritariamente em quatro áreas estratégicas principais. A primeira área abrange combustíveis de transição e descarbonização industrial, através da Chamada Programa Combustível do Futuro, que concentra desenvolvimento de tecnologias para substituição de combustíveis fósseis em setores de alta demanda energética. A segunda área foca infraestrutura laboratorial e capacitação técnica, reconhecendo que desenvolvimento tecnológico requer base física adequada para pesquisa. A terceira área prioriza integração com setor energético tradicional, direcionando pesquisas para compatibilização do hidrogênio com infraestruturas estabelecidas. A quarta área enfatiza desenvolvimento de rotas tecnológicas baseadas em recursos nacionais, aproveitando vantagens comparativas em energia solar, biomassa e recursos minerais específicos.

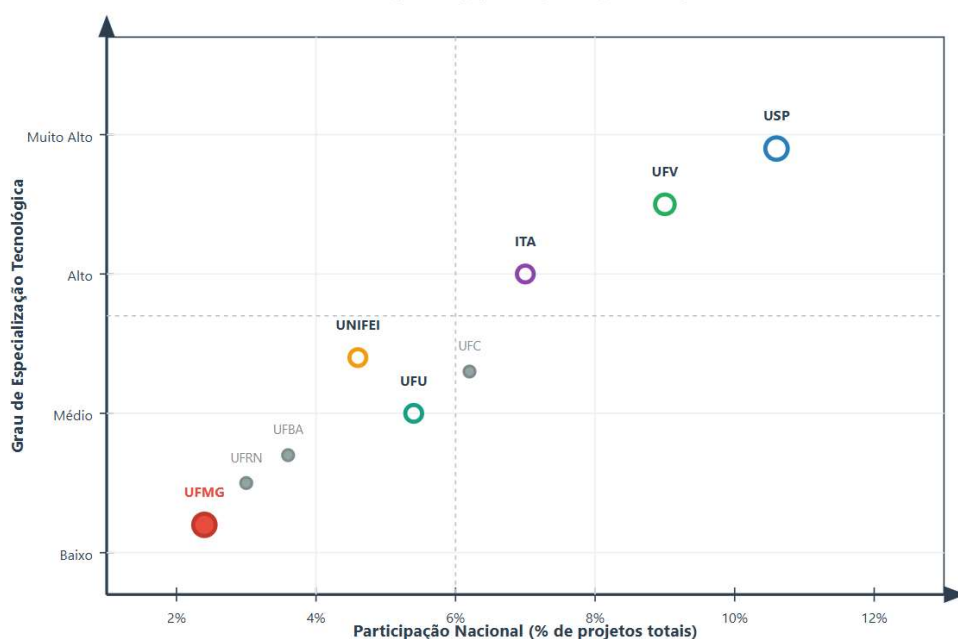
A análise evidencia ausência de chamadas específicas direcionadas a setores estratégicos, que representariam oportunidades de mercado e redução de dependência externa. Não foram identificadas chamadas específicas para agricultura e fertilizantes, setor em que o Brasil mantém dependência crítica de importações de amônia; mineração, área na qual o hidrogênio pode substituir o diesel em operações de grande escala; aviação, segmento emergente para aplicações de hidrogênio; ou indústria naval, setor com potencial para aplicações offshore. Essa ausência indica que políticas públicas ainda não desenvolveram direcionamento setorial abrangente para áreas em que o hidrogênio pode gerar transformação econômica significativa.

As chamadas específicas evidenciam concentração geográfica que reflete tanto capacidades instaladas quanto recursos naturais regionais. Observa-se direcionamento para aproveitamento de recursos eólicos offshore nas regiões Nordeste e Sul, utilização de biomassa em regiões de agronegócio, mineração e metalurgia em Minas Gerais, explorando recursos minerais específicos como nióbio, e integração portuária em estados costeiros para exportação de hidrogênio verde. Essa especialização regional pode criar clusters tecnológicos diferenciados que sustentem vantagens competitivas específicas.

A análise evidencia fragmentação institucional, caracterizada pela ausência de coordenação explícita entre diferentes agências na definição de chamadas específicas. Enquanto algumas agências priorizam desenvolvimento de base científica, outras enfatizam aplicações comerciais ou integração setorial, resultando em sobreposições temáticas e lacunas sistêmicas que comprometem a eficiência do sistema nacional. Essa fragmentação contrasta com estratégias observadas internacionalmente, em que chamadas específicas coordenadas direcionam o desenvolvimento complementar de diferentes segmentos da cadeia produtiva.

A Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2022 é uma das que mais se destacam. Direcionada ao Programa Combustível do Futuro e Iniciativa Brasileira do Hidrogênio, concentra-se especificamente em siderurgia, transportes e integração energética. Os 11 projetos dessa chamada abordam prioritariamente aplicações do hidrogênio como agente redutor na produção de aço, desenvolvimento de sistemas de propulsão para transporte ferroviário e rodoviário, reforma catalítica de biocombustíveis brasileiros para produção de hidrogênio, e integração com sistemas de energia renovável. Essa concentração evidencia estratégia de posicionamento do hidrogênio como combustível de transição que pode acelerar a descarbonização dos setores industriais mais intensivos em carbono, aproveitando infraestruturas e conhecimentos existentes no país para implementação comercial mais rápida.

Figura 2 – Posicionamento das universidades no Sistema Nacional de Hidrogênio



Fonte: elaborado pela autora.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O primeiro objetivo específico, mapear e descrever as tecnologias de hidrogênio desenvolvidas nas universidades estudadas, foi cumprido. No contexto brasileiro, caracterizou-se o modelo baseado em departamentos universitários com mediação de fundações de apoio e projetos de extensão como o ESCALAB. No contexto português, evidenciou-se o modelo de institutos de interface especializados com personalidade jurídica própria e participação empresarial direta. A caracterização tecnológica abrangeu métodos de eletrólise, reforma de hidrocarbonetos e processos fotocatalíticos, com análise de mecanismos de financiamento distribuídos entre seis agências brasileiras e fundos europeus. A avaliação de maturidade tecnológica evidenciou predominância de desenvolvimentos em estágios TRL 3-6 no Brasil e TRL 5-8 em Portugal.

O segundo objetivo específico, categorizar as tecnologias conforme inserção na cadeia produtiva, foi atendido mediante classificação sistemática por segmentos de produção, armazenamento, distribuição e aplicações. A avaliação destacou especializações complementares: o foco do Brasil em tecnologias de produção, em contraste com a distribuição balanceada em Portugal entre produção, armazenamento e distribuição. A análise dos setores de aplicação resultou em diferentes prioridades: transporte e mobilidade, produção de energia, indústria química e aplicações aeroespaciais, acompanhadas de um mapeamento específico das necessidades industriais, conforme o segmento tecnológico.

O terceiro objetivo específico, compreender a visão dos especialistas sobre economia do hidrogênio, resultou em convergências sobre gargalos sistêmicos relacionados a custos de materiais nobres, desafios de purificação e infraestrutura de distribuição, bem como perspectivas sobre oportunidades de catching-up tecnológico para economias emergentes e necessidades de coordenação horizontal entre sistemas sociotécnicos energético, industrial e de mobilidade. O objetivo complementar de contextualização quantitativa do panorama brasileiro foi atendido mediante o mapeamento nacional sistematizado de desenvolvimentos tecnológicos em hidrogênio, integrando 128 projetos distribuídos entre 47 instituições brasileiras e executados por 89 pesquisadores. Esse mapeamento posicionou a UFMG no contexto nacional com participação marginal de 2,5% dos projetos totais, contrastando com universidades líderes como USP e UFV, e evidenciou concentração temporal de 73,4% dos projetos no período 2021-2025, demonstrando alinhamento com políticas nacionais de transição energética.

Assim, o cumprimento desses objetivos específicos permitiu responder à questão central da pesquisa sobre como universidades em diferentes sistemas nacionais de inovação participam

do desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio. Forneceram-se evidências empíricas que sustentam as contribuições teóricas e práticas desta pesquisa para o entendimento da participação universitária em tecnologias sistêmicas complexas.

O hidrogênio, enquanto vetor energético, envolve desenvolvimentos simultâneos e desafios interdependentes em diferentes fases da cadeia produtiva: conversão, armazenamento, distribuição e aplicações setoriais específicas. Conforme reconhecido por Markard *et al.* (2016), as questões de verticalidade e horizontalidade nas transições multissistêmicas já constituem fundamento estabelecido na literatura. A contribuição desta pesquisa não reside somente em aprofundar nessas dinâmicas, mas demonstrar empiricamente como universidades em economias emergentes articulam essas dimensões no desenvolvimento de tecnologias sistêmicas complexas.

A evidência empírica sistematizada neste estudo confirma que o hidrogênio constitui simultaneamente uma tecnologia estabelecida em determinados regimes sociotécnicos – como indústria química e petroquímica, nas quais representa insumo consolidado há décadas – e uma inovação emergente em nichos tecnológicos direcionados à descarbonização setorial. Essa dualidade, também reconhecida na literatura existente (Rosenbloom, 2020), adquire relevância específica quando analisada mediante o papel universitário no desenvolvimento tecnológico. As universidades emergem nesse contexto não apenas como geradoras de conhecimento científico, mas como articuladoras dos conhecimentos técnicos distribuídos que são necessários para viabilização comercial de tecnologias sistêmicas complexas.

A análise sobre especificidades técnicas identificadas durante este trabalho evidencia que diferentes fases da cadeia produtiva apresentam demandas tecnológicas distintas, que influenciam diretamente o papel das universidades nesse desenvolvimento.

As aplicações industriais tradicionais, como uso na indústria química e petroquímica, demandam principalmente otimizações incrementais em processos estabelecidos, enquanto aplicações emergentes em mobilidade e siderurgia requerem desenvolvimentos tecnológicos mais fundamentais envolvendo pesquisa básica e aplicada. Essa diferenciação explica a concentração universitária identificada em pesquisas relacionadas à produção de hidrogênio (76,1% dos projetos CNPq analisados), em que as demandas por conhecimento científico permanecem significativas e as universidades podem exercer influência transformadora mais direta.

Contudo, essa concentração em tecnologias de produção evidencia compreensão ainda limitada da complexidade sistêmica envolvida no desenvolvimento do hidrogênio como vetor energético. Os gargalos identificados pelos pesquisadores entrevistados – custos de materiais

nobres, desafios de purificação, infraestrutura de distribuição e integração com sistemas elétricos – não constituem limitações técnicas isoladas, mas requerem desenvolvimentos coordenados entre sistemas que tradicionalmente operam de forma independente.

A contribuição específica desta pesquisa para a literatura sobre transições multissistêmicas reside em três dimensões empíricas complementares. Primeiro, a demonstração de que universidades transcendem função de geração de conhecimento para assumir papel de articulação técnica entre domínios especializados, atuando como plataformas institucionais que facilitam coordenação horizontal entre diferentes sistemas sociotécnicos.

Segundo, a evidência de que tecnologias individuais do hidrogênio não são necessariamente disruptivas em si mesmas, mas constituem componentes complementares de uma transformação sistêmica disruptiva, a descarbonização, explicando como empresas tradicionalmente associadas a combustíveis fósseis investem em hidrogênio renovável sem contradizer lógicas competitivas estabelecidas. Terceiro, a identificação de estratégias nacionais diferenciadas, que transcendem dicotomias convencionais sobre trajetórias tecnológicas, evidenciando como especificidades nacionais sustentam especializações complementares na economia global emergente do hidrogênio.

A análise comparativa entre arranjos institucionais da UFMG e das instituições portuguesas evidencia diferenças fundamentais, que refletem estágios evolutivos distintos dos respectivos sistemas nacionais de inovação. Essa diferenciação institucional demonstra concepções estratégicas alternativas sobre o papel das universidades em tecnologias sistêmicas complexas.

Os institutos de interface portugueses exemplificam inovações institucionais especificamente concebidas para desenvolvimento de tecnologias que perpassam múltiplos sistemas sociotécnicos, criando capacidades organizacionais adequadas para coordenação entre diferentes domínios tecnológicos e conexão direta com necessidades industriais. A presença de pesquisadores brasileiros em posições de liderança nesses institutos aponta dinâmicas de circulação internacional oriundas de países emergentes (como o Brasil) que amplificam capacidades sistêmicas nacionais, configurando modelo de "coordenação científica distribuída" que transcende as funções convencionais de "antenas científicas" caracterizadas por Albuquerque, Silva e Póvoa (2005).

As redes de pesquisa identificadas, tanto nacionais quanto internacionais, exemplificam como universidades desenvolvem especializações complementares dentro de projetos colaborativos que distribuem competências técnicas segundo lógicas de expertise específicas. As articulações coordenadas entre UFMG, UFV e UNIFEI, no contexto brasileiro, e as parcerias

entre instituições portuguesas e universidades espanholas, francesas e americanas, no contexto internacional, representam modelos de coordenação horizontal que permitem superar limitações individuais de escala e especialização. Essa evolução funcional representa contribuição relevante para a literatura neoschumpeteriana e da Hélice Tríplice, ao demonstrar que, em tecnologias sistêmicas complexas, universidades assumem responsabilidades coordenativas.

A convergência temporal observada entre Brasil e Portugal no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio demonstra como janelas de oportunidade tecnológica podem viabilizar processos de catching-up em economias não centrais. A concentração de projetos brasileiros, a partir de 2021-2022, e a intensificação dos desenvolvimentos portugueses, nesse mesmo período, direcionam uma resposta coordenada a mudanças na paisagem sociotécnica global, sobretudo os compromissos de descarbonização estabelecidos no Acordo de Paris e as políticas europeias de autonomia energética.

O conceito de catching-up tecnológico adquire relevância específica no contexto do hidrogênio, em que a imaturidade comercial das tecnologias verdes reduz vantagens acumuladas por países tecnologicamente avançados, criando oportunidades para economias emergentes desenvolverem capacidades competitivas em setores estratégicos. A análise das rotas tecnológicas, por sua vez, evidencia estratégias nacionais diferenciadas, que refletem especificidades contextuais: o Brasil concentra desenvolvimentos em rotas que exploram recursos naturais abundantes – eletrólise com energia renovável, processos fotocatalíticos, conversão de biomassa –, enquanto Portugal desenvolve tecnologias orientadas à integração sistêmica, incluindo ferramentas de gestão energética e adaptação de infraestruturas existentes. Essa diferenciação evidencia que vantagens comparativas nacionais podem sustentar especializações complementares na economia global do hidrogênio, representando oportunidades de cooperação tecnológica bilateral que transcendem relações convencionais de transferência unidirecional de conhecimento.

Uma contribuição empírica desta tese constitui o primeiro mapeamento sistematizado nacional dos desenvolvimentos universitários brasileiros em tecnologias do hidrogênio, integrando informações anteriormente dispersas em múltiplas agências de fomento. Esse mapeamento articulou 128 projetos, distribuídos entre CNPq, FINEP, ANP, FAPEMIG e fundações de apoio, executados por 89 pesquisadores em 47 instituições brasileiras, analisando sistematicamente seu alinhamento com segmentos específicos da cadeia produtiva industrial. Tal sistematização representa contribuição metodológica e prática, oferecendo instrumento para

identificar oportunidades de colaboração universidade-indústria e formulação de políticas públicas baseadas em evidências empíricas consolidadas.

Esta pesquisa apresenta limitações metodológicas, empíricas e teóricas específicas, que circunscrevem o alcance das conclusões. A seleção da UFMG como caso brasileiro principal apresenta limitações de representatividade, considerando que a análise quantitativa evidenciou baixo número de projetos especificamente nessa instituição em comparação com outras universidades brasileiras mais ativas no desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio.

A ausência de análise de instituições em regiões-chave, particularmente no estado do Ceará, compromete a compreensão da diversidade regional brasileira, considerando que o Ceará emerge como ator estratégico, devido a vantagens comparativas em recursos eólicos offshore, infraestrutura portuária importante e políticas estaduais direcionadas à economia do hidrogênio. O mapeamento realizado nas agências de fomento evidencia concentração de projetos em outras instituições, como USP, UNICAMP, UFRJ, UFC e UFPE, sugerindo que estudos futuros devem incorporar análise institucional mais abrangente para capturar adequadamente a diversidade do ecossistema nacional de pesquisa.

Similarmente, a concentração da análise exclusivamente na Universidade do Porto, embora justificada pela excelência institucional e pelo contexto do doutorado sanduíche, não esgota a diversidade do sistema português, que inclui outras instituições relevantes, como IST-Lisboa, Universidade de Coimbra e Universidade de Aveiro. A concentração analítica em hidrogênio verde, embora relevante e consistente com o recorte proposto, circunscreve o alcance das conclusões, ao não contemplar desenvolvimentos em hidrogênio azul, turquesa ou outras rotas tecnológicas que podem ser estratégicas em contextos específicos. A temporalidade da pesquisa, concentrada no período de 2022-2023-2024, pode não capturar dinâmicas evolutivas de médio prazo, características do desenvolvimento de tecnologias sistêmicas complexas.

Os resultados desta investigação estabelecem diálogo com a literatura científica existente, confirmando proposições sobre o papel das universidades como atores relevantes no desenvolvimento tecnológico (Mazzucato, 2018), enquanto problematizam pressupostos da perspectiva multinível sobre distinções estáveis entre nichos tecnológicos e regimes sociotécnicos. Essa complexidade demanda estudos empíricos que ofereçam maior robustez à literatura multissistêmica.

A concentração identificada em tecnologias de produção sugere necessidade de reorientação das políticas de fomento, para contemplar desenvolvimento equilibrado da cadeia produtiva, incluindo cronogramas específicos para desenvolvimento de capacidades em

armazenamento e distribuição, mecanismos institucionais de coordenação entre agências de financiamento e indicadores de monitoramento que privilegiem integração sistêmica sobre desenvolvimentos isolados. Recomenda-se desenvolvimento de mapeamento extenso das capacidades universitárias brasileiras, incorporando instituições estratégicas, identificadas por meio da análise de agências de fomento. Sugere-se ainda incluir análise institucional comparada, mapeamento regional, priorizando regiões estratégicas, caracterização de especializações técnicas complementares e análise de redes de colaboração interuniversitárias e internacionais.

A agenda de pesquisa futura deve posicionar universidades no centro da discussão sobre políticas de desenvolvimento tecnológico em setores estratégicos para transições sustentáveis, contemplando análise de instrumentos políticos específicos para fortalecimento de capacidades universitárias, desenvolvimento de indicadores de impacto sistêmico universitário, proposição de arranjos institucionais híbridos adequados a contextos nacionais específicos e articulação entre políticas científicas, industriais e energéticas. A expansão da análise comparativa internacional, incorporando sistemas universitários de outros países relevantes para a economia global do hidrogênio, permitirá identificar modelos institucionais alternativos e estratégias diferenciadas de inserção competitiva em cadeias de valor globais emergentes.

7 PRODUTO TECNOLÓGICO

Estrutura sistematizada para conexão entre pesquisadores e redes, para desenvolvimento de tecnologias: exemplo aplicado no ESCALAB.

7.1 Apresentação

O produto técnico gerado neste estudo é uma estrutura organizada, que pode ser implementada pelo Centro de Escalonamento de Tecnologias e Modelagem de Negócios da UFMG (ESCALAB), em colaboração com o CIT SENAI. Apresenta-se como um serviço estratégico de coordenação tecnológica para o ecossistema de inovação. Essa organização estrutura os resultados empíricos da pesquisa, convertendo a análise acadêmica em uma ferramenta útil, que simplifica a identificação, a avaliação e a ligação entre avanços tecnológicos universitários e oportunidades no setor industrial.

A importância desse produto se baseia na constatação empírica de que há uma fragmentação crítica de informações no sistema nacional de inovação em hidrogênio. A pesquisa evidenciou que essa dispersão informacional impede a compreensão sistêmica dos desenvolvimentos tecnológicos em curso, limitando tanto a capacidade de empresas para identificar oportunidades de colaboração universitária quanto a formulação de políticas públicas baseadas em evidências empíricas robustas. Tal lacuna sistêmica compromete a eficiência do ecossistema de inovação e retarda processos de transferência tecnológica essenciais para a competitividade nacional no setor energético emergente.

O avanço de tecnologias multissistêmicas, como o hidrogênio, requer estruturas institucionais ampliadas e que abranjam múltiplas temporalidades, permitindo que tecnologias maduras e emergentes coexistam em usos diferentes (Geels, 2002; Rosenbloom, 2020). A evidência empírica coletada demonstra que universidades em economias emergentes podem assumir centralidade estratégica no desenvolvimento de tecnologias sistêmicas. Essa transcendência, de um modelo convencional de transferência de tecnologia para um papel de coordenação sistêmica, pode constituir elemento decisivo para o posicionamento competitivo de economias não centrais em setores tecnológicos emergentes.

7.2 Componentes técnicos e funcionais

7.2.1 Arquitetura Informacional Integrada

O estudo sistematiza informações de projetos de pesquisa distribuídos entre diferentes fontes institucionais (CNPq, FINEP, ANP, FAPEMIG, FUNDEP e FCO), executados por 89 pesquisadores em 47 instituições brasileiras. Essa sistematização proporciona panorama sobre

trajetórias de desenvolvimento e especializações institucionais que anteriormente permaneciam dispersas para análise integrada. A estrutura contempla caracterização de especializações técnicas por instituição, análise de experiência em colaborações industriais e avaliação de alinhamento com demandas setoriais específicas.

A classificação tecnológica estrutura-se em quatro dimensões principais: (i) produção, contemplando eletrólise da água, reforma de hidrocarbonetos e processos fotocatalíticos; (ii) armazenamento e distribuição, incluindo sistemas criogênicos, reservatórios de alta pressão e infraestrutura de transporte; (iii) aplicações, abrangendo células a combustível, mobilidade e processos industriais específicos; e (iv) integração sistêmica, envolvendo ferramentas de gestão energética e otimização de redes.

7.2.2. Funcionalidades de Articulação Tecnológica

O mecanismo de matching tecnológico está relacionado às capacidades complementares entre instituições, mediante análise de competências específicas, experiência colaborativa e maturidade tecnológica (TRL). Essa funcionalidade facilita processos de avaliação de oportunidades de colaboração por segmento tecnológico, superando barreiras informacionais que tradicionalmente limitam interações universidade-indústria.

Tal organização fornece base analítica para identificar lacunas sistêmicas, por segmento da cadeia produtiva, avaliar a efetividade de chamadas universais em relação a chamadas direcionadas e monitorar indicadores de desenvolvimento sistêmico. Essa funcionalidade atende às demandas de articulação entre as agências de fomento apontadas na pesquisa, oferecendo fundamentos empíricos para decisões estratégicas relativas aos investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

7.2.3. Complementaridade estratégica ao Inova-e do MCTI

A plataforma desenvolvida nesta pesquisa complementa o sistema Inova-e, mediante especializações funcionais específicas que respondem a lacunas identificadas na infraestrutura informacional existente. O Quadro 5 apresenta uma análise comparativa sistemática entre as duas estruturas:

Quadro 5 – Análise comparativa: plataforma desenvolvida versus Inova-e MCTI

Dimensão Analítica	Inova-e MCTI	Plataforma Desenvolvida	Diferencial Específico
Cobertura Institucional	ANEEL, ANP, BNDES, CNEN, CNPq, FAPESP, FINEP, FNDCT.	CNPq, FINEP, ANP, FAPEMIG, FUNDEP, FCO, expandível para outras FAPs.	Incorporação de fundações estaduais, além da FAPESP; desenvolvimentos universitários não contemplados.
Classificação Tecnológica	Estrutura da Agência Internacional de Energia (IEA).	Segmentos da cadeia produtiva (produção, armazenamento, distribuição, aplicações).	Análise de lacunas sistêmicas e alinhamento industrial não detectável via estrutura IEA.
Foco Institucional	Investimentos públicos em PD&D energético.	Desenvolvimentos tecnológicos universitários específicos.	Posicionamento das universidades como elementos centrais.
Especificidade Setorial	Múltiplos setores energéticos.	Tecnologias do hidrogênio especificamente.	Caracterização de especializações técnicas e experiência colaborativa.
Funcionalidade Primária	Sistematização de investimentos.	Facilitação de conexões universidade-indústria.	Operacionalização de matching tecnológico.

Fonte: elaborado pela autora, com base nos resultados da pesquisa.

7.3 Aplicação no ESCALAB

O Centro de Escalonamento de Tecnologias e Modelagem de Negócios da UFMG (ESCALAB), criado em parceria com o CIT SENAI, constitui interface especializada entre pesquisa acadêmica e aplicação comercial, posicionando-se como executor da estrutura sistematizada desenvolvida. O ESCALAB é um projeto de extensão voltado ao desenvolvimento de tecnologias hard science do laboratório ao mercado, com expertise institucional articulada entre universidade-indústria.

A habilidade adquirida nesta investigação pode ser aplicada pelo ESCALAB através de uma metodologia de mapeamento que vai além dos benefícios locais para a UFMG, tornando-se um serviço estratégico para o sistema nacional de inovação. Essa implementação fortalece o ecossistema de inovação, mediante necessidade identificada de alinhamento entre desenvolvimentos tecnológicos universitários e possibilidades industriais.

7.4 Contribuição Sistêmica ao Ecossistema de Inovação

O desenvolvimento dessa competência, pelo ESCALAB, pode representar uma facilitação de conexões capazes de acelerar processos de interação universidade-indústria e ampliar o impacto socioeconômico da pesquisa universitária brasileira.

7.5 Suporte à Formulação de Políticas Públicas Baseadas em Evidências

A estrutura também fornece base empírica para a formulação de políticas públicas que contemplem aspectos técnicos e industriais específicos do setor, equilibrando iniciativas que reconheçam tanto as capacidades acadêmicas quanto as demandas tecnológicas da transição energética. Essa contribuição responde às necessidades identificadas de coordenação entre agências de fomento e otimização de investimentos públicos em pesquisa e desenvolvimento.

A plataforma facilita a análise de efetividade de chamadas universais versus chamadas direcionadas, fornecendo subsídios empíricos para decisões estratégicas de política científica e tecnológica, fundamentadas em evidências robustas sobre padrões de desenvolvimento tecnológico nacional.

7.6. Expansão da Metodologia

A implementação da estrutura metodológica sistematizada no ESCALAB propõe uma reorientação estratégica em relação ao modelo operacional tradicionalmente adotado pelo Centro. Atualmente, no que tange aos programas de inovação aberta, estabelece-se um fluxo no qual empresas apresentam desafios de inovação, e estes são divulgados, pelos canais de e-mail e redes sociais, para captação de propostas de soluções. A metodologia desenvolvida nesta pesquisa propõe uma inversão desse fluxo. Essa inversão se baseia na criação de um banco de pesquisadores, estruturado por habilidades tecnológicas específicas, semelhante ao portfólio de startups gerenciado por aceleradoras de negócios. Isso possibilita uma abordagem proativa na detecção de oportunidades de colaboração e diminui o tempo de procura por soluções tecnológicas apropriadas.

Esse portfólio de pesquisadores é estruturado a partir de critérios de elegibilidade baseados na avaliação de projetos financiados, levando em conta que esses estudos têm um perfil de pesquisa aplicada e uma maior conexão com as necessidades do mercado. A estimativa

de tempo para a criação do banco prevê períodos que variam de dois a cinco meses para cada eixo tecnológico estratégico, uma variação temporal justificada pela especificidade de cada setor e pela complexidade tecnológica. A variabilidade cronológica reflete a necessidade de realizar mapeamento sistemático das agências de fomento, caracterizar competências específicas de cada grupo de pesquisa e estabelecer protocolos adequados de articulação institucional, que considerem as particularidades de cada domínio tecnológico. Contudo, uma vez estabelecida, essa estrutura permitirá redução nos tempos de resposta às demandas empresariais, substituindo processos de busca não direcionados por consultas estruturadas a bancos de dados previamente categorizados. Paralelamente, a metodologia de mapeamento desenvolvida nas principais agências nacionais, especificamente CNPq, FINEP e ANP, bem como nas fundações estaduais mineiras FAPEMIG, FUNDEP e FCO, constitui modelo replicável para outras fundações de amparo à pesquisa estaduais, distribuídas pelo território nacional.

Essa expansão inter-regional das fontes de fomento analisadas torna viável identificar competências complementares geograficamente distribuídas no sistema nacional de inovação, permitindo uma compreensão mais abrangente das capacidades tecnológicas disponíveis no país. O mapeamento constitui uma contribuição abrangente ao ecossistema nacional de inovação, ultrapassando os benefícios locais específicos da UFMG. Além disso, posiciona o ESCALAB como prestador de serviços estratégicos para o sistema nacional de inovação.

REFERÊNCIAS

- ABA, M. M.; SAUER, I. L.; AMADO, N. B. Comparative review of hydrogen and electricity as energy carriers for the energy transition. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 57, p. 660–678, 29 fev. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924000363>. Acesso em: 2 abr. 2024.
- ABDIN, Z. *et al.* Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, p. 109620, mar. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119308275>. Acesso em: 2 out. 2023.
- ABE, J. O. *et al.* Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 29, p. 15072–15086, 7 jun. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991931465X>. Acesso em: 2 abr. 2024.
- AFIF, A. *et al.* Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 822–835, 1 jul. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116001611>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- AGNOLUCCI, P. Hydrogen infrastructure for the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, International Symposium on Solar-Hydrogen-Fuel Cells 2005. v. 32, n. 15, p. 3526–3544, 1 out. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319907001164>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- ALBUQUERQUE, E. M. E.; SILVA, L. A.; PÓVOA, L. Diferenciação intersetorial na interação entre empresas e universidades no Brasil: notas introdutórias sobre as especificidades da interação entre ciência e tecnologia em sistemas de inovação imaturos. *Textos para Discussão Cedeplar-UFMG*, maio 2005. Disponível em: <https://ideas.repec.org/p/cdp/texdis/td264.html>. Acesso em: 9 jun. 2025.
- AUDRETSCH, D. B. From the entrepreneurial university to the university for the entrepreneurial society. *The Journal of Technology Transfer*, v. 39, n. 3, p. 313–321, 1 jun. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10961-012-9288-1>. Acesso em: 5 mar. 2025.
- BAKHUIS, J. *et al.* Mapping the hydrogen transition in the Netherlands: A sociotechnical multi-system event sequence analysis. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 56, p. 100999, 1 set. 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210422425000383>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- BARTLETT, J.; KRUPNICK, A. *The Potential of Hydrogen for Decarbonization: Evaluating Zero-Carbon “Green” Hydrogen Against Renewable and Nuclear Power*. Disponível em: <https://www.resources.org/common-resources/the-potential-of-hydrogen-for-decarbonization-evaluating-zero-carbon-green-hydrogen-against-renewable-and-nuclear-power/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

BERGEK, A. *et al.* Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. *Research Policy*, v. 37, p. 407–429, 2008. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/43963b810bf8903138e08f73e4ecbc441e1ab814>.

CARLSSON, B.; STANKIEWICZ, R. On the nature, function and composition of technological systems. *Journal of Evolutionary Economics*, v. 1, n. 2, p. 93–118, 1 jun. 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01224915>. Acesso em: 13 jul. 2024.

CARLSSON, BO *et al.* Innovation systems: analytical and methodological issues. *Research Policy*, Innovation Systems. v. 31, n. 2, p. 233–245, 1 fev. 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004873330100138X>. Acesso em: 9 jun. 2025.

CHANTRE, C. *et al.* Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception. *SUSTAINABLE PRODUCTION AND CONSUMPTION*, v. 34, p. 26–41, nov. 2022.

CLARK, B. R. *Creating Entrepreneurial Universities: Organizational Pathways of Transformation*. Issues in Higher Education. New York: Elsevier Science Regional, 1998. ISBN-0-08-0433545.

CNI. Hidrogênio sustentável perspectivas e potencial para a indústria brasileira. *Agência de Notícias da Indústria*, 15 ago. 2022. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/cni-aponta-caminhos-para-brasil-adotar-hidrogenio-sustentavel-como-nova-fronteira-energetica/>. Acesso em: 9 jun. 2025.

COHEN, W. M.; NELSON, R.; WALSH, J. P. Special Issue on University Entrepreneurship and Technology Transfer: Links and Impacts: The Influence of Public Research on Industrial R&D. *Manag. Sci.*, v. 48, p. 1–23, 2002. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/4a65767e413237ed254d322fe3ecfef27a344fd8>.

CUNNINGHAM, J. A.; MENTER, M. Transformative change in higher education: entrepreneurial universities and high-technology entrepreneurship. *Industry and Innovation*, v. 28, p. 343–364, 2020. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/16f45caa78befa54cc98af83ada6f8b1c8feaa4c>.

DAWOOD, F.; SHAFIULLAH, G. M.; ANDA, M. A hover view over Australia's Hydrogen Industry in recent history: The necessity for a Hydrogen Industry Knowledge-Sharing Platform. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 58, p. 32916–32939, 27 nov. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031992033562X>. Acesso em: 30 mar. 2024.

DOSI, G. Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation. *Journal of Economic Literature*, v. 26, p. 1120–1171, 1988. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/f0da3c9eb4b0da34dab349f5bfb469fc62508e16>. Acesso em: 30 jul. 2025.

EICKE, L.; DE BLASIO, N. Green hydrogen value chains in the industrial sector—Geopolitical and market implications. *Energy Research & Social Science*, v. 93, p. 102847, 1 nov. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629622003504>. Acesso em: 7 dez. 2024.

ETZKOWITZ, H.; LEYDESDORFF, L. The dynamics of innovation: from National Systems and. 2000. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/fb5cb68e2ef13342d76b639dc5bcd912039f43ed>.

FRANZMANN, D. *et al.* Green hydrogen cost-potentials for global trade. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 85, p. 33062–33076, 15 out. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923022401>. Acesso em: 9 jun. 2025.

FREEMAN, C. *The Economics of Industrial Innovation*. London/New York: Pinter Publishers, 1982.

FREEMAN, C. The ‘National System of Innovation’ in historical perspective. *Cambridge Journal of Economics*, v. 19, p. 5–24, 1995. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/77f966844937b47de4943be0aa5b7ac4cd7c7e0a>. Acesso em: 30 jul. 2025.

GEELS, F. W. From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy*, v. 33, n. 6, p. 897–920, 1 set. 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733304000496>. Acesso em: 17 jun. 2024.

GEELS, F. W. Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Open Issue 2019. v. 39, p. 187–201, 1 ago. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343519300375>. Acesso em: 3 jan. 2025.

GUARIEIRO, L. *et al.* Technological Perspectives and Economic Aspects of Green Hydrogen in the Energetic Transition: Challenges for Chemistry. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2022. Disponível em: http://jbcs.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=11320&nomeArquivo=2021-0359RV_ChemSustainDev.pdf. Acesso em: 18 nov. 2024.

GUERRERO, M. *et al.* Entrepreneurial universities: emerging models in the new social and economic landscape. *Small Business Economics*, v. 47, n. 3, p. 551–563, out. 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11187-016-9755-4>. Acesso em: 10 jun. 2024.

HEKKERT, M. *et al.* Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 74, p. 413–432, 2007. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Functions-of-innovation->

systems%3A-A-new-approach-for-Hekkert-Suurs/367b8e9d07f4bbc768d50e4e284a1c4349cc62c4. Acesso em: 30 jul. 2025.

HØYLAND, S. A.; KJESTVEIT, K.; ØSTGAARD SKOTNES, R. Exploring the complexity of hydrogen perception and acceptance among key stakeholders in Norway. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 21, p. 7896–7908, 8 mar. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922054386>. Acesso em: 11 jun. 2025.

IEA. *Global Energy Crisis – Topics*. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis>. Acesso em: 19 abr. 2024.

IEA. Policies Database. 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/policies>. Acesso em: 23 jun. 2025.

IPEA. Panorama do Hidrogênio no Brasil. *Ipea*, 22 abr. 2022. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/index.php?option=com_content&view=article&id=39477&Itemid=466. Acesso em: 9 jun. 2025.

IRENA, I. R. E. A. *et al.* *Geopolitics of the energy transformation: the hydrogen factor*. [S.l.]: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1854/LU-01GQM4D6NH1R51QF7YQW9ZAP9S>. Acesso em: 13 jun. 2025.

KOVAČ, A.; PARANOS, M.; MARCIUŠ, D. Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 16, p. 10016–10035, 3 mar. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920345079>. Acesso em: 24 abr. 2024.

LEBROUHI, B. E. *et al.* Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 11, p. 7016–7048, 5 fev. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921047765>. Acesso em: 27 mar. 2024.

LINDNER, R. Green hydrogen partnerships with the Global South. Advancing an energy justice perspective on “tomorrow’s oil”. *Sustainable Development*, v. 31, n. 2, p. 1038–1053, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sd.2439>. Acesso em: 3 abr. 2024.

LUNDVALL, B. A. (Ed.). *National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning*. London/Nova York: Pinter Publishers, 1992.

LUNDVALL, B. National Innovation Systems-Analytical Concept and Development Tool. *Industry and Innovation*, v. 14, n. 1, p. 95–119, 1 fev. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13662710601130863>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MALERBA, F. Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy, Innovation Systems*. v. 31, n. 2, p. 247–264, 1 fev. 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733301001391>. Acesso em: 6 maio 2024.

MALERBA, F. Sectoral systems of innovation: basic concepts. In: MALERBA, F. (Org.). *Sectoral Systems of Innovation: Concepts, Issues and Analyses of Six Major Sectors in Europe*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. p. 9–41. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/sectoral-systems-of-innovation/sectoral-systems-of-innovation-basic-concepts/74F9615FDB1140EC5D16AA036E233330>. Acesso em: 9 jun. 2025.

MALERBA, F. The evolution of the pharmaceutical industry. *Business History*, v. 5, n. 5, 2015. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00076791.2014.975119>. Acesso em: 9 jun. 2025.

MARKARD, J.; TRUFFER, B. Technological innovation systems and the multi-level perspective: Towards an integrated framework. *Research Policy*, v. 37, p. 596–615, 2008. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/fc68d75e809d4699610abb080e1934fc0a1143b5>.

MAZZUCATO, M.; PEREZ, C. Redirecting growth: inclusive, sustainable and innovation-led. In: REINERT, E.; KVANGRAVEN, H. *Um guia moderno para o desenvolvimento econômico desigual*. S.l: Elgaronline, 2023. Disponível em: <https://www.elgaronline.com/edcollchap/book/9781788976541/book-part-9781788976541-9.xml>. Acesso em: 20 ago. 2024.

MCADAM, M.; MILLER, K.; MCADAM, R. A micro level investigation of stakeholder motives on university technology transfer business models. *Studies in Higher Education*, v. 46, p. 951–964, 2021. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/0ae3fb9c1db1da347c9ded726f1343079706b8d3>. Acesso em: 30 jul. 2025.

MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES, P. *Declaração Conjunta por ocasião da XIII Cimeira Luso-Brasileira* 22 de abril de 2023. Ministério das Relações Exteriores, 22 de abril de 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/declaracao-conjunta-por-ocasio-da-xiii-cimeira-portugal-brasil-lisboa-22-de-abril-de-2023-1. Acesso em: 9 jun. 2025.

MME. Programa Nacional de Hidrogênio - PNH2. *Ministério de Minas e Energia*. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>. Acesso em: 9 jun. 2025.

MORIARTY, P.; HONNERY, D. Hydrogen's role in an uncertain energy future. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 34, n. 1, p. 31–39, 1 jan. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908014353>. Acesso em: 16 maio 2024.

NAZIR, H. *et al.* Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part I: H2 production methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 27, p. 13777–13788, 18 maio 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920310296>. Acesso em: 1 abr. 2024.

NEGRO, V.; NOUSSAN, M.; CHIARAMONTI, D. The Potential Role of Ammonia for Hydrogen Storage and Transport: A Critical Review of Challenges and Opportunities. *Energies*, v. 16, n. 17, p. 6192, jan. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/17/6192>. Acesso em: 25 nov. 2024.

NELSON, R. R.; WINTER, S. G. *An evolutionary theory of economic change*. Cambridge: The Belknap Press of Harvard Univ. Press, 2004.

OLIVEIRA, A. S. A liderança dos países desenvolvidos no Acordo de Paris: reflexões sobre a estratégia do Naming and Shaming dentro do Balanço-Global. *Sequência (Florianópolis)*, p. 155–180, 3 jun. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/seq/a/VszwLSFvHnTgbrCCHJfvsdb/>. Acesso em: 19 abr. 2024.

PANCHENKO, V. A. *et al.* Prospects for the production of green hydrogen: Review of countries with high potential. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 12, p. 4551–4571, 8 fev. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922047309>. Acesso em: 30 mar. 2024.

PAVITT, K. Sectoral Patterns of Technical Change: Towards a Taxonomy and a Theory: Research Policy. *Política de Pesquisa*, v. 13, n. 6, p. 343-373, 1984. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/dc1b8a58a1ea7582f652fac7bd5d198d8bdeb6bc6>. Acesso em: 30 jul. 2025.

PEREZ, C. *Technological revolution and financial capital: the dynamics of bubbles and golden ages*. Cheltenham: Edward Elgar, 2002.

PEREZ, C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge Journal of Economics*, v. 34, n. 1, p. 185–202, 2010. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/24232030>. Acesso em: 13 jun. 2025.

RADARH2. *IEA - Global Hydrogen Review 2024: Caminhos e Desafios para a Transição Energética*. Disponível em: <https://www.radardohidrogenio.com.br/post/iea-global-hydrogen-review-2024-caminhos-e-desafios-para-a-transição-energética>. Acesso em: 19 nov. 2024.

RASUL, M. G. *et al.* The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. *Energy Conversion and Management*, v. 272, p. 116326, 15 nov. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422011049>. Acesso em: 24 abr. 2024.

RIFKIN, J. *A Economia do Hidrogênio*. São Paulo: M.Books, 2003.

RIP, A.; KEMP, R. Towards a theory of sociotechnical change. In: RAYNER, S.; MAJONE, E. L. (Eds.). *Human choice and climate change*. Columbus, USA: Battelle Press, 1998. p. 327-399.

ROSENBLOOM, D.; BERTON, H.; MEADOWCROFT, J. Framing the sun: A discursive approach to understanding multi-dimensional interactions within socio-technical transitions through the case of solar electricity in Ontario, Canada. *Research Policy*, v. 45, p. 1275-1290, 2016. Disponível em:

https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=05nbj5wAAAAJ&cstart=20&pagesize=80&sortby=pubdate&citation_for_view=05nbj5wAAAAJ:u5HHmVD_uO8C. Acesso em: 03 ago. 2025.

ROSENBLOOM, D. Engaging with multi-system interactions in sustainability transitions: A comment on the transitions research agenda. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 34, p. 336–340, 1 mar. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221042241930259X>. Acesso em: 3 jan. 2025.

SCHMIDT, O. *et al.* Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 52, p. 30470–30492, 28 dez. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917339435>. Acesso em: 13 jun. 2025.

SCHUMPETER, J. A. *The Theory of Economic Development*. Harvard University Press, Cambridge, 1911.

SCHUMPETER, J. A. *Business cycles: a theoretical, historical and statistical analysis of the capitalist process*. New York/Toronto/London: McGraw-Hill, 1939.

SCHWABE, J. Regime-driven niches and institutional entrepreneurs: Adding hydrogen to regional energy systems in Germany. *Energy Research & Social Science*, v. 108, p. 103357, 1 fev. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629623004176>. Acesso em: 11 jun. 2025.

SHARIF, N. Emergence and development of the National Innovation Systems concept. *Research Policy*, v. 35, n. 5, p. 745–766, 1 jun. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733306000618>. Acesso em: 10 jul. 2024.

SIEGEL, D. S.; WALDMAN, D.; LINK, A. Assessing the impact of organizational practices on the relative productivity of university technology transfer offices: an exploratory study. *Research Policy*, v. 32, n. 1, p. 27–48, 1 jan. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733301001962>. Acesso em: 5 mar. 2025.

STAKE, R. E. Case studies. In: DENZIN, N. K.; LINCOLN, Y. S. (Eds.). *Handbook of qualitative research*. London: Sage, 2000. p. 435–454.

UNITED NATIONS. *Paris Agreement*. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 5 maio 2024.

URBANO, D.; GUERRERO, M. Entrepreneurial Universities. *Economic Development Quarterly*, v. 27, p. 40–55, 2013. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/62a4d87ab43d6a7e14d6e0d80046c383fdd6b906>. Acesso em: 30 jul. 2025.

VALERA-MEDINA, A. *et al.* Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 69, p. 63–102, 1 nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128517302320>. Acesso em: 27 nov. 2024.

WINTER, S.; NELSON, R. An evolutionary theory of economic change. 1983. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/c9bedb4a962ec1b4f2ed96b1a8ef61902e5a9af8>. Acesso em: 30 jul. 2025.

WORDSTEEL ASSOCIATION. Produção de aço bruto em dezembro de 2024 e totais de produção global de aço bruto em 2024. Bruxelas, 24 jan. 2025.

YAP, J.; MCLELLAN, B. A Historical Analysis of Hydrogen Economy Research, Development, and Expectations, 1972 to 2020. *Environments*, v. 10, n. 1, p. 11, jan. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/10/1/11>. Acesso em: 12 abr. 2024.

ZHAO, Z. *et al.* Ammonia Energy: Synthesis and Utilization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 63, n. 18, p. 8003–8024, 8 maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00384>. Acesso em: 25 nov. 2024.

ZUBEN, T. *et al.* Is Hydrogen Indispensable for a Sustainable World? A Review of H₂ Applications and Perspectives for the Next Years Is Hydrogen Indispensable for a Sustainable World? A Review of H₂ Applications and Perspectives for the Next Years. *J. Braz. Chem. Soc.*, v. 33, n. 8, 2022 Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/74Npx87D9XMCLtXtTrWmx7Q/abstract/?lang=en>. Acesso em: 31 mar. 2024.

ANEXO A – Transcrição das Entrevistas

ENTREVISTADO 1

A primeira trajetória analisada diferencia-se das demais por sua orientação sistêmica e função coordenativa no desenvolvimento da economia do hidrogênio em Minas Gerais. A Entrevistada 1, professora do Departamento de Engenharia Nuclear desde 2011, com formação em Física, mestrado e doutorado no Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG, doutorado na Universidade de Pisa em Segurança Industrial Nuclear e pós-doutorado na UFMG, desenvolve o que caracteriza como "Proposta de um Plano de Ação e Desenvolvimento para Inserção de Hidrogênio no Processo de Transição Energética no Estado de Minas Gerais".

Trajetórias tecnológicas

A especificidade dessa trajetória reside em sua orientação para a articulação entre dimensões técnicas, econômicas e políticas necessárias para a implementação sistêmica do hidrogênio na matriz energética regional. Conforme explicita a pesquisadora, sua área de atuação é "mais voltada mesmo pra Engenharia Nuclear e pra Planejamento Energético", o que a posiciona como articuladora entre desenvolvimentos tecnológicos específicos e coordenação estratégica.

Na fala da pesquisadora, o trabalho que coordena visa: "compreender as possibilidades de se produzir um hidrogênio em escala a partir de fontes renováveis que a gente tem na nossa matriz energética, né? Pra ver onde que a gente poderia substituir, por exemplo, na parte de mobilidade, né? De transporte, né? A proposta é substituir, então, veículos". Essa perspectiva evidencia compreensão sistêmica que reconhece o hidrogênio como vetor energético transversal, capaz de integrar múltiplos setores mediante substituição coordenada de combustíveis fósseis.

O projeto desenvolve-se prioritariamente no segmento de planejamento e análise sistêmica. A maturidade do trabalho situa-se em estágio de mapeamento conceitual e análise de viabilidade, embora sua contribuição sistêmica não se enquadre na escala TRL. O caráter inovativo caracteriza-se como incremental.

Redes de interação

O financiamento estrutura-se mediante auxílio financeiro da FAPEMIG, refletindo estratégia de desenvolvimento regional que aproveita mecanismos estaduais de fomento para questões de relevância nacional. A rede de colaboração mantém características regionais e

funcionalmente distribuídas: "a gente tem na UFOP, por exemplo, a gente tem dois pesquisadores de lá, que entraram nesse projeto". Essa parceria permite a distribuição funcional de responsabilidades entre instituições com competências complementares, evidenciando emergência de arranjos colaborativos que superam limitações individuais de escala e especialização.

A estrutura colaborativa regional representa um modelo de coordenação horizontal entre universidades mineiras, aproveitando especializações complementares para desenvolvimento de análise sistêmica que transcende capacidades individuais. A UFOP contribui com expertise específica em recursos minerais e energéticos, enquanto a UFMG coordena a articulação estratégica e metodológica do projeto.

Visão de especialistas

O estudo realizado pela pesquisadora vai além das restrições tecnológicas isoladas, para detectar restrições sistêmicas específicas do cenário brasileiro. Um obstáculo sistêmico diz respeito à disponibilidade de água: "para produzir hidrogênio, precisamos de água, certo? Pelo menos pela fotoeletrolise ou pela eletrolise diretamente. Então envolve isso também, né? Todas as análises que se vão fazer, a gente tem que fazer essa verificação da fonte de água".

Essa inquietação se baseia numa avaliação crítica contextual das alterações climáticas atuais: "Porque também a gente está vendo aí, está escancarado para a gente, as mudanças climáticas estão aceleradas no ritmo que ninguém esperava. Rios secando em várias partes do país". Gargalos econômicos emergem como limitação primária para implementação comercial: "Ainda temos muitos gargalos, principalmente o custo atual, que está impedindo o uso mais rápido do hidrogênio". A dimensão da infraestrutura é entendida por meio de uma comparação com outros países. "Por exemplo, na Europa, já existem muitos postos de fornecimento de hidrogênio. Isso é importante, sobretudo em relação à mobilidade. Se a gente quer utilizar o hidrogênio para a mobilidade, vai precisar disponibilizar o hidrogênio em vários locais. No Brasil, infelizmente, no momento, temos poucos postos de hidrogênio."

A análise das potencialidades brasileiras baseia-se na avaliação das vantagens comparativas do país em relação aos recursos energéticos renováveis. "Mas a vantagem do Brasil é exatamente a possibilidade de fornecimento de energia limpa, elétrica, o fotovoltaico e o eólico. Principalmente, lá no Ceará, em relação ao eólico, o fotovoltaico está quase no país inteiro."

O interesse internacional é reconhecido como validação externa das potencialidades identificadas: "O próprio... tem, como, por exemplo, a Alemanha, que está interessada no hidrogênio brasileiro. Então, a ideia seria fornecer hidrogênio para outros países". Contudo, a avaliação crítica inclui reconhecimento de defasagens comparativas: "Eu acho que é muito promissor, mas ainda a gente está com bastante dificuldade e estamos precisando de financiamento para conseguir ultrapassar essa... Estamos atrasos em relação à Europa, aos Estados Unidos, etc."

ENTREVISTADO 2

O Entrevistado 2, professor titular do Departamento de Química da UFMG desde 1996, com formação internacional em eletroquímica no Instituto Politécnico de Grenoble, França, 1988, e PhD em Química pela Universidade de Grenoble, desenvolve trajetória tecnológica caracterizada pela especialização em pilhas de combustível de óxido sólido (SOFC) com capacidade operacional reversível.

Trajetórias tecnológicas:

Caracterização das tecnologias desenvolvidas:

O pesquisador desenvolve duas linhas tecnológicas complementares, que evidenciam progressão estratégica desde componentes específicos até sistemas integrados. Conforme explicita: "Atualmente, então, eu tenho dois projetos principais. Um que está na área de aplicação da tecnologia de pilha combustível em ferrovia, do ponto de vista de simulação". A primeira linha concentra-se em aplicação para mobilidade pesada: "A gente está mais focado na liberação de energia, para dar um veículo grande. Então, a gente focou o trem, que é a pilha com a qual a gente está trabalhando".

Essa especialização fundamenta-se em análise técnica das vantagens operacionais das SOFC: "O fato de elas trabalharem em alta temperatura, mesmo se isso complica o desenvolvimento do sistema, tem uma vantagem em relação ao rendimento, porque a gente pode recuperar o calor que é liberado durante as reações eletroquímicas". A segunda linha representa inovação sistêmica, mediante desenvolvimento de capacidade operacional reversível: "utilizar uma pilha combustível no sentido inverso de funcionamento, em vez de produzir energia elétrica, produzir hidrogênio e óxido de carbono".

O processo específico é detalhado tecnicamente: "utilizar uma pilha combustível de óxido sólido, utilizando como combustível metano, metano humidificado, e como combulente, a gente está utilizando CO₂ humidificado, e a partir do próprio funcionamento inverso dessa

pilha, isso é fornecer a energia elétrica da pilha, a gente vai produzir hidrogênio e CO, que são elementos que juntos são chamados de syn-gas".

A diferenciação tecnológica é feita mediante comparação sistemática com tecnologias estabelecidas comercialmente: "as pilhas poliméricas, no momento, são as mais comercializadas, mais maduras. E depois, em segundo, vem a SOFC, que são as pilhas de óxido sólido, que trabalham em alta temperatura, que não são tanto maduras, mas que têm várias vantagens". O TRL das pilhas PEM é caracterizado como avançado (8-9), enquanto as SOFC situam-se em estágio intermediário (TRL 4-6).

A vantagem operacional das SOFC é quantificada comparativamente: "a PEM está na frente no momento, mas ela não tem um rendimento tão alto em relação à pilha combustível de óxido sólido". A reversibilidade constitui diferencial técnico crítico: "A PEM não dá para ser invertida, tem uns problemas técnicos, então precisa, obrigatoriamente, de dois sistemas, um sistema para eletrólise, um sistema para fornecer energia... No caso da SOFC, ela tem características que permitem inverter a própria pilha, você utiliza só um sistema que vai fazer as duas".

A viabilidade técnica é demonstrada através de progressão estruturada: "a gente começa a trabalhar ao nível laboratorial e passamos depois para uma escala maior, onde a gente vai ter o que a gente chama de stack, que é o empilhamento de pilha unitária, e aí já começamos a trabalhar, a vislumbrar uma aplicação para uma maior escala".

Redes de interação

Estruturas de financiamento e orientação comercial

A estrutura de financiamento representa modelo híbrido que articula recursos empresariais e governamentais: "o financiamento é do SENAI, e eles estão financiando essa parte do projeto, e isso se enquadra com o projeto maior, que eu acho que é financiado pela Galp, a Galp é uma empresa portuguesa". Esse arranjo evidencia inserção em redes internacionais de desenvolvimento tecnológico.

A singularidade desse projeto está na implementação sistemática de análises econômicas, desde fases iniciais: "contratamos um serviço externo, composto por economistas, que estão realizando esse cálculo para avaliar efetivamente o custo, considerando toda a cadeia, para identificar a parte mais financeira associada ao projeto. Não é um projeto que está sendo, só visando a parte técnica da pilha combustível aplicada em ferrovia". Essa abordagem contrasta com projetos acadêmicos convencionais, evidenciando orientação explícita para a viabilização comercial.

As parcerias nacionais seguem especialização funcional distribuída, que otimiza aproveitamento de competências específicas: "também a Universidade Federal de Rio de Janeiro, mas nós fomos contratados como consultoria e também a prestação de serviço nesse outro projeto". A distribuição de responsabilidades é funcionalmente específica: "a pessoa da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que trabalha nessa transformação do syn-gas em outra substância, nosso trabalho é só de produzir esse syn-gas".

A colaboração com entidades diversificadas inclui: "em uma ONG que está participando do projeto. A ONG Trem, T-R-E-M. É uma ONG de Belo Horizonte, que tem como foco o retorno, o trem, etc." A colaboração histórica com empresas regionais foi estruturante: "a gente teve uma colaboração grande com a CEMIG e aí a gente conseguiu montar um laboratório".

As colaborações internacionais são amplas e estruturadas: "a gente tem colaboração com a Suíça, com a França, etc. A gente tem umas colaborações nesse projeto". A participação em programas internacionais específicos é detalhada: "Até ultimamente, a gente participou de um programa grande do governo alemão com o governo brasileiro. Eu fui um dos professores atuando nessa área e, exatamente, eu atuava na parte de capacitação". Essa inserção internacional evidencia reconhecimento das competências desenvolvidas e das possibilidades de transferência de conhecimento bidirecional.

Visão de especialistas

Análise de gargalos tecnológicos e de segurança

O pesquisador articula análise de segurança: "O hidrogênio começa a ter, a partir de 4% em volume no ar, ele começa a ficar perigoso, pode ter explosão abaixo de 80%". A evolução histórica dos aspectos regulatórios é contextualizada: "nós, no início dos anos 2000, a gente começou a trabalhar nessa área e no Brasil tinha muito pouca coisa" em termos regulatórios.

A infraestrutura laboratorial específica é detalhada: "A gente até colocou lá no laboratório um sistema de tomada antifaísca, a gente tem o P-Direto lá, a gente tem toda uma evacuação de hidrogênio, etc. Mas a gente estava um pouco no escuro, a gente tentou, a partir da informação que a gente achava lá na época". A evolução é reconhecida: "com certeza, progrediu muito essa parte da regulamentação, tanto do ponto de vista internacional quanto nacional".

Gargalos técnicos específicos emergem com diversificação de combustíveis: "qualquer pilha combustível, em princípio, utilizando hidrogênio não tem problema nenhum, quando a gente está começando a trabalhar com outros combustíveis, como o metano, o etanol, a gente já tem mais dificuldade".

A visão sistêmica é articulada: "Eu não acho que o hidrogênio é a única tecnologia do futuro. Eu acho que ela é muito importante. Então, eu não acredito que a transição energética vai por um caminho só". A análise contextual específica é desenvolvida: "Eu acho que a produção de hidrogênio vai ser viável dependendo muito da situação e do contexto, tanto do país quanto da aplicação... vai depender muito do local que a gente está e da tecnologia selecionada".

Essa perspectiva evidencia maturidade analítica, que reconhece a complexidade sistêmica das transições energéticas, transcendendo abordagens tecnodeterministas para incorporar variáveis contextuais e de aplicação específica.

ENTREVISTADA 3

A Entrevistada 3, química e professora da UFMG há 10 anos, com especialização explícita em "sustentabilidade, ESG, escalonamento, produção de energia, reaproveitamento de rejeitos", desenvolve trajetória caracterizada por diversificação tecnológica estratégica e orientação explícita para transferência comercial. Essa abordagem evidencia maturidade institucional, ao reconhecer diferentes temporalidades e riscos associados ao desenvolvimento de tecnologias emergentes.

Trajetórias tecnológicas

A pesquisadora desenvolve três linhas tecnológicas, com diferentes graus de maturidade e potencial comercial, configurando estratégia de gestão de riscos que equilibra pesquisa exploratória com desenvolvimentos aplicados. A primeira linha concentra-se em water splitting fotocatalítico: "Então eu tenho projetos na área de produção de hidrogênio verde, então é síntese de catalisadores para aumentar a conversão, rendimento, então são pesquisas bem ainda em laboratório, escala de laboratório". O processo específico é caracterizado: "Eu avalio o que a gente hoje desenvolve também em escala de laboratório, a gente tenta meios e mecanismos de produzir hidrogênio verde utilizando só um simulador de energia solar".

A segunda linha explora conversão térmica de biomassa com progressão evidente: "Temos alguns projetos também de produção de hidrogênio a partir de conversão de biomassa. Então você decompõe biomassa termicamente na presença de catalisador. E essa decomposição tem liberação de hidrogênio". Essa linha apresenta evolução clara: "a gente já começou a aumentar alguns testes ainda em escala de laboratório, mas a gente tem aumentado a quantidade de biomassa que a gente usa".

A terceira linha integra competências em armazenamento: "tem uma parceria também com o pessoal de Viçosa, que é para produção de hidrogênio a partir de boridreto de sódio. Então, a partir de sólidos, que na verdade são armazenadores de hidrogênio". A distribuição na cadeia produtiva é explicitada: "esses dois primeiros focados na produção e o último no armazenamento".

A caracterização da maturidade evidencia compreensão estratégica das diferentes trajetórias. A primeira linha (water splitting) situa-se em TRL 2-3: "é algo que ainda tem um rendimento muito baixo, então, o que a gente tenta fazer é otimizar o processo". A orientação mantém-se acadêmica: "é uma área que demanda ainda muita pesquisa, muitos esforços de vários pesquisadores. Então, o nosso foco, quando a gente fala nessa área, ainda é publicar".

A segunda linha (biomassa) demonstra TRL 4-5: "a parte de produção de hidrogênio a partir de biomassa, a gente já começou a aumentar alguns testes... a gente já participou de um programa de inovação com essa tecnologia e a gente tem um projeto da produção desse piloto". A terceira linha (armazenamento) situa-se em TRL 3-4, desenvolvida em parceria com a UFV. A viabilidade varia significativamente entre as linhas. Para as tecnologias exploratórias: "No caso das tecnologias a partir de celular e de transporte, não. Realmente ainda é um trabalho muito acadêmico, voltado para tese, dissertação de alunos ou artigo, então a gente não teve esse olhar ainda". Para a tecnologia mais madura: "a parte da biomassa, como está um pouco mais avançado, sim, a gente já tem esse estudo, inclusive, de viabilidade técnica e econômica, para a gente entender qual catalisador produz mais hidrogênio, qual que é o custo disso, se é viável ou não".

Redes de interação

O financiamento segue modelo diversificado, que articula diferentes fontes: "Esse, o de armazenamento, ele faz parte de dois grandes projetos de rede entre vários professores que é coordenado por uma professora da UFV. Então, ela obteve um financiamento da FAPEMIG e um do CNPq para produção de hidrogênio e armazenamento a partir de diferentes catalisadores".

Para outros projetos: "No outro projeto de produção de hidrogênio a partir de biomassa, a gente teve um recurso, uma bolsa de pós-doutorado para fazer esse projeto, um edital da FAPEMIG de recém-doutores. E o de produção de hidrogênio por radiação solar e tudo que eu faço em laboratório, ele vem de editais indiretos, então editais que eu ganho Universal Centro de Equipe, a PMI, que são editais um pouco mais genéricos".

A rede de colaboração nacional é estruturada: "Também com o professor da UNIFEI, a gente faz parte dessa mesma rede". Colaboração internacional específica é estabelecida: "Esse projeto também de produção de hidrogênio utilizando simulador solar, eu faço essa pesquisa em parceria com um professor dos Estados Unidos. Foi um professor que eu fiz pós-doutorado na Rice em Houston, ele tem essa célula e esse equipamento lá, então a gente desenvolve os catalisadores aqui e envia pra ele".

O Centro de Escalonamento representa inovação institucional: "hoje a gente tem o ESCALAB, o ESCALAB é um centro de escalonamento da UFMG, que eu faço parte, hoje a gente tem, enfim, já algumas demandas de empresas interessadas na produção de combustíveis renováveis a partir de biomassa". Essa estrutura configura interface especializada entre pesquisa acadêmica e aplicação comercial.

Visão de especialistas

A pesquisadora articula análise abrangente dos desafios de escalonamento: "algo muito difícil, na minha opinião, quando a gente fala em hidrogênio, é escalonamento. Escalonar a produção de hidrogênio eu não acho fácil, você ter simulador solar numa escala maior, o custo é muito alto, ou de eletrolisador, ou de catalisador, ou dos simuladores".

Gargalos específicos de infraestrutura são identificados: "hoje o nosso maior gargalo é a gente ter um ambiente seguro e que a gente consiga os melhores equipamentos para simular o que a gente está produzindo em laboratório". Dependência tecnológica externa emerge: "para essa parte de produção de hidrogênio, utilizando o simulador solar, nós não temos esse equipamento, então a gente conta com essa parceria com os Estados Unidos".

Gargalos de purificação são especificados: "quando a gente fala de produção de hidrogênio a partir de biomassa, geralmente a gente produz uma mistura de gases, não é só hidrogênio. Então, a purificação desse hidrogênio, na minha opinião, também é algo aí que é um gargalo que tem que ser mais estudado".

O interesse comercial específico é identificado: "O de biomassa, quem mais tem interesse hoje nesse projeto, são os setores de produção de energia. Então, está muito focado realmente na produção de hidrogênio, não para uso, mas talvez para venda". Interesse adicional do setor de mineração: "O terceiro, que é essa maneira de armazenamento, são empresas de mineração que podem envolver os catalisadores".

A caracterização inovativa varia por tecnologia: "A primeira, que é por simulador de energia solar, é disruptiva. E as outras duas eu acho que são incrementais. Já tem muita coisa

aí, principalmente a partir de biomassa, é algo que eu acho realmente incremental, que dá pra gente desenvolver num período menor, que ela já é bem viável".

ENTREVISTADA 4

A Entrevistada 4, professora do Departamento de Química da UFV há 12 anos e coordenadora do Laboratório de Nanomateriais e Química Ambiental, desenvolveu expertise específica, durante pós-doutorado internacional, que exemplifica o modo como experiências formativas estruturam trajetórias de pesquisa subsequentes. Conforme relata: "Em 2020, eu tive a oportunidade de fazer um pós-doutorado com o professor Didier Astruc, na Universidade de Bordeaux, na França. E ali eu tive a oportunidade de estar trabalhando com reações de evolução de hidrogênio a partir de armazenadores de hidrogênio no estado sólido".

Trajetórias tecnológicas:

A especialização concentra-se em limitação fundamental do hidrogênio gasoso, que constitui gargalo sistêmico para implementação comercial: "E o hidrogênio, ele é bastante interessante, porque ele só produz vapor d'água. Só que então, já que ele tem todo esse potencial, por que ele não é popular? Isso por conta das técnicas de armazenamento e transporte de hidrogênio, que estão atreladas às características desse hidrogênio". As limitações específicas são detalhadas: "Hidrogênio, ele tem uma baixíssima densidade, baixíssimo ponto de fusão e ebulição, o que faz com que as técnicas de armazenamento sejam muito caras, muito, muito caras, que é a liquefação do gás ou a gasificação do gás".

Questões de segurança constituem gargalo adicional: "Além disso, o hidrogênio, ele é extremamente explosivo, o que dificulta um pouquinho o seu uso". A orientação estratégica é explicitada: "Pensando nisso, existem os armazenadores químicos de hidrogênio... a gente não foca na produção de hidrogênio, a gente foca nessa questão de armazenamento e transporte seguro do hidrogênio".

O desenvolvimento inicial focou em boridreto de sódio: "o nosso foco foi desenvolver catalisadores para fazer essa evolução de hidrogênio controlada, liberação de hidrogênio controlado... materiais, catalisadores a base de nióbio, que produziam resultados bem interessantes. Vários artigos foram publicados nessa temática". A reorientação estratégica ocorreu durante participação no programa ESCALAB: "A gente participou do programa de aceleração de tecnologia, o Escal-se. E ali foi muito interessante, porque a gente teve que fazer o estudo de viabilidade econômica. A gente já tinha lá o estudo de viabilidade técnica, mas a gente fez o estudo de viabilidade econômica".

As limitações identificadas eram múltiplas: "E esse subproduto, a gente estava meio que sem saber o que fazia com ele. Então, estava complicando um pouquinho a nossa cadeia produtiva. Aí, tanto o estudo de viabilidade econômica e esse subproduto fez com que a gente refletisse sobre... a gente começou a trabalhar com ácido fórmico". Constrangimentos adicionais emergiram: "A gente tinha que comprar da China uma tonelada. Boridreto de sódio é um reagente controlado pelo Exército. Tinha questão também do subproduto".

A transição para ácido fórmico fundamentou-se em vantagens sistêmicas: "O ácido fórmico é um armazenador químico de hidrogênio... densidade energética por quilograma... Isso aí equivale a 3 vezes o potencial da gasolina. E esse ácido fórmico pode vir da biomassa". Vantagens específicas incluem neutralidade de carbono: "pensando sobre aspecto de neutralidade de carbono, o ácido fórmico pode ser produzido a partir de biomassa. Biomassa que capta CO₂. Então, aí a gente tem um aspecto neutro de carbono."

O TRL atual é caracterizado como 4-5: "É, prova de conceito 3. A gente ainda não fez a prototipagem, mas hoje a gente teria toda a condição de fazê-la. Então tá entre 4 e 5. Isso entre otimização e prototipagem". A infraestrutura de escalonamento é disponível: "a gente tem esse pequeno reator e agora a gente está tentando um recurso para escalar essa tecnologia".

Redes de interação

A capacidade de financiamento demonstrada é significativa e concentrada temporalmente: "a gente aprovou um projeto no valor de 1.390.000 reais. Logo na sequência, em 2022, o CNPq lançou uma chamada com uma demanda de hidrogênio também. Então, a gente submeteu uma proposta também e aí a gente aprovou 740 mil". A concentração temporal é notável: "não deve ter tido mais de seis meses". Essa capacidade evidencia reconhecimento institucional das competências desenvolvidas e alinhamento com prioridades de política científica nacional.

A rede estadual é abrangente: "Essa equipe que foi criada consistia de 21 professores, de sete instituições de ciência e tecnologia aqui do estado de Minas Gerais: UFV, UFMG, CEFET, UNIFEI, UFOP, Universidade Federal de Diamantina e Universidade Federal de São João Del Rey". Essa articulação evidencia capacidade de coordenação sistêmica, que transcende limitações individuais mediante especialização distribuída.

Colaborações internacionais são integradas estrategicamente: "Também nessa proposta, entrou o professor Didier Astruc, e o professor Richard Walton da Universidade de Warwick, na Inglaterra, e o professor Manjushu, da Universidade de Anhui, na China". Essa inserção internacional fortalece legitimidade científica e acesso a competências complementares.

A coordenação pela UFV configura arranjo colaborativo que integra diferentes segmentos da cadeia tecnológica, mediante especialização distribuída entre as instituições participantes. Essa estrutura permite aproveitar competências específicas de cada universidade, enquanto desenvolve capacidades sistêmicas que nenhuma instituição individual poderia alcançar isoladamente.

Visão de especialistas

A perspectiva sobre o papel do hidrogênio nas transições energéticas é equilibrada e contextualizada: "É, eu, na minha visão, o hidrogênio, ele vai ter um papel importante nesse todo esse trabalho aí de transição energética, né, de substituição de alguns fósseis, mas assim, não é a solução, né, efetiva. Ele vai ser parte da solução". Essa perspectiva transcende visões tecnodeterministas, para reconhecer complexidade sistêmica das transições energéticas.

A análise incorpora reconhecimento de limitações técnicas e econômicas: "A gente sabe que ainda tem muitos gargalos, principalmente relacionados a custo, segurança, infraestrutura". Simultaneamente, identifica oportunidades específicas do contexto brasileiro: "Mas o Brasil tem vantagens competitivas importantes, principalmente recursos renováveis abundantes e potencial de produção de biomassa".

A avaliação sobre capacidades nacionais é realista: "A gente ainda está em estágio inicial comparado com outros países, mas tem potencial grande. O que precisa é de coordenação melhor entre pesquisa, políticas públicas e setor privado". Essa perspectiva evidencia compreensão sistêmica, que reconhece necessidade de articulação entre diferentes atores para viabilização da economia do hidrogênio.

ANÁLISE QUALITATIVA - UNIVERSIDADE DO PORTO

A análise qualitativa do contexto português procura aprofundar o entendimento sobre as trajetórias de desenvolvimento tecnológico em hidrogênio nas instituições vinculadas à Universidade do Porto, contemplando as especificidades dos arranjos institucionais diferenciados que caracterizam o sistema português de inovação. Essa etapa foi conduzida a partir de entrevistas semiestruturadas com pesquisadores atuantes nos laboratórios associados (LAQV, LAETA, ALiCE) e nos institutos de interface (INEGI, INESC TEC), seguindo as mesmas três dimensões analíticas estabelecidas: trajetórias tecnológicas, redes de interação e visão de especialistas.

A organização da análise por pesquisador mantém coerência metodológica com a análise brasileira, permitindo identificar padrões e especificidades no desenvolvimento de

diferentes soluções tecnológicas no sistema português. Essa estrutura facilita a compreensão das complementaridades tecnológicas desenvolvidas nas instituições portuguesas, e estabelece bases para possíveis comparações com os desenvolvimentos identificados no contexto da UFMG. Para cada pesquisador, são analisadas, sistematicamente: (i) as trajetórias tecnológicas desenvolvidas, incluindo caracterização técnica, maturidade tecnológica e inserção na cadeia produtiva; (ii) as redes de interação estabelecidas, contemplando parcerias institucionais, estruturas de financiamento e colaborações europeias e internacionais; e (iii) a visão dos especialistas sobre gargalos, potencialidades e perspectivas da economia do hidrogênio no contexto europeu.

ENTREVISTADO 5:

O Entrevistado 5, pesquisador do INEGI com especialização em tecnologias de armazenamento de hidrogênio para aplicações espaciais e industriais, desenvolve trajetória tecnológica caracterizada pela expertise em sistemas criogênicos de alta complexidade e reservatórios de pressão.

Trajetoórias tecnológicas

O pesquisador desenvolve duas linhas tecnológicas complementares, que evidenciam especialização em nichos de mercado específicos. A primeira linha concentra-se em aplicações aeroespaciais: "No espaço, o papel do INEGI   com o transporte de hidrogênio líquido, ok? Portanto, a temperaturas muito, muito baixas, 20 Kelvin, menos de 20 Kelvin, ou 23, ou o que quer, para lançadores, para aplicações espaciais."

A segunda linha desenvolve reservatórios industriais para aplicações comerciais: "A tecnologia de reservatórios para pressão intermédia, 450 barras de termos que são feitos na fábrica aqui, não. É um financiamento direto da indústria." Essa diversificação estratégica permite aproveitar competências desenvolvidas em aplicações espaciais para mercados industriais convencionais, evidenciando capacidade de transferência tecnológica entre setores. O pesquisador caracteriza a maturidade tecnológica dos desenvolvimentos: "os nossos tanques têm TRL 5-6, na escala de, ou seja, precisam de ser testados e integrados no resto dos sistemas". Essa maturidade intermediária evidencia proximidade com aplicações comerciais.

A diferenciação competitiva fundamenta-se em capacidades técnicas específicas: "os materiais necessários, há muito poucos fabricantes mundiais de materiais desse tipo. E, portanto, há gargalos de material, há gargalos de tecnologias de produção a nível industrial". Essa escassez de fornecedores especializados cria oportunidades para desenvolvimento de

capacidades nacionais, em segmentos estratégicos da cadeia produtiva. As tecnologias desenvolvidas inserem-se prioritariamente no armazenamento. A orientação setorial abrange desde aplicações aeroespaciais até equipamentos industriais convencionais, evidenciando uma versatilidade tecnológica que permite explorar múltiplos mercados com competências complementares.

Redes de interação

A estrutura de financiamento caracteriza-se pela predominância de recursos industriais diretos: "A tecnologia de reservatórios para pressão intermédia, 450 barras de termos que são feitos na fábrica aqui, não. É um financiamento direto da indústria". A orientação comercial explícita é caracterizada: "Nós não fazemos investigação por investigação, quer dizer, ou pelo menos não é uma parte que seja pública do que nós fazemos". Essa perspectiva pragmática reflete características específicas dos institutos de interface, concebidos para desenvolver tecnologias com aplicação comercial direta e viabilidade econômica demonstrada.

As colaborações internacionais são estruturadas: "Há laboratórios internacionais com que nós trabalhamos na parte dos revestimentos, há sim, há uma série de colaborações muito vastas que existem". A inserção em redes europeias de desenvolvimento tecnológico facilita acesso a competências complementares e mercados especializados.

Visão de especialistas

O pesquisador estabelece perspectiva histórica sobre o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio: "E o que aconteceu foi que, mais ou menos, diria, por volta de 2008 ou 2009, houve um vale da morte, não é? Houve ali, de facto, uma redução grande do entusiasmo, digamos assim, internacional das tecnologias de hidrogênio". O ressurgimento é contextualizado: "A economia do hidrogênio, depois, portanto, por volta de 2015, 2016, começa a ter algum impulso novo".

Essa perspectiva reconhece padrões cíclicos no desenvolvimento tecnológico, indo além de visões lineares de progresso para incorporar dinâmicas complexas de mercado e políticas públicas que influenciam trajetórias de inovação. As aplicações prioritárias são identificadas: "a minha impressão é que o hidrogênio é um vetor verdadeiramente interessante para duas coisas. A parte dos transportes de dados é interessante, mas fundamentalmente a substituição da petroquímica". Essa avaliação estratégica reconhece limitações de aplicabilidade universal do hidrogênio, priorizando setores em que possam ser oferecidas vantagens competitivas específicas.

O pesquisador caracteriza desenvolvimentos como incrementais: "Mas o que eu quero dizer é, é incremental, tudo isto é incremental. Sim. Onde é que há alguma disrupção? Há uma disrupção ao nível do produto, mas tecnologicamente não é disruptivo". Essa perspectiva evidencia compreensão de que disrupção pode ocorrer através de aplicações inovadoras de tecnologias estabelecidas, transcendendo definições puramente técnicas de inovação.

ENTREVISTADOS 6 E 7

Os Entrevistados 6 e 7, pesquisadores do INEGI, trabalhando colaborativamente no desenvolvimento de ferramentas sistêmicas de gestão energética, representam especialização em integração de sistemas que transcende componentes isolados para abordar coordenação entre produção de hidrogênio, fontes renováveis e demanda energética.

Trajetórias tecnológicas

Os pesquisadores desenvolvem ferramentas de gestão: "Nós estamos a desenvolver ferramentas. A primeira é perceber uma ferramenta que possibilite desenhar a central de produção de hidrogênio e os elementos que fazem parte dela, os compressores, o recurso de base renovável, e ajustar isso a uma procura". A integração operacional é detalhada: "eu posso planejar a minha produção de hidrogênio em função de quanto renovável eu vou ter nos próximos 10 dias, nos próximos 6 dias, e ajustar, por exemplo, em alguns casos, a venda de energia e o armazenamento dela em forma de energia elétrica de baterias ou mesmo na forma de hidrogênio". Essa capacidade de otimização temporal representa uma inovação em gestão energética que pode viabilizar economicamente sistemas baseados em fontes intermitentes.

As ferramentas desenvolvidas caracterizam-se como desenvolvimentos conceituais direcionados a aplicações específicas. Os desenvolvimentos inserem-se transversalmente na cadeia produtiva, abordando simultaneamente produção, armazenamento e gestão de demanda. Essa visão sistêmica vai além das especializações funcionais tradicionais, para cultivar habilidades de coordenação que podem ser cruciais para a viabilidade comercial de sistemas fundamentados no hidrogênio.

Redes de interação

O financiamento estrutura-se através de agenda mobilizadora empresarial: "O primeiro que eu falo aqui é a agenda Movement Neutrality, que a entidade líder é a Galp". Essa configuração evidencia liderança empresarial em iniciativas de desenvolvimento tecnológico,

com universidades assumindo função de desenvolvimento de capacidades específicas, dentro de estratégias corporativas mais amplas.

As parcerias com empresas do setor energético são estruturadas: "nós fomos contratados também, isso já encerrou, mas é o procurador da rede de gás natural aqui da região norte, para estudar as adaptações da rede como um todo". Essa colaboração evidencia interesse específico do setor de utilities em adaptação de infraestruturas existentes para integração de hidrogênio.

Visão de especialistas

Os pesquisadores articulam análise temporal que contextualiza desenvolvimento atual: "A gente pode dizer que o armazenamento de energias renováveis é natural que essa base industrial venha a existir em 2000, pronto. Só que não havia sequer energias renováveis suficientes para tornar isto uma discussão". Essa perspectiva evidencia compreensão de que a viabilização do hidrogênio depende de maturidade prévia de infraestruturas de energia renovável.

ENTREVISTADO 8

O Entrevistado 8, pesquisador do Laboratório Alice especializado em desenvolvimento de dispositivos eletroquímicos, representa trajetória caracterizada por orientação direcionada a demandas industriais específicas e diversificação de aplicações. Essa abordagem evidencia capacidade de adaptar competências eletroquímicas consolidadas para desenvolvimento de soluções customizadas que atendem a necessidades comerciais específicas.

Trajetórias tecnológicas

O pesquisador desenvolve eletrolisadores mediante demanda industrial específica: "Temos um projeto com uma empresa, que eu não posso dizer o nome devido à confidencialidade, mas que nos pediu para desenvolver um eletrolisador do tipo PEM, Proton Exchange Membrane. Ou seja, é uma empresa que compra os eletrolisadores a um fabricante, mas quer neste momento ter a própria produção dos eletrolisadores". Essa configuração evidencia maturidade do mercado português de hidrogênio, no qual empresas demandam desenvolvimento de capacidades internas de produção.

A maturidade tecnológica é avançada: "Neste momento este projeto está na fase final, já desenvolvemos o eletrolisador e está na fase de testes de durabilidade". Essa proximidade

com a implementação comercial evidencia capacidade de desenvolver protótipos funcionais que atendem a especificações industriais rigorosas.

A diversificação inclui aplicações em mobilidade: "Estamos a construir uma pilha de combustível para um drone. Ou seja, eles têm o drone alimentado a baterias, mas não têm muita autonomia e o objetivo dele é aumentar a autonomia". A vantagem específica é quantificada: "Qual é a vantagem da pilha de combustível para o drone? É que enquanto houver combustível ela está sempre a funcionar. Não é que uma bateria, a dada altura, perde carga, não é?"

Os desenvolvimentos concentram-se nos segmentos de produção (eletrolisadores) e armazenamento (células de combustível), evidenciando especialização em tecnologias eletroquímicas que podem ser adaptadas para múltiplos usos. A orientação tecnológica prioriza soluções PEM, devido à maturidade comercial, embora explore alternativas: "A outra tecnologia que eu falei, que é a EM, tem potencial de usar materiais menos nobres, ou seja, mais baratos. Tem potencial de vir a ser uma tecnologia mais competitiva".

Redes de interação

O financiamento caracteriza-se pela predominância de recursos empresariais: "Neste projeto tem empresa, é só da empresa". Essa configuração evidencia reconhecimento comercial das competências desenvolvidas e viabilidade económica dos projetos. A complementaridade com financiamento público é mantida: "Já tivemos projetos com..., temos sempre alguma fonte de financiamento associado". As colaborações internacionais são estruturadas: "Depois temos também dois projetos com Espanha que é um financiamento europeu." Essa inserção em programas de cooperação ibérica evidencia aproveitamento de complementaridades regionais e acesso a mercados expandidos.

Visão de especialistas

O pesquisador articula análise detalhada dos constrangimentos económicos: "É, o que eu digo, a tecnologia PEM, principalmente, está bastante desenvolvida. A única questão aqui tem a ver com o custo, porque esta tecnologia usa metais novos, usa platina, são materiais muito caros e que não há também, assim, tanta mudança quanto isso".

Gargalos específicos de transporte emergem: "O hidrogénio é difícil de transportar e vai se gastar muito dinheiro e muita energia nesse processo". Limitações operacionais são identificadas: "Depois temos outra questão, que é, por exemplo, nos eletrolisadores. Nós usamos água ultrapura. O ideal será usar, por exemplo, a água do mar".

A visão sistêmica é articulada: "Eu acho que o hidrogênio vai ser bastante importante nesta transição energética. O que eu acho é que não pode ser só o hidrogênio, têm que coexistir várias tecnologias associadas". A aplicação específica é detalhada: "O hidrogênio será muito bom, no meu ponto de vista, para usar o excesso de energias renováveis". O uso local é priorizado: "eu acho que o hidrogênio é muito importante, mas o ideal é ele ser produzido e consumido localmente".

ENTREVISTADO 9

O Entrevistado 9, pesquisador do INESC TEC especializado em integração de hidrogênio com sistemas elétricos, desenvolve trajetória caracterizada pela investigação de aplicações sistêmicas que transcendem usos energéticos convencionais, para abordar serviços auxiliares aos sistemas elétricos. Essa especialização representa fronteira tecnológica que pode viabilizar economicamente sistemas baseados em hidrogênio, mediante geração de receitas complementares.

Trajetórias tecnológicas

O pesquisador desenvolve soluções para limitações de sistemas energéticos baseados em renováveis: "trabalhamos o hidrogênio como forma de suporte à operação do sistema elétrico, numa perspectiva de disponibilizar uma capacidade de armazenamento sazonal de energia elétrica, transferindo energia elétrica de períodos de maior abundância de recurso renovável para períodos de maior escassez". A utilização de eletrolisadores como cargas flexíveis representa inovação sistêmica: "A outra área, onde eu trabalho também no tema do hidrogênio, é na utilização dos eletrolisadores para fornecer serviços de balanço ao sistema elétrico".

O desenvolvimento situa-se em estágio inicial: "em particular o do fornecimento de serviços do balanço, serviços do sistema. Até estará mais baixo, TRL 2 ou até 1. Mas não, eu diria 2, 2, 3". O potencial econômico é quantificado: "estamos a falar de cash flows que podem envolver centenas de milhares de euros por ano, num país como Portugal. Relativamente à questão dos serviços do sistema, estamos também a falar de cash flows para uma empresa que desenvolva e utilize essa tecnologia, tem algumas dezenas de milhões de euros por ano".

Os desenvolvimentos inserem-se transversalmente, abordando simultaneamente produção (eletrolisadores), armazenamento (sazonal) e aplicações (serviços de rede).

Redes de interação

O financiamento estrutura-se através de projetos europeus de grande dimensão: "Este é um projeto de 30 milhões de euros. Eu diria que 75% do projeto é para a indústria". A participação empresarial é estruturante: "A própria EDP tem uma componente de investigação no projeto".

A coordenação de projetos internacionais evidencia reconhecimento das competências: "Todos os projetos europeus têm que ter participação de outras instituições europeias. Portanto, Portugal tem... Por acaso, temos uma participação muito forte no projeto." Essa liderança em consórcios internacionais demonstra capacidades de coordenação que transcendem competências técnicas isoladas.

Visão de especialistas

O pesquisador identifica limitação fundamental: "O gargalo técnico que existe é a falta de maturidade industrial. Não estou a falar de maturidade tecnológica, mas a falta de maturidade industrial dos projetos de grande dimensão". A escala necessária é quantificada: "Quando estou a falar de escala industrial, estou a falar de projetos na casa dos gigawatt".

A viabilidade econômica é avaliada a partir de benefícios operacionais: "Não tanto na identificação de custos de investimento, mas em termos da avaliação dos benefícios, dos proveitos que se podem obter de funcionar desta forma". Essa perspectiva evidencia compreensão de que a viabilização do hidrogénio pode depender de múltiplas fontes de receita, que transcendem a venda de energia.

ENTREVISTADO 10

Entrevistado 10, professor da FEUP com trajetória histórica no desenvolvimento do hidrogénio em Portugal, representa especialização em aplicações off-grid e setores específicos, como o marítimo. Essa trajetória evidencia desenvolvimento de nichos de mercado que podem viabilizar economicamente tecnologias do hidrogénio em contextos em que alternativas convencionais apresentam limitações técnicas.

Trajétórias tecnológicas

O pesquisador apresenta trajetória histórica: "Eu comecei tudo isto em 2002, em Portugal, formou-se um primeiro consórcio, uma reunião de pessoas que achavam... em 2002 ainda o hidrogénio estava muito... não se falava no hidrogénio". Sua especialização concentra-se em aplicações off-grid: "células de combustível, eletrolisadores e sistemas de produção de

hidrogênio e armazenamento, off-grid, quer dizer, não ligados à rede, com muito potencial para aplicação em barcos no setor marítimo".

A inovação distintiva reside no desenvolvimento de produção química in-situ: "em que se usa um sal, dito em palavras muito simples, um sal, não é sal das cozinhas, mas é um sal, em que se pode fabricar o hidrogênio acrescentando água a esse sal e, mais uma vez, um catalisador que nós já desenvolvemos há algum tempo". Essa abordagem transcende métodos convencionais, para desenvolver soluções adaptadas a contextos específicos.

A maturidade de componentes é diferenciada: "Portanto, as células de combustível já estão no nível 9 e os eletrolisadores também. O sistema que eu estou agora a trabalhar, o tal que eu falei para os barcos, no projeto Gulbenkian, tive precisamente que dizer o TRL do início e o TRL do fim está 5 para chegar a 7". Essa progressão evidencia capacidade de integrar tecnologias maduras em sistemas inovadores.

Redes de interação

O financiamento abrange diferentes fontes: "vou ter um terceiro, muito importante, que vai ser financiado por uma Fundação, de um milhão e meio de euros ligados ao hidrogênio, aplicado a barcos". O financiamento filantrópico representa inovação em modelos de apoio ao desenvolvimento tecnológico.

As colaborações históricas são mantidas: "Portanto, cada projeto europeu, sejam os primeiros em que eu estive, o Atlantic, que é o tal, que tinha parceiros desde Portugal, Espanha, tudo junto ao Atlântico. França, Reino Unido, Irlanda, por aí fora". Essa inserção em redes atlânticas evidencia aproveitamento de complementaridades geográficas e setoriais.

Visão de especialistas

O pesquisador identifica vantagens geológicas específicas: "Em termos, estava a falar no armazenamento, nós temos uma coisa que alguns países não têm, as salt caverns, que são possibilidades geológicas para armazenar grandes quantidades de hidrogênio". O potencial de autossuficiência é reconhecido: "Portugal é um pequeno país, aqui, com muito potencial, e podemos ser um país, também, meus colegas, que eu ouço com muito cuidado quando vou a conferências, analisam Portugal como um país com possibilidade para ficar autónomo do ponto de vista energético".

A perspectiva de exportação é realista: "Nunca seremos um grande exportador de hidrogênio, somos um país pequeno, mas podemos ser autónomos. Nós podemos ter potencial para exportar algum hidrogênio, mas para a Espanha, a França, a Holanda, se for via marítima".

Essa avaliação evidencia compreensão das limitações de escala nacional, dentro de estratégias regionais mais amplas.

Limitações econômicas sistêmicas são reconhecidas: "Qual é o principal problema? É o custo, porque nós temos que baixar muito o custo, quer dos próprios equipamentos, células de combustível e eletrolisadoras, temos que baixar para que o custo de produção por quilo do hidrogênio, no caso da eletrólise, baixe, porque uma das barreiras é o custo de produção".

ENTREVISTADO 11

O Entrevistado 11, pesquisador do Laboratório Alice especializado em desenvolvimento de materiais catalíticos, representa trajetória caracterizada por competências técnicas em desenvolvimento de catalisadores, conjugadas com perspectiva crítica sobre fundamentos conceituais da economia do hidrogênio.

Trajetórias tecnológicas

O pesquisador desenvolve catalisadores: "temos também outro projeto de desenvolvimento de catalisadores para eletrolisadores do tipo IEM, a Neonic Change Membrane. Há dois tipos de eletrolisadores, os PEM, em que a membrana é protônica e passam prótons, e os IEM, em que a membrana é neônica e passam íons". Essa especialização em diferentes tecnologias eletroquímicas evidencia adaptabilidade técnica que permite atender demandas diversificadas.

O desenvolvimento orienta-se para viabilização econômica: "A outra tecnologia que eu falei, tem potencial de usar materiais menos nobres, ou seja, mais baratos. Tem potencial de vir a ser uma tecnologia mais competitiva". Essa perspectiva evidencia compreensão de que avanços técnicos devem ser direcionados para superação de limitações econômicas sistêmicas.

Redes de interação e financiamento

O financiamento baseia-se prioritariamente em recursos públicos: "Eu disse que temos sempre entidades financiadoras, ou é da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, ou só europeus". As parcerias concentram-se em desenvolvimento de materiais: "A parceria com a Espanha, sim. São células de combustível tipo PEM que já estão sendo comercializadas". Essa colaboração evidencia inserção em redes ibéricas de desenvolvimento tecnológico.

Visão de especialistas

O pesquisador expressa ceticismo em relação a premissas fundamentais: "Porque o hidrogênio é um passo intermédio, não é... Quando as pessoas dizem que é um vetor, dizem um ridículo".

ANEXO B – Distribuição de Projetos por Chamada |Pública

A análise quantitativa dos dados teve como objetivo principal mapear sistematicamente o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio no sistema nacional de inovação brasileiro, caracterizando a participação das universidades nos fomentos públicos e posicionando a UFMG nesse contexto. Para tanto, foram analisados dados secundários provenientes de seis diferentes agências de fomento, abrangendo 128 projetos de pesquisa, distribuídos entre 47 instituições brasileiras ao longo do período 2003-2025. Embora não seja o foco principal do estudo, a análise inclui uma comparação entre as agências de financiamento em relação a estratégias de direcionamento, surgimento de projetos a partir de demandas universais, em contraste com chamadas específicas, e contribuições para os segmentos da cadeia produtiva. Isso é relevante para entender o cenário nacional de desenvolvimento do hidrogênio.

Os dados secundários foram categorizados a partir de dimensões analíticas: distribuição temporal dos projetos, caracterização institucional dos executores, segmentação por partes da cadeia produtiva (produção, armazenamento, distribuição e aplicações), rotas tecnológicas específicas, setores de aplicação. Essa categorização permitiu identificar padrões de especialização, lacunas sistêmicas e tendências no desenvolvimento nacional de tecnologias do hidrogênio.

Primeiramente, são descritos e analisados os resultados obtidos do CNPq, seguidos pela análise dos projetos financiados por FINEP, ANP, FAPEMIG e fundações de apoio FUNDEP e FCO. Posteriormente, é apresentada uma análise comparativa entre as agências, evidenciando diferenças nos perfis de financiamento, maturidade tecnológica dos projetos apoiados e orientações setoriais específicas. Por fim, propõe-se uma análise específica do posicionamento da UFMG no cenário nacional, seguida de uma síntese dos principais resultados obtidos, buscando-se dialogar com a literatura sobre sistemas de inovação e desenvolvimento de tecnologias sistêmicas apresentada anteriormente.

CNPQ

Mapeamento de projetos de pesquisa em tecnologias do hidrogênio

Os dados coletados no Painel de Fomento do CNPq, filtrados pelas palavras-chave "hidrogênio" e "H₂", resultaram em 46 projetos ativos. Esses projetos constituem a base para a

compreensão de como as universidades brasileiras estão desenvolvendo pesquisas em tecnologias do hidrogênio, contribuindo para o objetivo específico de mapear e analisar essas tecnologias no contexto brasileiro.

Distribuição por chamadas públicas

O financiamento dos projetos em tecnologias do hidrogênio pelo CNPq ocorre por meio de chamadas públicas, com diferentes níveis de priorização e estratégias de fomento. A Tabela 1 apresenta a distribuição dos projetos por chamada.

Tabela 1 - Distribuição de Projetos por Chamada CNPq

Chamada	Número de Projetos	Percentual
Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2022 (IBH ₂ MCTI)	11	23,9%
Chamada CNPq/MCTI nº 10/2023 – UNIVERSAL	6	13,0%
Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 24/2022– SisH ₂ - MCTI	5	10,9%
Chamada CNPq nº 4/2021 – Bolsas de Produtividade em Pesquisa – PQ	5	10,9%
Chamada CNPq nº 14/2023 – Apoio a projetos internacionais de pesquisa científica, tecnológica e de inovação	5	10,9%
Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2021 – UNIVERSAL	4	8,7%
Chamada CNPq nº 09/2023 – Bolsas de Produtividade em Pesquisa PQ/PQ-Sr	3	6,5%
Outras chamadas	7	15,2%
Total	46	100%

Fonte: elaborado pela autora a partir de dados do CNPq

A Tabela 1 demonstra que a chamada específica "CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2022 – Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em Apoio ao Programa Combustível do Futuro e à Iniciativa Brasileira do Hidrogênio (IBH₂ MCTI)" destaca-se com 11 projetos aprovados, representando quase um quarto do total (23,9%). Em segundo lugar, a "Chamada CNPq/MCTI nº 10/2023 – UNIVERSAL" contribui com seis projetos (13,0%), indicando que mesmo chamadas não específicas para o tema hidrogênio estão contemplando pesquisas nessa área. A chamada "CNPq/MCTI/FNDCT nº 24/2022 – Apoio ao Sistema Brasileiro de Laboratórios de Hidrogênio – SisH₂-MCTI" apresenta cinco projetos (10,9%), o que demonstra investimentos na infraestrutura laboratorial necessária para o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio. Também com cinco projetos cada (10,9%) estão a "Chamada CNPq nº 4/2021 – Bolsas de Produtividade em Pesquisa – PQ" e a "Chamada CNPq nº 14/2023 – Apoio a projetos internacionais de pesquisa científica, tecnológica e de inovação". A primeira demonstra o reconhecimento de pesquisadores com trajetória consolidada na área, enquanto a segunda evidencia esforços para inserção internacional da pesquisa brasileira em hidrogênio. Juntas, as chamadas específicas para hidrogênio (18/2022 e 24/2022) representam 34,8% dos projetos, indicando o desenvolvimento do tema nas políticas de fomento do CNPq.

Distribuição institucional dos projetos

A análise da distribuição institucional dos projetos permite identificar as principais universidades e demais instituições envolvidas em tecnologias do hidrogênio no Brasil, por meio do CNPq. A Tabela 2 apresenta essa distribuição.

Tabela 2 - Distribuição Institucional dos Projetos em Hidrogênio

Instituição	Número de Projetos	Percentual
Universidade Federal de Viçosa (UFV)	5	10,9%
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)	3	6,5%
Universidade Federal da Bahia (UFBA)	2	4,3%
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)	2	4,3%
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)	2	4,3%
Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM)	1	2,2%
Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE)	1	2,2%
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)	1	2,2%
Instituto de Tecnologia e Pesquisa (ITP)	1	2,2%
Instituto Federal do Ceará (IFCE)	1	2,2%
SENAI - Departamento Regional da Bahia	1	2,2%
Universidade de Brasília (UnB)	1	2,2%
Universidade de Caxias do Sul (UCS)	1	2,2%
Universidade de São Paulo (USP)	1	2,2%

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)	1	2,2%
Universidade Estadual do Ceará (UECE)	1	2,2%
Universidade Estadual Paulista (UNESP)	1	2,2%
Universidade Federal de Goiás (UFG)	1	2,2%
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)	1	2,2%
Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM)	1	2,2%
Outras instituições	17	37,0%
Total	46	100%

Fonte: elaborado pela autora a partir de dados do CNPq.

A Tabela 2 mostra que a Universidade Federal de Viçosa (UFV) sobressai com cinco projetos (10,9%), seguida pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), com três projetos (6,5%). A UFV concentra seus projetos em processos biológicos para produção de hidrogênio e tecnologias para captura de CO₂, enquanto o ITA foca em aplicações aeronáuticas e tecnologias de plasma para conversão de biogás em hidrogênio.

Em seguida, com dois projetos cada (4,3%), aparecem a Universidade Federal da Bahia (UFBA), a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A UFBA desenvolve pesquisas em catalisadores para reforma de biogás e processos fotocatalíticos, enquanto a UNIFEI foca no desenvolvimento de um centro de hidrogênio verde e gestão térmica de eletrolisadores. A UFRN trabalha com novos materiais para produção de hidrogênio e captura de CO₂.

Na Tabela 2, verifica-se a ampla distribuição dos projetos entre diferentes instituições: 19 instituições possuem pelo menos um projeto na área, demonstrando uma base relativamente dispersa de pesquisa em hidrogênio no país. Essa distribuição abrange universidades federais,

estaduais, institutos federais, centros de pesquisa e uma entidade do Sistema S (SENAI-BA), indicando diversidade institucional na pesquisa sobre o tema.

A análise regional mostra presença de instituições de todas as regiões do país, com destaque para o Sudeste (39,1% dos projetos) e o Nordeste (26,1%), seguidos pelo Sul (10,9%), o Centro-Oeste (4,3%) e o Norte (2,2%). Essa distribuição geográfica reflete tanto a concentração histórica da pesquisa científica brasileira quanto os esforços recentes de descentralização.

Categorização dos projetos por segmento da cadeia produtiva

A análise dos títulos dos projetos permite categorizá-los conforme sua inserção nos diferentes segmentos da cadeia produtiva do hidrogênio: produção, armazenamento e distribuição, e aplicações.

Tabela 3 - Categorização dos Projetos por Segmento/Aplicações da Cadeia Produtiva

Segmento	Número de Projetos	Percentual
Produção	35	76,1%
Armazenamento e Distribuição	2	4,3%
Aplicações	9	19,6%
Total	46	100%

Fonte: elaborado pela autora a partir de dados do CNPq.

Essa concentração em tecnologias de produção (76,1%) reflete o contexto brasileiro de transição energética, em que predominam tecnologias de hidrogênio já estabelecidas globalmente, mas que requerem adaptações locais.

A baixa representatividade do segmento de armazenamento e distribuição (4,3%) evidencia uma lacuna na cadeia produtiva, considerando que esse segmento é fundamental para a viabilização comercial do hidrogênio. O segmento de aplicações, com 19,6% dos projetos,

ocupa posição intermediária, sugerindo interesse crescente no desenvolvimento de usos finais para o hidrogênio, embora ainda secundário em relação ao foco na produção.

Essa distribuição indica que o Brasil se encontra em estágio inicial de desenvolvimento da economia do hidrogênio, priorizando o estabelecimento de capacidades de produção, sem avançar tanto para os demais elos da cadeia produtiva.

Considerando a predominância de projetos no segmento de produção, é relevante analisar as diferentes rotas tecnológicas contempladas nas pesquisas.

Tabela 4 - Rotas Tecnológicas para Produção de Hidrogênio

Rota Tecnológica	Número de Projetos	Percentual sobre Projetos de Produção	Percentual sobre Total
Eletrólise	11	31,4%	23,9%
Processos Fotocatalíticos	9	25,7%	19,6%
Processos Biológicos	7	20,0%	15,2%
Reforma de Biogás	4	11,4%	8,7%
Outros Processos	4	11,4%	8,7%
Total	35	100%	76,1%

Fonte: elaborado pela autora a partir de dados do CNPq.

A eletrólise, tecnologia madura e comercial, lidera os projetos (31,4%), porém o foco das pesquisas nacionais não está no desenvolvimento da tecnologia básica, mas sim em inovações incrementais para redução de custos e superação de limitações operacionais específicas e de viabilidade econômica.

A reforma de biogás representa 11,4% dos projetos de produção (quatro projetos), evidenciando aproveitamento estratégico de resíduos orgânicos abundantes no contexto brasileiro. Essa rota tecnológica alinha-se com princípios de economia circular, transformando

rejeitos em vetores energéticos e contribuindo simultaneamente para gestão de resíduos e produção de energia.

A categoria "Outros Processos", também com 11,4% (quatro projetos), indica diversificação em rotas menos convencionais, sugerindo busca por alternativas tecnológicas que possam apresentar vantagens específicas no contexto nacional. A soma dos processos fotocatalíticos (25,7%), biológicos (20,0%), reforma de biogás (11,4%) e outros processos (11,4%) representa 68,5% dos projetos de produção, o que indica que as pesquisas subsidiadas pelo CNPq priorizam rotas tecnológicas que aproveitam recursos renováveis abundantes no país – energia solar, biomassa e resíduos orgânicos –, em detrimento da eletrólise convencional.

Essa distribuição tecnológica sugere estratégia nacional direcionada ao aproveitamento de vantagens comparativas brasileiras em recursos naturais, buscando desenvolver rotas de produção de hidrogênio que sejam tanto ambientalmente sustentáveis quanto economicamente competitivas no contexto de abundância de recursos renováveis nacionais.

Análise das tecnologias por setores de aplicação

Os projetos analisados também podem ser categorizados conforme os setores de aplicação das tecnologias desenvolvidas, permitindo compreender como o hidrogênio está sendo posicionado como vetor energético nos diferentes segmentos da economia.

Tabela 5 - Distribuição dos Projetos por Setores de Aplicação

Setor de Aplicação	Número de Projetos	Percentual
Setor Energético	22	47,8%
Setor de Transportes	8	17,4%
Indústria Química	5	10,9%
Tratamento de Efluentes	3	6,5%
Setor Aeronáutico	2	4,3%

Setor Siderúrgico	1	2,2%
Recuperação de Metais	1	2,2%
Múltiplos setores/Não especificado	4	8,7%
Total	46	100%

Fonte: elaborado pela autora a partir de dados do CNPq.

A Tabela 5 demonstra que o setor energético concentra quase metade dos projetos (47,8%). O setor de transportes aparece em segundo lugar, com 17,4% dos projetos. As pesquisas nesse setor focam principalmente em aplicações em motores de combustão interna, estudos sobre combustão de misturas de hidrogênio com outros combustíveis e desenvolvimento de células a combustível para mobilidade. Os projetos para o setor aeronáutico (4,3%), embora também relacionados à mobilidade, foram contabilizados separadamente, devido às suas especificidades técnicas.

A indústria química representa 10,9% dos projetos, principalmente relacionados à produção de hidrogênio como insumo para processos químicos. O tratamento de efluentes aparece em 6,5% dos projetos, representando uma integração interessante entre gestão ambiental e produção energética. Há baixa representatividade do setor siderúrgico, com somente um projeto (2,2%), o que vai ao encontro da demanda do setor, retratada anteriormente.

Análise da integração com renováveis

A integração das tecnologias do hidrogênio com fontes renováveis de energia é um aspecto essencial para o conceito de hidrogênio verde e para a sustentabilidade dos processos desenvolvidos.

Tabela 6 - Integração com Fontes Renováveis de Energia

Fonte Renovável	Número de Projetos	Percentual
Energia Solar	8	17,4%

Energia Eólica	3	6,5%
Biomassa e Resíduos	9	19,6%
Múltiplas fontes	2	4,3%
Não específica/Não aplicável	24	52,2%
Total	46	100%

Fonte: elaborada pela autora a partir de dados do CNPq

A Tabela 6 mostra que 47,8% dos projetos mencionam explicitamente a integração com alguma fonte renovável de energia, o que é positivo, considerando o objetivo de desenvolvimento de hidrogênio verde. A energia solar aparece em 17,4% dos projetos, principalmente associada a processos fotocatalíticos e fotoeletroquímicos para produção direta de hidrogênio. Em menor escala, surge também relacionada à eletrólise.

A energia eólica é mencionada em 6,5% dos projetos, geralmente associada à eletrólise da água. A biomassa e os resíduos orgânicos estão presentes em 19,6% dos projetos, incluindo tanto o uso direto para produção de hidrogênio por processos biológicos quanto a reforma de biogás derivado desses materiais. Essa abordagem alinha-se com princípios de economia circular e aproveitamento de resíduos, representando uma via de produção de hidrogênio com potencial no contexto brasileiro.

Dois projetos (4,3%) mencionam a integração com múltiplas fontes renováveis, adotando uma abordagem mais sistêmica para produção de hidrogênio verde.

Análise temporal e estratégias de fomento

A distribuição temporal dos projetos e a análise das estratégias de fomento permitem compreender a evolução do interesse e dos investimentos em tecnologias do hidrogênio no Brasil. A Tabela 7 apresenta a evolução do número de projetos.

Tabela 7 - Distribuição dos Projetos por Ano de Início

Ano de Início	Número de Projetos	Percentual
2019	2	4,3%
2020	8	17,4%
2021	4	8,7%
2022	20	43,5%
2023	12	26,1%
Total	46	100%

Fonte: elaborada pela autora a partir de dados do CNPq

A Tabela 7 evidencia um crescimento no número de projetos vigentes, a partir de 2021, com um pico em 2022, quando foram iniciados 43,5% dos projetos analisados. Esse crescimento coincide com a publicação do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂) e com a crescente atenção internacional para o tema, no contexto dos compromissos de descarbonização e da busca por alternativas energéticas sustentáveis.

O ano de 2023 também apresenta número elevado de projetos (26,1%), indicando, ainda, um interesse no tema. Os projetos iniciados antes de 2021 representam 21,7% do total. Essa concentração temporal sugere um alinhamento entre as políticas públicas recentes voltadas para a transição energética e os esforços de pesquisa científica e tecnológica.

Considerações sobre os resultados quantitativos

A análise dos dados do CNPq sobre projetos em tecnologias do hidrogênio permite algumas considerações preliminares sobre o cenário brasileiro de pesquisa nessa área. O perfil dos projetos financiados indica uma concentração na etapa de produção de hidrogênio (76,1%), com diversidade de rotas tecnológicas sendo exploradas, incluindo eletrólise, processos fotocatalíticos, métodos biológicos e reforma de biogás. Essa diversificação pode ser positiva,

considerando as diferentes potencialidades regionais do Brasil para a produção de hidrogênio por diversas fontes.

Existe uma lacuna em pesquisas sobre armazenamento e distribuição (apenas 4,3% dos projetos), que seriam relevantes para viabilizar a economia do hidrogênio. Essa escassez pode representar um gargalo futuro para o desenvolvimento de toda a cadeia produtiva, sugerindo a necessidade de chamadas específicas para essas áreas.

A integração com fontes renováveis está presente em parte significativa dos projetos (47,8%, considerando energia solar, eólica e biomassa), alinhando-se com o conceito de hidrogênio verde e com as potencialidades brasileiras em energia renovável. No entanto, o número de projetos integrando energia eólica (6,5%) é baixo, considerando o potencial dessa fonte no Brasil.

A diversidade institucional – 19 diferentes organizações desenvolvendo projetos na área – indica uma base de pesquisa relativamente distribuída no território nacional, embora com concentrações regionais. As universidades federais predominam, mas há participação de outros tipos de instituições, como institutos de pesquisa e entidades do Sistema S.

O crescimento no número de projetos a partir de 2021, com pico em 2022 (43,5%), sugere um alinhamento recente entre políticas públicas e projetos de pesquisa, em articulação com o contexto internacional de busca por descarbonização e o potencial brasileiro para produção de hidrogênio verde.

Análise dos projetos relacionados ao hidrogênio financiados pela FINEP

A Tabela 8 apresenta 26 projetos relacionados ao hidrogênio financiados pela FINEP entre 2003 e 2025, com valores totais que somam aproximadamente R\$ 96,7 milhões. Os projetos estão divididos em duas categorias temporais: 16 projetos mais recentes (2022-2025), todos na situação "ADIMPLENTE" e com instrumento "TRANSFERÊNCIA LEGAL", e 10 projetos mais antigos (2003-2017), majoritariamente na situação "CONCLUÍDO" e com instrumento "CONVÊNIO".

Os convenientes incluem fundações de apoio a universidades, empresas privadas e instituições de pesquisa. O concedente de todos os projetos é o FNDCT, operacionalizado pela FINEP.

Tabela 8 - Projetos Relacionados ao Hidrogênio Financiados pela FINEP

Situação	Tipo de Instrumento	Objeto Resumido	Concedente	Conveniente	Vigência	Valor Celebrado (R\$)
ADIMPL ENTE	TRANSFERÊNCIA LEGAL	Desenvolvimento de sistemas fotoquímicos e fotoeletroquímicos baseado em semicondutores para produção de hidrogênio	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	FUNDACÃO DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	13/04/2022 a 13/04/2026	1.975.393,94
ADIMPL ENTE	TRANSFERÊNCIA LEGAL	Materiais avançados com elevados teores de nióbio para aplicações em produção, armazenamento, transporte e conversão de energia	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	FUNDACÃO DE APOIO INST AO DESENV CIENT E TECNOLÓGICO	20/04/2022 a 20/04/2026	1.780.541,59

ADIMPL ENTE	TRANSFÊR ÊNCIA LEGAL	Materiais multifuncionais para a geração de combustíveis renováveis (biocombustíveis e hidrogênio)	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	FUNDACÃO DE APOIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RGS	27/04/2022 a 27/04/2026	1.596.000,00
ADIMPL ENTE	TRANSFERÊNCIA LEGAL	Laboratório de materiais e fábrica de hidrogênio da UFBA	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	FUNDACÃO DE APOIO A PESQUISA E A EXTENSÃO	07/10/2022 a 07/10/2025	4.824.680,25
ADIMPL ENTE	TRANSFERÊNCIA LEGAL	Novas tecnologias laboratoriais para sistema propulsivo a hidrogênio e para caracterização de sistemas de comunicação de novas gerações	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	FUNDACÃO CASIMIRO MONTENEGRO FILHO	14/10/2022 a 14/04/2025	4.993.208,16

ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	Aeronave cargueira remotament e pilotada a propulsão por energia limpa baseada em hidrogênio	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL OGICO	AKAER ENGENHARI A S.A.	02/05/ 2023 a 02/05/ 2026	9.859.80 1,04
ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	ACS (MOYA): Desenvolvi mento de aeronave remotament e pilotada classe 1 para transformar radicalment e o transporte de carga e a logística de precisão (propulsão elétrica ou híbrida elétrico- hidrogênio)	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	ACS INDÚSTRIA AERONÁUTI CA S.A.	06/07/ 2023 a 06/07/ 2026	9.765.95 0,00

ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	Hidrogênio renovável a partir da reforma a seco do biogás proveniente do tratamento de esgoto doméstico como energético para eletromobilidade	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ SANEPAR	23/10/2023 a 23/10/2026	6.223.819,24
ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	Protótipo de tanque de hidreto metálico para armazenamento veicular de hidrogênio no estado sólido	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	TUPY S/A	23/11/2023 a 23/11/2027	1.209.782,17

ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	Desenvolvi mento de vasos de pressão em materiais compósitos para armazenam ento de hidrogênio sustentável aplicado ao setor de mobilidade	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	FORZA COMPOSITES TECNOLOGI A EM MATERIAIS COMPOSITOS LTDA	08/12/ 2023 a 08/12/ 2026	2.499.33 8,90
ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	Desenvolvi mento de eletrolisado res de água por meio alcalino para a produção de hidrogênio a partir de eletricidade de fontes renováveis	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	CLARK TECNOLOGI A QUÍMICA, INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.	16/10/ 2024 a 16/10/ 2027	6.650.00 0,00

ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	Desenvolvi mento de um eletrolisado r de alta eficiência para produção de hidrogênio com controle e automação embarcados	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	WEG EQUIPAMEN TOS ELÉTRICOS S/A	06/11/ 2024 a 06/11/ 2027	11.231.0 00,01
ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	Desenvolvi mento e validação de um sistema de gestão de energias renováveis para produção de hidrogênio verde	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	ARGO SOLUCÕES TECNOLÓGI CAS LTDA	06/12/ 2024 a 06/06/ 2026	5.583.41 1,02

ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	Unidade transportável modular de produção e armazenamento de H ₂ verde e geração de energia elétrica para cargas críticas ou sob demanda	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	STW SOLUCÕES EM AUTOMAÇÃO LTDA	14/03/ 2025 a 14/03/ 2028	10.394.8 75,36
ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	HUB de mobilidade sustentável: primeira estação inteligente de compartilhamento de bicicletas elétricas e de hidrogênio verde no Brasil para micromobil	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	BIKE FÁCIL SOLUÇÕES DE MOBILIDADE URBANA LTDA	14/03/ 2025 a 14/03/ 2027	9.134.59 1,92

		idade urbana				
ADIMPL ENTE	TRANSFER ÊNCIA LEGAL	Impacto zero: transformando o futuro com tecnologia de hidrogênio sustentável	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	HIDRO INDUSTRIAL LTDA	21/03/2025 a 21/03/2028	7.581.691,05

A tabela continua com projetos mais antigos:

Número	Situação	Tipo de Instrumento	Objeto Resumido	Concedente	Conveniente	Vigência	Valor Celebrado (R\$)
--------	----------	---------------------	-----------------	------------	-------------	----------	-----------------------

4800 97	CONCL UÍDO	CONVÊNI O	Desenvol vimento de material adsorvent e a partir do rejeito de carvão mineral através da oxidação com peróxido de hidrogêni o	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	FUNDAÇÃO DE ENSINO E ENGENHARI A DE SANTA CATARINA	02/05/ 2003 a 02/08/ 2005	209.50 8,46
5659 25	CONCL UÍDO	CONVÊNI O	Verificaçã o dos estágios de pesquisa, desenvolv imento e aplicações nas áreas de hidrogêni o e células a combustív el	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	FUNDAÇÃO DE DESENVOL VIMENTO DA UNICAMP FUNCAMP	15/08/ 2006 a 15/02/ 2007	20.011, 24

5766 07	CONCLUÍDO	CONVÊNIO	Estudo de diferentes rotas de produção de hidrogênio e montagem de unidades-piloto para produção a partir do etanol e do gás natural	FUNDO NAC.DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	FUNDAÇÃO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO DA COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA - FACC	19/12/2006 a 19/10/2012	4.987.131,92
5799 38	CONCLUÍDO	CONVÊNIO	Estudo de processos de pirólise e processamento de gás natural com plasma térmico para produção de	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	FUNDAÇÃO ESPÍRITO SANTENSE DE TECNOLOGIA - FEST	20/12/2006 a 20/06/2010	524.814,25

			hidrogênio				
6214 02	CONCLUÍDO	CONVÊNIO	Desenvolvimento de reator de reforma catalítica de metanol para produção de hidrogênio e alimentação de célula a combustível	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO	28/12/2007 a 28/12/2011	382.126,48

6316 52	ADIMPLENTE	CONVÊNIO	Instalação de infraestrutura para testes de longa duração com fornecimento de hidrogênio e oxigênio para células a combustível	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	INSTITUTO UNIEMP	14/08/2008 a 14/03/2014	350.000,00
6641 57	CONCLUÍDO	CONVÊNIO	Desenvolvimento de procedimentos de soldagem de componentes submarinos visando resistência à corrosão e mínima fragilização	FUNDO NAC.DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	FUNDAÇÃO DE APOIO À PESQUISA E À EXTENSAO	20/12/2010 a 20/06/2016	829.746,59

			o por hidrogêni o				
6657 26	CONCL UÍDO	CONVÊNI O	Estudo de previsão de demandas , tecnologia de valorizaçã o química para produção de hidrogêni o e gás síntese, desenvolv imento de cilindros não convencio nais para	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	FUNDAÇÃO DE APOIO À PESQUISA E À EXTENSAO	27/12/ 2010 a 27/06/ 2015	931.89 5,00

			uso veicular				
6788 81	CONCL UÍDO	CONVÊNI O	Construçã o e operação de duas plantas- piloto para produção de hidrogêni o para uma célula a combustív el do tipo PEM (reforma de etanol e gás natural)	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOL ÓGICO	FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA APLICAÇÃO S E TECNOLOGI A ESPACIAIS	31/03/ 2014 a 31/03/ 2019	1.205.9 38,56

6896 29	ADIMPLENTE	TRANSFERÊNCIA LEGAL	Infraestrutura de pesquisa em projetos com temáticas prioritárias da instituição (Saúde e Nanociências), desenvolvimento e produção de compostos para aplicações na biomedicina e produção de energia	FUNDO NAC. DE DESENV. CIENT. E TECNOLÓGICO	UNIÃO BRASILEIRA DE EDUCAÇÃO E ASSISTÊNCIA	26/05/2017 a 26/04/2022	996.057,09
------------	------------	---------------------	---	--	--	-------------------------	------------

Distribuição temporal dos projetos

A Tabela 9 mostra uma concentração de projetos no período mais recente (2021-2025), com 61,5% do número total e 89,2% do valor investido. Isso indica um crescimento do interesse e do investimento em tecnologias do hidrogênio nos últimos anos, alinhado às tendências de priorização desse vetor energético no contexto da transição energética.

O período 2003-2010 apresenta 23,1% dos projetos, com valor de R\$ 6.473.592,35, apenas 6,7% do valor total, enquanto o período intermediário (2011-2020) tem a menor

participação, tanto em número de projetos (15,4%) quanto em valor, R\$ 3.963.637,24 (4,1%). Essa distribuição temporal evidencia não apenas o aumento no número de projetos, mas principalmente o crescimento expressivo nos valores médios por projeto nos anos mais recentes.

O período 2021-2025 concentra 16 projetos (61,5% do total) com valor de R\$ 86.304.084,65 (89,2% do valor total), ressaltando um crescimento expressivo tanto em quantidade quanto em volume financeiro dos investimentos.

Tabela 9 - Distribuição Temporal dos Projetos FINEP

Período	Número de Projetos	Percentual	Valor Total (R\$)	Percentual do Valor
2003-2010	6	23,1%	6.473.592,35	6,7%
2011-2020	4	15,4%	3.963.637,24	4,1%
2021-2025	16	61,5%	86.304.084,65	89,2%
Total	26	100,0%	96.741.314,24	100,0%

Fonte: elaborada pela autora a partir de dados da FINEP.

Categorização dos projetos por segmento da cadeia produtiva

Com base nos títulos dos projetos, foi possível categorizá-los segundo sua inserção nos diferentes segmentos da cadeia produtiva do hidrogênio.

A Tabela 10 mostra que o segmento de produção concentra o maior número de projetos (38,5%) e a maior parte dos recursos (40,2%). Os projetos nesse segmento abrangem diversas rotas tecnológicas, incluindo eletrólise, reforma de biogás, processos fotoquímicos e fotoeletroquímicos, pirólise e reforma catalítica.

Tecnologias focadas em aplicações específicas aparece em segundo lugar, com 30,8% dos projetos e 30,8% do valor total investido. Esse segmento inclui projetos de aeronaves com propulsão a hidrogênio, sistemas de mobilidade urbana e células a combustível.

Os segmentos de armazenamento/distribuição e infraestrutura/sistemas têm participação idêntica em número de projetos (15,4% cada), mas apresentam disparidade em termos de valor. Enquanto os projetos de armazenamento/distribuição correspondem a apenas

5,0% do valor total, os de infraestrutura/sistemas representam 24,0% dos recursos. Essa disparidade reflete o maior custo associado à implantação de infraestruturas laboratoriais e sistemas integrados.

Em comparação com as análises anteriores sobre o CNPq, há maior equilíbrio entre os segmentos, maior presença de projetos voltados ao armazenamento/distribuição e à infraestrutura, aspecto que representa uma complementaridade importante no panorama nacional.

Tabela 10 - Categorização dos Projetos por Segmento/Aplicações da Cadeia Produtiva

Segmento	Número de Projetos	Percentual	Valor Total (R\$)	Percentual do Valor
Produção	10	38,5%	38.923.166,53	40,2%
Armazenamento e Distribuição	4	15,4%	4.839.662,66	5,0%
Aplicações	8	30,8%	29.759.591,20	30,8%
Infraestrutura/Sistemas	4	15,4%	23.218.893,85	24,0%
Total	26	100,0%	96.741.314,24	100,0%

Fonte: elaborado pela autora a partir de dados da FINEP.

Análise por setores de aplicação

A análise dos objetivos dos projetos permite identificar os diferentes setores para os quais as tecnologias estão sendo desenvolvidas.

Tabela 11 - Distribuição dos Projetos por Setores de Aplicação

Setor de Aplicação	Número de Projetos	Percentual	Valor Total (R\$)	Percentual do Valor	Exemplos de Projetos
Mobilidade/Transportes	9	34,6%	40.876.279,33	42,3%	Aeronaves remotamente pilotadas; Mobilidade urbana (bicicletas); Eletromobilidade.
Geração de Energia	7	26,9%	30.376.166,80	31,4%	Eletrolisadores; Sistemas de gestão; Unidade transportável.
Infraestrutura de P&D	3	11,5%	10.813.945,50	11,2%	Laboratórios; Infraestrutura para testes.
Indústria Química	3	11,5%	5.793.988,46	6,0%	Produção de gás; Materiais multifuncionais.
Indústria de Materiais	2	7,7%	2.990.083,35	3,1%	Materiais avançados; Material adsorvente.

Petróleo e Gás	1	3,8%	829.746,59	0,9%	Soldagem de componentes submarinos.
Ciência e Tecnologia	1	3,8%	5.061.104,21	5,2%	Estudo de diferentes rotas.
Total	26	100,0%	96.741.314,24	100,0%	-

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 11 demonstra que o setor de mobilidade/transportes concentra o maior número de projetos (34,6%) e a maior parte dos recursos (42,3%). Esse setor inclui desde aeronaves com propulsão a hidrogênio até sistemas de mobilidade urbana com bicicletas elétricas e a hidrogênio.

O setor de geração de energia aparece em segundo lugar, com 26,9% dos projetos e 31,4% do valor total investido. Os projetos nesse setor contemplam principalmente o desenvolvimento de eletrolisadores, sistemas de gestão energética e unidades transportáveis de produção e armazenamento de hidrogênio.

Os setores de infraestrutura de P&D e indústria química possuem o mesmo número de projetos (11,5% cada), porém a infraestrutura recebe quase o dobro dos recursos (11,2% vs. 6,0%). Os demais setores (materiais, petróleo e gás, ciência e tecnologia) têm participação menos expressiva em número de projetos, embora o setor de ciência e tecnologia receba 5,2% dos recursos com apenas um projeto.

Essa distribuição setorial indica priorização do desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio para aplicações em mobilidade e geração de energia, alinhando-se com políticas nacionais e internacionais de descarbonização destes setores, que são grandes emissores de gases de efeito estufa.

Distribuição por Tipo de Convenente

Tabela 12 - Distribuição por Tipo de Convenente

Tipo de Convenente	Número de Projetos	Percentual	Valor Total (R\$)	Percentual do Valor	Exemplos de Convenentes
Fundações de Apoio a Universidades	13	50,0%	18.695.854,84	19,3%	FUNDEP, FAPEX, FUNCAMP, FACC
Empresas	9	34,6%	62.420.639,67	64,5%	WEG, AKAER, TUPY, SANEPAR
Institutos de Pesquisa	4	15,4%	15.624.819,73	16,2%	INSTITUTO UNIEMP, FUNDAÇÃO CASIMIRO MONTENEGRO FILHO
Total	26	100,0%	96.741.314,24	100,0%	-

A Tabela 12 mostra que as fundações de apoio a universidades são os convenentes mais frequentes, com 50,0% dos projetos, embora recebam apenas 19,3% do valor total. Essas fundações atuam como interfaces administrativas para operacionalização de projetos executados por universidades federais e estaduais.

As empresas, por sua vez, são convenentes em 34,6% dos projetos, mas concentram a maior parte dos recursos: 64,5% do valor total. Esse dado é relevante, pois indica o direcionamento de recursos para projetos com participação direta do setor produtivo, voltados à aplicação comercial das inovações.

Os institutos de pesquisa representam 15,4% dos projetos e 16,2% do valor total, ocupando posição intermediária entre as fundações de apoio e as empresas.

Distribuição Regional dos Projetos

Tabela 13 - Distribuição Regional dos Projetos FINEP

Região	Projetos	Percentual	Valor Total (R\$)	Percentual	Exemplos
Sudeste	12	46,2%	22.698.186,15	23,5%	FUNDEP, FUNCAMP, FUNDAÇÃO O CASIMIRO
Sul	6	23,1%	28.441.311,48	29,4%	FUNDAÇÃO DE ENSINO E ENGENHARIA DE SANTA CATARINA, SANEPAR
Nordeste	3	11,5%	6.586.321,84	6,8%	FAPEX
Centro-Oeste	0	0,0%	0,00	0,0%	-
Norte	0	0,0%	0,00	0,0%	-
Nacional	5	19,2%	39.015.494,77	40,3%	Projetos de âmbito nacional
Total	26	100,0%	96.741.314,24	100,0%	-

Fonte: Fonte: elaborado pela autora.

Nota: A classificação regional foi baseada na localização da sede do conveniente, quando identificável.

A Tabela 13 retrata que a região Sudeste concentra o maior número de projetos (46,2%), seguida pela região Sul (23,1%) e pelo Nordeste (11,5%). As regiões Centro-Oeste e Norte não possuem projetos identificados. Há também cinco projetos (19,2%) classificados como "Não identificado/Nacional", que incluem iniciativas de abrangência nacional ou sem localização específica.

Quanto à distribuição de recursos, a região Sul lidera com 29,4% do valor total, seguida pelo Sudeste, com 23,5%, e o Nordeste, com 6,8%. A categoria "Não identificado/Nacional" concentra 40,3% dos recursos, indicando participação de iniciativas de grande porte sem vinculação regional específica.

Essa distribuição regional difere do padrão nacional observado no CNPq, com maior equilíbrio entre as regiões Sul e Sudeste em termos de recursos, embora o Sudeste ainda lidere em número de projetos. A ausência de projetos nas regiões Centro-Oeste e Norte indica lacuna a ser considerada em futuras políticas de fomento.

Análise dos projetos de P&D em hidrogênio financiados pela ANP

Mapeamento dos projetos de pesquisa em tecnologias do hidrogênio

Os dados coletados dos projetos financiados pela ANP, mediante mecanismos de investimento obrigatório em P&D pelas empresas do setor de petróleo e gás, resultaram em 38 projetos ativos relacionados ao hidrogênio. Esses projetos constituem a base para compreender como as empresas do setor estão direcionando investimentos para o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio no Brasil, contribuindo para o objetivo específico de mapear e analisar essas tecnologias no contexto nacional.

Distribuição de projetos por empresas responsáveis

O financiamento dos projetos em tecnologias do hidrogênio pela ANP ocorre via empresas do setor de petróleo e gás que cumprem obrigações legais de investimento em P&D. A Tabela 14 apresenta a distribuição dos projetos por empresa responsável.

Tabela 14 - Distribuição de Projetos por Empresa Responsável

Empresa Responsável	Número de Projetos	Percentual
Shell Brasil	12	31,6%
Petrobrás	10	26,3%
Petrogal Brasil	5	13,2%
Petronas	4	10,5%
ExxonMobil Brasil	3	7,9%
Repsol Sinopec	2	5,3%
TotalEnergies EP	1	2,6%
CNPC Brasil	1	2,6%
Total	38	100%

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 14 demonstra a liderança da Shell Brasil, com 12 projetos (31,6%), seguida pela Petrobrás, com 10 projetos (26,3%). A Petrobrás, como única empresa estatal brasileira, representa 26,3% dos projetos, enquanto as empresas internacionais participam com 73,7% do total de projetos. A Petrogal Brasil, subsidiária portuguesa da Galp, contribui com cinco projetos (13,2%), indicando interesse em tecnologias de hidrogênio. As demais empresas mantêm participação menor, mas diversificada, abrangendo players asiáticos (Petronas, CNPC), americanos (ExxonMobil) e joint ventures (Repsol Sinopec).

Distribuição institucional dos projetos

A análise da distribuição institucional dos projetos permite identificar os principais centros de execução de pesquisa em tecnologias do hidrogênio financiadas pelo setor privado. A Tabela 15 apresenta essa distribuição.

Tabela 15 - Distribuição Institucional dos Projetos em Hidrogênio

Instituição Executora	Número de Projetos	Percentual
USP	8	21,1%
SENAI (diferentes unidades)	7	18,4%
PETROBRÁS	6	15,8%
UFC	3	7,9%
UFSCAR - LIEC	2	5,3%
PUC-RS	2	5,3%
UFRJ	2	5,3%
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)	1	2,6%
CBPF	1	2,6%
IMT	1	2,6%
INT	1	2,6%
UNICAMP	1	2,6%
UFMG/UNIFEI	1	2,6%
Outras	2	5,3%
Total	38	100%

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 15 mostra que a Universidade de São Paulo (USP) se sobressai, com oito projetos (21,1%), concentrados principalmente no Centro de Pesquisa para Inovação em Gás. O SENAI aparece como segunda instituição executora, com sete projetos (18,4%), distribuídos entre suas unidades do Rio de Janeiro, da Bahia e do Rio Grande do Norte. Essa posição destacada do SENAI reflete sua orientação para desenvolvimento tecnológico aplicado e capacidade de execução de projetos industriais.

A Petrobrás, além de empresa financiadora, atua como executora em seis projetos (15,8%), evidenciando estratégia de desenvolvimento interno de capacidades em hidrogênio. Esse modelo híbrido – empresa como financiadora e executora – é único no contexto analisado e reflete a estrutura de P&D da companhia.

Em seguida, com dois projetos cada (5,3%), aparecem a Universidade Federal do Ceará (UFC), a Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A UFC concentra suas pesquisas em armazenamento subterrâneo de hidrogênio. A UFSCAR, por meio do Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica (LIEC), foca em desenvolvimento de materiais eletrônicos avançados.

A análise demonstra diversidade institucional, com 13 diferentes organizações executando projetos, abrangendo universidades federais, estaduais, institutos de pesquisa, sistema SENAI e empresa estatal. Essa distribuição demonstra capacidade nacional instalada para desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio em diferentes níveis de maturidade.

Categorização dos Projetos por Segmento e Aplicações da Cadeia Produtiva

A análise dos objetivos dos projetos permite categorizá-los conforme sua inserção nos diferentes segmentos da cadeia produtiva do hidrogênio.

Tabela 16 - Categorização dos Projetos por Segmento da Cadeia Produtiva

Segmento	Número de Projetos	Percentual
Produção	22	57,9%
Aplicações	10	26,3%
Armazenamento e Distribuição	4	10,5%
Outros	2	5,3%
Total	38	100%

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 3 demonstra concentração de projetos no segmento de produção de hidrogênio (57,9%), padrão consistente com as análises do CNPq e da FINEP. Essa concentração reflete a prioridade atual de estabelecer tecnologias viáveis de geração de hidrogênio, principalmente hidrogênio verde ou de baixo carbono.

As aplicações representam 26,3% dos projetos, proporção superior à observada no CNPq (19,6%), indicando maior interesse empresarial em usos finais do hidrogênio. Os projetos de aplicações incluem células a combustível, uso em transportes, aplicações industriais e integração com refino de petróleo.

O armazenamento e a distribuição conta com quatro projetos (10,5%). A categoria "Outros" (5,3%) inclui projetos específicos, como detecção de vazamentos e validação metrológica, evidenciando preocupação com aspectos de segurança e padronização técnica.

Análise das rotas tecnológicas de produção

Considerando a predominância de projetos no segmento de produção, é relevante analisar as diferentes rotas tecnológicas contempladas nas pesquisas.

Tabela 17 - Rotas Tecnológicas para Produção de Hidrogênio

Rota Tecnológica	Número de Projetos	Percentual sobre Produção	Percentual sobre Total
Eletrólise da Água	9	40,9%	23,7%
Reforma de Etanol	4	18,2%	10,5%
Decomposição de Amônia	2	9,1%	5,3%
Reforma de Metano	2	9,1%	5,3%
Outras Rotas	5	22,7%	13,2%
Total	22	100%	57,9%

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 17 demonstra que a eletrólise da água é a rota tecnológica mais pesquisada, presente em nove projetos (40,9% dos projetos de produção). Essa tecnologia é base para o conceito de hidrogênio verde, permitindo utilizar eletricidade de fontes renováveis para dissociação da água. Os projetos contemplam diferentes tecnologias de eletrólise, incluindo PEM (Proton Exchange Membrane), alcalina e de óxido sólido.

A eletrólise da água representa tecnologia comercialmente estabelecida desde o final do século XIX (Holladay *et al.*, 2009). No entanto, ainda há gargalos quanto à viabilidade econômica do processo. No contexto pesquisado, as tecnologias direcionam-se à integração com recursos renováveis.

A reforma de etanol aparece em segundo lugar, com quatro projetos (18,2%), refletindo o possível aproveitamento de vantagens competitivas brasileiras na produção de etanol. Essa rota é relevante, por utilizar recurso renovável nacional e apresentar menor complexidade logística, comparativamente ao hidrogênio puro.

A decomposição de amônia e a reforma de metano aparecem com dois projetos cada (9,1% cada), demonstrando diversificação das rotas investigadas. A decomposição de amônia é importante, por permitir transporte de hidrogênio na forma de amônia, superando limitações logísticas do hidrogênio gasoso. Outras rotas incluem processos fotocatalíticos, fotoeletroquímicos e tecnologias híbridas, evidenciando exploração de fronteiras tecnológicas

avanzadas.

Análise das tecnologias por setores de aplicação

A investigação dos setores de aplicação revela concentração estratégica, que reflete as prioridades empresariais na implementação das tecnologias do hidrogênio no contexto brasileiro. A Tabela 18 apresenta essa distribuição setorial.

Tabela 18 - Distribuição dos Projetos por Setores de Aplicação

Setor de Aplicação	Número de Projetos	Percentual
Setor Energético	17	44,7%
Setor de Transportes	9	23,7%
Indústria Química	5	13,2%
Setor de Petróleo e Gás	4	10,5%
Setor de Materiais	2	5,3%
Outros	1	2,6%
Total	38	100%

Fonte: elaborado pela autora.

O setor energético concentra a maior proporção dos projetos (44,7%), evidenciando posicionamento do hidrogênio como vetor energético central na estratégia das empresas financiadoras. Os projetos nesse setor abrangem tecnologias de eletrólise da água para produção de hidrogênio verde, produção por energia eólica offshore, reforma de etanol, decomposição de amônia para armazenamento químico e sistemas integrados de produção descentralizada.

O setor de transportes representa 23,7% dos projetos, indicando maior interesse empresarial em aplicações de mobilidade. Os projetos contemplam estações de abastecimento de hidrogênio, aplicações veiculares e de mobilidade urbana, desenvolvimento de células a combustível para transporte, redução de consumo de diesel em motores de combustão interna, e infraestrutura laboratorial móvel para ensaios. Essa ênfase reflete interesse empresarial em

aplicações de mobilidade, setor com potencial de crescimento acelerado e necessidade de descarbonização.

A indústria química representa 13,2% dos projetos, concentrada principalmente em processos catalíticos e desenvolvimento de materiais. Os projetos incluem valorização de correntes de unidades de geração de hidrogênio, uso de catalisadores estruturados para reforma a vapor, modelos preditivos para reformadores industriais e síntese de materiais eletrônicos avançados. Essa participação evidencia interesse em otimização de processos químicos estabelecidos e desenvolvimento de materiais para novas aplicações.

O setor de petróleo e gás conta com 10,5% dos projetos, incluindo aplicações diretas em refino, armazenamento subterrâneo e integração com operações upstream. Os projetos investigam integração de hidrogênio de baixo carbono em refinarias e armazenamento subterrâneo.

O setor de materiais contribui com 5,3% dos projetos, focados em caracterização de interfaces sólido-líquido para aplicações energéticas e desenvolvimento de tecnologias de soldabilidade para dutos de transporte de hidrogênio. Embora minoritário, esse setor aborda aspectos críticos de segurança e infraestrutura necessários para implementação sistêmica do hidrogênio.

Análise da integração com o setor de petróleo e gás

Uma característica distintiva dos projetos ANP é a integração com operações tradicionais do setor de petróleo e gás. A Tabela 19 apresenta essa distribuição.

Tabela 19 - Integração com Operações de Petróleo e Gás

Tipo de Integração	Número de Projetos	Percentual
Refino e Processamento	7	18,4%
Armazenamento Subterrâneo	3	7,9%
Infraestrutura de Transporte	2	5,3%
Aplicações Offshore	2	5,3%
Não Integrado	24	63,2%
Total	38	100%

Fonte: elaborado pela autora.

Os projetos de refino e processamento (18,4%) incluem iniciativas de produção de hidrogênio de baixo carbono em refinarias, valorização de correntes existentes de unidades de geração de hidrogênio, otimização de processos de reforma a vapor e desenvolvimento de tecnologias power-to-X para descarbonização offshore. Essa integração representa estratégia de transição energética que aproveita infraestruturas e conhecimentos existentes.

O armazenamento subterrâneo (7,9%) investiga armazenamento em reservatórios depletados de gás e avaliação técnica de diferentes tecnologias de armazenamento. Essa abordagem permite a utilização de recursos geológicos existentes e conhecimentos consolidados em simulação de reservatórios.

A infraestrutura de transporte (5,3%) contempla adaptação de dutos existentes para transporte de hidrogênio, incluindo estudos de soldabilidade de aços e caracterização de materiais para compatibilidade com hidrogênio. Essa estratégia visa minimizar investimentos em infraestruturas através do reaproveitamento de redes existentes.

As aplicações offshore (5,3%) integram produção de hidrogênio por energia eólica offshore e tecnologias power-to-X acopladas a plataformas petrolíferas. Os dados evidenciam que 36,8% dos projetos ANP apresentam algum tipo de integração com operações tradicionais de petróleo e gás. A estratégia de integração representa modelo de transição energética que pode otimizar recursos disponíveis enquanto desenvolve novas capacidades tecnológicas.

Análise comparativa entre CNPq, FINEP e ANP

A análise comparativa da distribuição institucional entre CNPq, FINEP e ANP retrata modelos diferentes de organização de pesquisa e desenvolvimento em hidrogênio, que refletem as especificidades de cada mecanismo de fomento.

Tabela 20 - Comparação da Distribuição Institucional

Tipo de Instituição	CNPq	FINEP	ANP
Universidades Federais	73,9%	30,8%	45,7%
Institutos de Pesquisa	10,9%	23,1%	11,4%
Sistema SENAI	2,2%	7,7%	20,0%
Empresas	0%	34,6%	17,1%
Outros	13,0%	3,8%	5,8%

Fonte: elaborado pela autora.

O CNPq concentra 73,9% de suas atividades em universidades federais e 10,9% em institutos de pesquisa, cumprindo sua missão de desenvolvimento científico. A FINEP é responsável por 30,8% dos projetos nas universidades federais, Essa posição demonstra a sua função de intermediário entre a pesquisa acadêmica e a aplicação comercial, apoiando projetos em estágios mais avançados de desenvolvimento tecnológico. O Sistema SENAI representa 7,7% dos projetos, uma proporção intermediária entre o CNPq e a ANP, enquanto os outros grupos representam 3,8%.

A ANP tem 57,1% dos projetos executados por instituições científicas (universidades federais 45,7% + institutos de pesquisa 11,4%), porém o financiamento faz parte do mecanismo de P&D obrigatório. A presença SENAI é de 20%. As empresas representam 17,1% dos projetos como executoras, refletindo capacidade de P&D interna das companhias do setor de petróleo e gás. A categoria "Outros" corresponde a 5,8%.

Distribuição por segmentos da cadeia produtiva

A análise dos segmentos da cadeia produtiva retrata padrões das três instituições.

Tabela 21 - Distribuição por Segmentos e Aplicações da Cadeia Produtiva

Segmento/Aplicações	CNPq	FINEP	ANP
Produção	76,1%	38,5%	57,1%
Aplicações	19,6%	30,8%	25,7%
Armazenamento e Distribuição	4,3%	15,4%	11,4%
Infraestrutura/Sistemas	0%	15,4%	5,7%

Fonte: elaborado pela autora.

O CNPq concentra 76,1% de seus projetos na produção de hidrogênio, a maior entre as três instituições, refletindo interesse acadêmico em estabelecer bases científicas para diferentes rotas de geração. Essa concentração é característica de estágios iniciais de desenvolvimento tecnológico. A predominância de projetos de produção evidencia foco em pesquisa sobre diferentes rotas tecnológicas, incluindo eletrólise, processos fotocatalíticos, conversão de biomassa e métodos biológicos.

A FINEP demonstra a menor concentração na produção (38,5%), evidenciando distribuição mais equilibrada entre os segmentos da cadeia produtiva. Essa menor concentração é relevante, já que a viabilização comercial requer desenvolvimento coordenado de toda a cadeia, e não somente de tecnologias de produção.

A ANP apresenta concentração intermediária (57,1%), superior à FINEP, mas inferior ao CNPq, com projetos focados em tecnologias de produção aplicadas a demandas industriais específicas. Essa concentração reflete interesse empresarial em desenvolver tecnologias de produção com orientação para implementação prática, incluindo reformadores industriais, sistemas de eletrólise integrados e tecnologias offshore.

No que tange às aplicações, o CNPq dedica 19,6% dos projetos a aplicações específicas. A ANP destina 25,7% dos projetos a aplicações e a FINEP lidera com 30,8% dos projetos direcionados a aplicações, demonstrando orientação clara para desenvolvimento de produtos e serviços comercializáveis.

Em relação a armazenagem e distribuição, o CNPq destina 4,3% dos projetos a esse segmento. A ANP destina 11,4% dos projetos, enquanto a FINEP lidera com 15,4% dos

projetos.

Em termos de infraestrutura e sistemas integrados, o CNPq não desenvolve projetos nessa área. A ANP destina 5,7% dos seus projetos à infraestrutura, incluindo laboratórios especializados e sistemas integrados para demonstração. A FINEP, por sua vez, dedica 15,4% de seus projetos a esse tema.

Tabela 22 - Distribuição por Setores de Aplicação

Setor de Aplicação	CNPq	FINEP	ANP
Energético	47,8%	26,9%	42,9%
Transportes/Mobilidade	17,4%	34,6%	22,9%
Indústria Química	10,9%	11,2%	14,3%
Infraestrutura	0%	11,2%	11,4%
Offshore/Marítimo	0%	0%	5,7%
Outros	21,7%	16,2%	2,8%

Fonte: elaborado pela autora.

O setor energético representa a maior concentração de projetos no CNPq (47,8%) e na ANP (42,9%), mas apresenta menor participação na FINEP (26,9%). A alta concentração no CNPq reflete interesse em integração do hidrogênio com fontes renováveis e sistemas energéticos. A concentração similar na ANP (42,9%) evidencia interesse empresarial em aplicações energéticas, incluindo integração com refinarias e sistemas power-to-X. A menor participação na FINEP (26,9%) retrata a diversificação setorial, priorizando aplicações em transportes e outras áreas com maior proximidade comercial.

A área de Transportes e Mobilidade é representada pelo CNPq (17,4%), pela ANP (22,9%) e pela FINEP (34,6%). A indústria química mantém participação relativamente estável entre os programas: CNPq (10,9%), FINEP (11,2%) e ANP (14,3%).

Investimento em infraestrutura aparece na FINEP e na ANP (11,2% e 11,4%, respectivamente). Aplicações offshore aparecem exclusivamente na ANP (5,7%), refletindo especificidades do setor de petróleo e gás. Essa especialização inclui produção de hidrogênio

em plataformas marítimas e tecnologias power-to-X offshore, demonstrando como diferentes mecanismos de fomento desenvolvem nichos tecnológicos específicos, baseados em suas vocações setoriais.

A categoria "Outros" apresenta comportamento inverso: CNPq (21,7%), FINEP (16,2%) e ANP (2,8%). A alta participação no CNPq reflete diversidade de aplicações exploratórias sem foco setorial específico. A redução progressiva na FINEP e na ANP evidencia maior especificação setorial, conforme aumenta a orientação comercial dos programas.

Rotas tecnológicas de produção

A análise considera as rotas tecnológicas especificamente mencionadas nos títulos e nos objetivos dos projetos de produção de hidrogênio.

Tabela 23 - Rotas Tecnológicas de Produção por Programa

Rota Tecnológica	CNPq	FINEP	ANP	Projetos Representativos
Eletrólise	31,4%	50,0%	40,0%	Eletrolisadores, sistemas PEM.
Reforma (Etanol/Metano)	11,4%	20,0%	30,0%	Reformadores, conversão combustíveis.
Processos Fotocatalíticos	25,7%	10,0%	10,0%	Water splitting, semicondutores.
Processos Biológicos	20,0%	20,0%	5,0%	Biomassa, fermentação.
Decomposição de Amônia	0%	0%	10,0%	Liberação H ₂ de NH ₃ .
Outras Rotas	11,4%	0%	5,0%	Diversas tecnologias.

Fonte: elaborado pela autora.

A eletrólise apresenta concentração crescente: CNPq (31,4%), ANP (40,0%), e FINEP (50,0%). O CNPq dedica 31,4% dos projetos de produção à eletrólise. A reforma de etanol e metano apresenta distribuição que reflete aproveitamento de vantagens competitivas: CNPq (11,4%), FINEP (20,0%), e ANP (30,0%).

A rota referente aos processos fotocatalíticos apresenta comportamento inverso: CNPq (25,7%), FINEP e ANP (10,0% cada). A concentração idêntica e menor na FINEP e na ANP (10,0%) pode evidenciar reconhecimento empresarial de que esses processos ainda não possuem viabilidade comercial imediata, permanecendo em estágios de pesquisa iniciais.

Os processos biológicos mantêm participação idêntica no CNPq e na FINEP (20,0% cada), mas menor na ANP (5,0%).

Análise Temporal: Evolução dos Projetos

Tabela 24 - Evolução Temporal dos Projetos por Agência

Período	CNPq	FINEP	ANP
2017-2020	21,7%	38,5%	28,6%
2021-2022	52,2%	23,1%	40,0%
2023-2025	26,1%	38,5%	31,4%

Fonte: elaborada pela autora.

Período 2017-2020: interesse inicial

O período de 2017 a 2020 mostra a FINEP como responsável por 38,5% dos projetos. A ANP contribui com 28,6%, enquanto o CNPq apresenta 21,7%. Em 2021-22, o CNPq tem 52,2% dos projetos concentrados, com editais específicos como a Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2022 para Programa Combustível do Futuro e Sistema Brasileiro de Laboratórios de Hidrogênio. A ANP mantém a participação (40,0%), e a FINEP reduz para 23,1%.

O período recente apresenta um aumento significativo da participação da FINEP na liderança (38,5%), enquanto a ANP mantém uma participação estável (31,4%) e o CNPq reduz para 26,1%.

Análise dos projetos relacionados ao hidrogênio financiados pela FAPEMIG

Caracterização geral dos projetos

A FAPEMIG apoiou 10 projetos relacionados ao hidrogênio entre 2017 e 2024, distribuídos entre seis instituições de ensino superior de Minas Gerais. Os projetos abrangem diferentes aspectos da cadeia produtiva do hidrogênio, desde pesquisa em materiais até aplicações em setores industriais.

Tabela 25 - Projetos Relacionados ao Hidrogênio Financiados pela FAPEMIG

	Título do Projeto	Instituição	Chamada
1	Avaliação dos Efeitos de Parâmetros Microestruturais na Susceptibilidade à Fragilização pelo Hidrogênio	UFU	01/2017
2	Melhoramento do Potencial Energético de Biogás visando Aproveitamento do Hidrogênio	UNIFEI	01/2021
3	Produção de Hidrogênio Molecular a partir da decomposição do ácido fórmico	UFU	01/2021
4	Avaliação teórico-experimental da produção e uso de hidrogênio verde em Minas Gerais	UNIFEI	07/2021
5	Síntese de nanocatalisadores à base de nióbio para produção de hidrogênio combustível	UFV	07/2021
6	Produção de Hidrogênio Molecular para Célula Combustível a partir do ácido fórmico	UFU	10/2023

7	Foto(eletrocatalisadores) para a produção de combustíveis líquidos e hidrogênio verde	UFVJM	01/2024
8	Estudo quali-quantitativo do hidrogênio de dois processos	UNIFEI	01/2024
9	Armazenamento de hidrogênio no estado sólido	UFJF	01/2024
10	Produção do Hidrogênio Verde através da Reforma Catalítica do Etanol	CEFET-MG	01/2024

Fonte: elaborada pela autora.

Distribuição temporal dos projetos

A distribuição não é uniforme, apresentando concentrações em períodos específicos que demonstram tanto o interesse crescente no tema quanto as estratégias de política pública da FAPEMIG. É importante ressaltar que foram realizadas buscas tanto em chamadas específicas que envolviam temáticas sobre hidrogênio quanto em chamadas universais, permitindo verificar o interesse da comunidade científica pelo tema.

Tabela 26 - Distribuição dos Projetos por Chamadas FAPEMIG

Chamada	Ano	Projetos	Percentual
Chamada FAPEMIG 01/2017 – Demanda Universal	2017	1	10,0%
Chamada FAPEMIG 01/2021 – Demanda Universal	2021	2	20,0%
Chamada FAPEMIG 07/2021 – Redes de Pesquisa	2021	2	20,0%

Chamada FAPEMIG 12/2022 – Linha Tríplice Hélice	2022	0	0,0%
Chamada FAPEMIG 13/2022 – Linha Empresarial	2022	0	0,0%
Chamada FAPEMIG 10/2023 – Incremento da Maturidade	2023	1	10,0%
Chamada FAPEMIG 01/2024 – Demanda Universal	2024	4	40,0%
Chamada FAPEMIG 07/2024 – Linha Tríplice Hélice	2024	0	0,0%
Chamada FAPEMIG 08/2024 – Compete Minas	2024	0	0,0%
Total	-	10	100,0%

Fonte: elaborada pela autora.

A distribuição temporal mostra que 2021 e 2024 concentram 80% dos projetos aprovados. O ano de 2021 teve quatro projetos distribuídos entre chamadas universais e uma específica, de Redes de Pesquisa. O ano de 2024 apresenta quatro projetos, todos aprovados na chamada universal, indicando interesse crescente da comunidade científica, mesmo em editais não específicos para o tema.

Um aspecto relevante é que as chamadas com possibilidades específicas para financiamento em hidrogênio lançadas em 2022 (Linha Tríplice Hélice e Linha Empresarial) e 2024 (Linha Tríplice Hélice e Compete Minas) não resultaram em projetos aprovados, sugerindo possíveis desalinhamentos entre as demandas propostas e as capacidades disponíveis ou interesse limitado do setor produtivo nas modalidades específicas.

Distribuição institucional dos projetos

Tabela 27 - Distribuição por Instituição Executora

Instituição	Projetos	Percentual	Especialização
UNIFEI	3	30,0%	Produção H ₂ verde, processos biológicos
UFU	3	30,0%	Decomposição ácido fórmico, fragilização
UFV	1	10,0%	Nanocatalisadores de nióbio
UFVJM	1	10,0%	Foto(eleto)catalisadores
UFJF	1	10,0%	Armazenamento estado sólido
CEFET-MG	1	10,0%	Reforma catalítica etanol
Total	10	100,0%	

Fonte: elaborada pela autora.

A UNIFEI e a UFU emergem como as principais universidades de pesquisa em hidrogênio no estado, cada uma com três projetos (60% do total). A UNIFEI concentra suas pesquisas em produção de hidrogênio verde por diferentes rotas (eletrólise, processos biológicos) e estudos sistêmicos sobre o potencial estadual. A UFU, por sua vez, desenvolveu especialização em rotas químicas específicas (decomposição de ácido fórmico) e aspectos de segurança de materiais (fragilização por hidrogênio).

As demais instituições apresentam contribuições específicas: a UFV destaca-se pelo projeto de nanocatalisadores de nióbio; a UFVJM desenvolve processos fotocatalíticos; a UFJF foca em armazenamento em estado sólido; e o CEFET-MG trabalha com reforma de etanol.

Análise por Segmento da Cadeia Produtiva

Tabela 28 - Categorização por Cadeia /Aplicações da Cadeia Produtiva

Cadeia Produtiva	Projetos	Percentual
Produção	8	80,0%
Armazenamento	1	10,0%
Aplicações	1	10,0%
Total	10	100,0%

Fonte: elaborada pela autora.

A concentração de 80% dos projetos no segmento de produção de hidrogênio alinha-se com o padrão observado nas instituições nacionais de fomento. Essa distribuição pode refletir o estágio atual de desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio no Brasil, em que o estabelecimento de rotas de produção viáveis e eficientes é prioridade.

Há certa diversidade de rotas de produção, abrangendo desde processos eletroquímicos (eletrólise, fotoeletrólise) até rotas químicas específicas (decomposição de ácido fórmico, reforma de etanol) e processos biológicos (aproveitamento de biogás).

O armazenamento, representado por um projeto (10%), constitui uma lacuna que pode limitar o desenvolvimento futuro da cadeia produtiva. O armazenamento de hidrogênio representa um dos principais gargalos tecnológicos para viabilização comercial, principalmente em aplicações de mobilidade e sistemas energéticos distribuídos.

O segmento de aplicações, também com um projeto (10%), foca especificamente na fragilização de materiais por hidrogênio, voltado à segurança industrial. Essa baixa representatividade sugere oportunidades para expansão futura em direção a aplicações setoriais específicas.

Rotas Tecnológicas de Produção

Tabela 29 - Análise das Rotas de Produção

Rota Tecnológica	Projetos	% sobre Produção	Instituições	Características
Eletrólise	2	25,0%	UNIFEI (2)	H ₂ verde via energia renovável
Processos Fotocatalíticos	1	12,5%	UFVJM	Conversão direta solar
Processos Biológicos/Biogás	1	12,5%	UNIFEI	Aproveitamento de resíduos
Reforma Catalítica	1	12,5%	CEFET-MG	Conversão de etanol
Decomposição Ácido Fórmico	2	25,0%	UFU (2)	Armazenamento químico
Nanocatalisadores	1	12,5%	UFV	Materiais baseados em nióbio
Total	8	100,0%	-	-

Fonte: elaborada pela autora.

A distribuição entre diferentes rotas tecnológicas evidencia uma estratégia de exploração ampla das possibilidades de produção, considerando diferentes recursos.

Análise por setores de aplicação

A categorização dos projetos segundo os setores de aplicação das tecnologias desenvolvidas permite compreender como a pesquisa mineira se articula com as demandas industriais e energéticas identificadas na literatura sobre hidrogênio.

Tabela 30 - Distribuição dos Projetos por Setores de Aplicação

Setor de Aplicação	Projetos	Percentual	Títulos dos Projetos	Instituições
Setor Energético	6	60,0%	Avaliação H ₂ verde MG; Foto(eleto)catalisadores; Estudo quali-quantitativo; Nanocatalisadores nióbio; Armazenamento estado sólido; Reforma etanol	UNIFEI, UFVJM, UNIFEI, UFV, UFJF, CEFET-MG
Indústria Química	2	20,0%	Produção H ₂ via ácido fórmico	UFU (2)
Setor Siderúrgico	1	10,0%	Fragilização por hidrogênio	UFU
Múltiplos/Outros	1	10,0%	Biogás	UNIFEI
Total	10	100,0%	-	-

Fonte: elaborada pela autora.

O setor energético concentra a maior parte dos projetos, o que demonstra o papel central do hidrogênio como vetor energético na transição para uma matriz mais sustentável. Os dois projetos da UFU focados na decomposição de ácido fórmico representam uma abordagem que combina produção e armazenamento de hidrogênio. Essa rota tecnológica tem potencial de aplicação tanto na indústria química, como fonte de hidrogênio para processos industriais, quanto no setor energético, como sistema de armazenamento de energia.

O projeto sobre fragilização de materiais por hidrogênio, por sua vez, aborda uma questão crítica para a aplicação do hidrogênio na siderurgia. A fragilização por hidrogênio afeta a integridade estrutural de aços, embora necessária para o desenvolvimento de materiais compatíveis com ambientes ricos em hidrogênio.

O projeto de melhoria do biogás (UNIFEI) apresenta aplicação transversal, contribuindo tanto para gestão de resíduos quanto para produção de energia. O aproveitamento de biogás

para produção de hidrogênio integra princípios de economia circular, transformando resíduos em vetores energéticos. Essa abordagem é relevante em Minas Gerais, estado com participação importante no setor agropecuário e na geração de resíduos orgânicos.

Mapeamento dos projetos gerenciados pela FUNDEP

A Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (FUNDEP) atua como interface administrativa para viabilizar a execução de projetos com diversas fontes de financiamento. Diferentemente das análises anteriores da FAPEMIG, que se baseavam em chamadas públicas, os dados da FUNDEP baseiam-se em projetos captados por diferentes mecanismos e com diversos financiadores. Essa análise foca nos projetos relacionados ao hidrogênio identificados no portal da transparência da fundação.

Caracterização geral dos projetos

Tabela 31 - Projetos Relacionados ao Hidrogênio Gerenciados pela FUNDEP

Título do Projeto	Período	Financiador	Unidade Executora	Valor (R\$)
Produção de Hidrogênio Induzida por Nanopartículas Semicondutoras de ZNO e TIO ₂	01/08/2015 a 28/02/2018	FAPEMIG	ICEEx-INSTITUTO CIÊNCIAS EXATAS DA UFMG	26.460,00
METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DE ACOS DE ALTA	19/12/2016 a 19/06/2021	EMBRAPII	Instituto Nacional de Tecnologia - INT	450.000,00
Estudo de um Sistema de Adição de Hidrogênio em Motores a Diesel utilizados em Caminhões de Lavra a Céu Aberto	28/07/2022 a 10/02/2025	CSN INOVA S.A	UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP	109.047,90

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 31 apresenta três projetos relacionados ao hidrogênio gerenciados pela FUNDEP entre 2015 e 2025. Os projetos abrangem diferentes períodos de execução, variando de aproximadamente dois anos e meio (projeto de produção de hidrogênio) até quase cinco anos (projeto de aços de alta resistência). O mais antigo iniciou-se em 2015 e o mais recente em 2022, com previsão de conclusão em 2025.

Os valores dos projetos apresentam grande variação, desde R\$ 26.460,00 para o projeto de produção de hidrogênio com nanopartículas até R\$ 450.000,00 para o desenvolvimento de aços de alta resistência. O valor total dos três projetos é de R\$ 585.507,90, com média de R\$ 195.169,30 por projeto.

As unidades executoras incluem o Instituto de Ciências Exatas da UFMG, o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Quanto aos financiadores, estes são diversificados: FAPEMIG, EMBRAPPI e CSN INOVA S.A, demonstrando variedade nas fontes de recursos.

Distribuição temporal dos projetos

Tabela 32 - Distribuição Temporal dos Projetos FUNDEP

Período de Início	Número de Projetos	Percentual	Valor Total (R\$)	Percentual do Valor
2015	1	33,3%	26.460,00	4,5%
2016	1	33,3%	450.000,00	76,9%
2022	1	33,3%	109.047,90	18,6%
Total	3	100,0%	585.507,90	100,0%

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 32 mostra uma distribuição uniforme dos projetos ao longo do tempo, com um projeto iniciado em cada um dos anos 2015, 2016 e 2022. Essa distribuição temporal difere do padrão observado nos dados do CNPq e da FAPEMIG, em que havia concentração de projetos em anos mais recentes.

Distribuição por fonte de financiamento

Tabela 33 - Distribuição por Fonte de Financiamento

Financiador	Número de Projetos	Percentual	Valor Total (R\$)	Percentual do Valor
Empresas (CSN INOVA)	1	33,3%	109.047,90	18,6%
Agências de Fomento (FAPEMIG)	1	33,3%	26.460,00	4,5%
Organismos de Apoio à Inovação (EMBRAPII)	1	33,3%	450.000,00	76,9%
Total	3	100,0%	585.507,90	100,0%

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 33 retrata a distribuição no número de projetos entre as diferentes fontes de financiamento, cada uma com um projeto (33,3%). No entanto, há disparidade nos valores. O projeto financiado pela EMBRAPPII representa 76,9% do valor total. O financiamento empresarial (CSN INOVA) responde por 18,6% dos recursos, enquanto o apoio direto de agência de fomento tradicional (FAPEMIG) representa 4,5% do valor total. Essa distribuição

destaca a importância de mecanismos híbridos de apoio à inovação como a EMBRAPPII nos projetos relacionados ao hidrogênio gerenciados pela FUNDEP.

Categorização dos projetos por segmento da cadeia produtiva

Com base nos títulos dos projetos, é possível categorizá-los segundo sua inserção nos diferentes segmentos da cadeia produtiva do hidrogênio.

Tabela 34 - Categorização dos Projetos por Parte da Cadeia Produtiva

Parte da Cadeia Produtiva	Número de Projetos	Percentual	Títulos dos Projetos	Unidades Executoras
Produção	1	33,3%	"Produção de Hidrogênio Induzida por Nanopartículas Semicondutoras de ZNO e TIO ₂ "	ICEx-UFMG
Aplicações	2	66,7%	"METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA PARA SERVIÇO EM AMBIENTES CONTENDO SULFETO DE HIDROGÊNIO";	INT; UFOP
Armazenamento e Distribuição	0	0,0%	-	-
Total	3	100,0%	-	-

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 34 evidencia uma concentração de projetos em aplicações específicas (66,7%), mas voltados a estudos. Somente um projeto (33,3%) foca na produção de hidrogênio, utilizando nanopartículas semicondutoras. Não há projetos especificamente voltados para

armazenamento e distribuição, segmento que também apresentava baixa representatividade nas análises anteriores.

Entre os projetos de aplicações, destacam-se duas áreas distintas: desenvolvimento de aços resistentes a ambientes contendo sulfeto de hidrogênio e uso de hidrogênio em motores diesel de caminhões de mineração.

Análise por Setores de Aplicação

A análise dos títulos dos projetos permite identificar os diferentes setores para os quais os projetos estão sendo direcionados.

Tabela 35 - Distribuição dos Projetos por Setores de Aplicação

Setor de Aplicação	Número de Projetos	Percentual	Títulos dos Projetos	Unidades Executoras
Setor Energético	1	33,3%	"Produção de Hidrogênio Induzida por Nanopartículas Semicondutoras de ZNO e TIO ₂ "	ICEx-UFMG
Setor de Transportes/Mineração	1	33,3%	"Estudo de um Sistema de Adição de Hidrogênio em Motores a Diesel utilizados em Caminhões de Lavra a Céu Aberto"	UFOP
Indústria Metalúrgica/Materiais	1	33,3%	DESENVOLVIMENTO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA	INT
Total	3	100,0%	-	-

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 35 mostra uma distribuição dos projetos entre três setores de aplicação distintos: energético, transportes/mineração e metalúrgica/materiais, cada um com 33,3% dos projetos. O setor energético está representado pelo projeto de produção de hidrogênio com nanopartículas semicondutoras. O setor de transportes/mineração é contemplado pelo projeto

de adição de hidrogênio em motores diesel para caminhões de mineração. O setor metalúrgico/materiais inclui o projeto de desenvolvimento de aços resistentes a ambientes com sulfeto de hidrogênio.

Distribuição por unidades executoras

Tabela 36 - Distribuição por Unidades Executoras

Unidade Executora	Número de Projetos	Percentual	Valor Total (R\$)	Percentual do Valor
ICEx-UFMG	1	33,3%	26.460,00	4,5%
INT	1	33,3%	450.000,00	76,9%
UFOP	1	33,3%	109.047,90	18,6%
Total	3	100,0%	585.507,90	100,0%

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 36 demonstra a distribuição dos projetos entre as três unidades executoras, cada uma com um projeto (33,3%). O Instituto Nacional de Tecnologia (INT) executa o projeto de maior valor, representando 76,9% do total, focado no desenvolvimento de aços resistentes a ambientes com sulfeto de hidrogênio.

A Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) executa um projeto que corresponde a 18,6% do valor total, direcionado ao uso de hidrogênio em motores diesel. O Instituto de Ciências Exatas da UFMG (ICEx-UFMG) é responsável pelo projeto de menor valor (4,5% do total), focado na produção de hidrogênio. É importante destacar que a UFMG aparece apenas uma vez nos projetos gerenciados pela FUNDEP

Análise dos projetos relacionados ao hidrogênio gerenciados pela FCO

Mapeamento dos Projetos Gerenciados pela FCO

A Fundação Christiano Ottoni (FCO) é uma fundação vinculada à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Similar à FUNDEP, ela atua como interface administrativa para execução de projetos com diversas fontes de financiamento, mas com escopo mais específico, concentrando-se em iniciativas das áreas de engenharia e correlatas.

Caracterização geral dos projetos

Tabela 37 - Projetos Relacionados ao Hidrogênio Gerenciados pela FCO

Título do Projeto	Financiador	Unidade Executora
PROCESSO PARA O USO DOS NANOCATALISADORES GREENPLUS E BIOBOOSTER COM COMBUSTÍVEIS VERDES NO ESTADO GASOSO	Horeb Brasil Energia e Combustíveis Ecológicos.	Departamento de Engenharia Mecânica/Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno - UFMG
PROCESSO PARA O USO DOS NANOCATALISADORES GREENPLUS E BIOBOOSTER COM COMBUSTÍVEIS VERDES NO ESTADO GASOSO	EMBRAPII	Departamento de Engenharia Mecânica/Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno - UFMG
Eficiência energética em motores flex com enriquecimento de hidrogênio obtido por reforma catalítica embarcada	FUNDEP/Instituto Nacional de Tecnologia (INT) dentro do Programa Rota 2030	Departamento de Engenharia Mecânica - UFMG

Desenvolvimento e caracterização de nanocompósitos à base de grafeno para revestimento e caracterização protetivo de amostras de aço de alta resistência contra fragilização por hidrogênio	VALLOUREC SOLUÇÕES TUBULARES DO BRASIL S/A UNIDADE BARREIRO	Departamento de Química/Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno - UFMG
Análise da produção de hidrogênio e uso de pilhas a combustível via eletrólise aplicada ao setor de transporte ferroviário	CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2022 - IBH ₂ MCTI	Departamento de Química - UFMG
Instrutor e consultor para cursos de capacitação para profissionais na área de H ₂ Verde / PtX no Brasil	Programa H ₂ Brasil (MME e GIZ)	Departamento de Química - UFMG
Curso de Extensão: Transição Energética Descarbonização e Novos Mercados	FCO	Departamento de Química - UFMG

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 37 apresenta sete projetos relacionados ao hidrogênio gerenciados pela FCO. Os projetos abrangem diferentes temáticas, desde desenvolvimento de nanocatalisadores para uso com combustíveis verdes até capacitação profissional na área de hidrogênio verde. Nota-se que dois projetos possuem o mesmo título e coordenador, mas financiadores diferentes, sugerindo possível complementaridade ou continuidade.

As unidades executoras concentram-se em dois departamentos principais da UFMG: Departamento de Engenharia Mecânica (três projetos) e Departamento de Química (quatro projetos), com destaque para o Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da UFMG, que participa de três projetos.

As fontes de financiamento incluem empresas (Horeb Brasil, Vallourec), agências de fomento (CNPq), organismos de apoio à inovação (EMBRAPII), programas governamentais (Rota 2030, H₂ Brasil) e recursos da própria fundação.

Categorização dos projetos por tipo de atividade

Tabela 38 - Categorização dos Projetos por Tipo de Atividade

Tipo de Atividade	Número de Projetos	Percentual	Títulos dos Projetos	Unidades Executoras
Pesquisa e Desenvolvimento	4	57,1%	"PROCESSO PARA O USO DOS NANOCATALISADORES GREENPLUS E BIOBOOSTER COM COMBUSTÍVEIS VERDES NO ESTADO GASOSO" (2); "Eficiência energética em motores flex com enriquecimento de hidrogênio obtido por reforma catalítica embarcada"; "Análise da produção de hidrogênio e uso de pilhas a combustível via eletrólise aplicada ao setor de transporte ferroviário"	Eng. Mecânica - UFMG (3); Química - UFMG (1)

Caracterização de Materiais	1	14,3%	"Desenvolvimento e caracterização de nanocompósitos à base de grafeno para revestimento e caracterização protetivo de amostras de aço de alta resistência contra fragilização por hidrogênio"	Química/Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno - UFMG
Capacitação e Extensão	2	28,6%	"Instrutor e consultor para cursos de capacitação para profissionais na área de H ₂ Verde / PtX no Brasil"; "Curso de Extensão: Transição Energética Descarbonização e Novos Mercados"	Química - UFMG (2)
Total	7	100,0%	-	-

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 38 demonstra que a maioria dos projetos (57,1%) é de P&D, focando no desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao hidrogênio. Os projetos de Capacitação e Extensão representam 28,6% do total, indicando atenção à formação de recursos humanos para o setor. Há também um projeto (14,3%) específico para caracterização de materiais, visando solucionar problemas de fragilização por hidrogênio em aços de alta resistência.

Categorização dos Projetos por Segmento da Cadeia Produtiva

Com base nos títulos dos projetos, é possível categorizá-los segundo sua inserção nos diferentes segmentos da cadeia produtiva do hidrogênio.

Tabela 39 - Categorização dos Projetos por Segmento da Cadeia Produtiva

Segmento	Número de Projetos	Percentual	Títulos dos Projetos	Unidades Executoras
Produção	1	14,3%	"Análise da produção de hidrogênio e uso de pilhas a combustível via eletrólise aplicada ao setor de transporte ferroviário"	Química - UFMG
Aplicações	4	57,1%	"PROCESSO PARA O USO DOS NANOCATALISADORES GREENPLUS E BIOBOOSTER COM COMBUSTÍVEIS VERDES NO ESTADO GASOSO" (2); "Eficiência energética em motores flex com enriquecimento de hidrogênio obtido por reforma catalítica embarcada"; "Desenvolvimento e caracterização de nanocompósitos à base de grafeno para revestimento e caracterização protetiva de amostras de aço de alta resistência contra fragilização por hidrogênio"	Eng. Mecânica - UFMG (3); Química - UFMG (1)

Capacitação/Difusão	2	28,6%	"Instrutor e consultor para cursos de capacitação para profissionais na área de H ₂ Verde / PtX no Brasil"; "Curso de Extensão: Transição Energética Descarbonização e Novos Mercados"	Química - UFMG (2)
Total	7	100,0%	-	-

Fonte: elaborada pela autora.

Há concentração no segmento de aplicações (57,1%), similar ao observado na FUNDEP.

Análise por setores de aplicação

A análise dos títulos dos projetos permite identificar os diferentes setores para os quais as tecnologias estão sendo desenvolvidas.

Tabela 40 - Distribuição dos Projetos por Setores de Aplicação

Setor de Aplicação	Número de Projetos	Percentual	Títulos dos Projetos	Unidades Executoras

Setor de Transportes	2	28,6%	"Eficiência energética em motores flex com enriquecimento de hidrogênio obtido por reforma catalítica embarcada"; "Análise da produção de hidrogênio e uso de pilhas a combustível via eletrólise aplicada ao setor de transporte ferroviário"	Eng. Mecânica - UFMG; Química - UFMG
Combustíveis/Energia	2	28,6%	"PROCESSO PARA O USO DOS NANOCATALISADORES GREENPLUS E BIOBOOSTER COM COMBUSTÍVEIS VERDES NO ESTADO GASOSO" (2)	Eng. Mecânica - UFMG (2)
Indústria Metalúrgica/Materiais	1	14,3%	"Desenvolvimento e caracterização de nanocompósitos à base de grafeno para revestimento e caracterização protetivo de amostras de aço de alta resistência contra fragilização por hidrogênio"	Química/Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno - UFMG

Capacitação Profissional	2	28,6%	"Instrutor e consultor para cursos de capacitação para profissionais na área de H ₂ Verde / PtX no Brasil"; "Curso de Extensão: Transição Energética Descarbonização e Novos Mercados"	Química - UFMG (2)
Total	7	100,0%	-	-

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 40 evidencia uma distribuição relativamente equilibrada dos projetos entre diferentes setores de aplicação. O setor de transportes, o setor de combustíveis/energia e a capacitação profissional representam, cada um, 28,6% dos projetos. O setor metalúrgico/materiais conta com um projeto (14,3%), focado na proteção contra fragilização por hidrogênio.

Os projetos voltados ao setor de transportes abordam tanto motores flex quanto aplicações ferroviárias, indicando diversidade nas aplicações de mobilidade. Os projetos de combustíveis/energia focam no uso de nanocatalisadores com combustíveis verdes gasosos. A capacitação profissional (28,6%) também está presente nos projetos da FCO.

Distribuição por fontes de financiamento

Tabela 41 - Distribuição por Fontes de Financiamento

Fonte de Financiamento	Número de Projetos	Percentual
Empresas (Horeb Brasil, Vallourec)	2	28,6%
Agências de Fomento (CNPq)	1	14,3%

Organismos de Apoio à Inovação (EMBRAPII)	1	14,3%
Programas Governamentais (Rota 2030, H ₂ Brasil)	2	28,6%
Recursos Próprios/Fundação	1	14,3%
Total	7	100,0%

Fonte: elaborada pela autora.

A Tabela 41 demonstra um perfil diversificado de fontes de financiamento para os projetos gerenciados pela FCO. O financiamento empresarial e os programas governamentais específicos são as fontes mais frequentes, cada um com 28,6% dos projetos. As agências de fomento tradicionais (CNPq), os organismos de apoio à inovação (EMBRAPII) e os recursos próprios representam cada um 14,3% dos projetos.

Tabela 42 - Tabela Temporal Estimada dos Projetos FCO:

Período Estimado	Número de Projetos	Percentual	Projetos Identificados
2021-2022	4	57,1%	Nanocatalisadores (2), Projeto CNPq/IBH ₂ , Projeto H ₂ Brasil
2022-2023	2	28,6%	Projeto Vallourec, Projeto Rota 2030
2023-2024	1	14,3%	Curso de Extensão
Total	7	100,0%	-

Fonte: elaborada pela autora.

A análise temporal dos projetos da FCO abrange o período 2021-2024, com 57,1% dos projetos iniciados entre 2021-2022, o que está ligado ao lançamento do Programa H₂ Brasil (2021) e ao edital específico CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2022. Um percentual de 28,6% dos

projetos em 2022-2023 tiveram maior participação empresarial (Vallourec, Rota 2030), e 14,3% em 2023-2024 foram focados em capacitação.

O financiamento público e os arranjos institucionais específicos constituem elementos dessa análise, considerando que o desenvolvimento do hidrogênio representa corrida tecnológica mundial em que economias emergentes disputam posicionamento estratégico. A análise organiza-se mediante triangulação metodológica que combina dados quantitativos sobre 128 projetos de pesquisa com investigação qualitativa das trajetórias tecnológicas específicas. Essa estrutura visa contribuir para a compreensão de como universidades em sistemas nacionais de inovação periféricos desenvolvem capacidades de coordenação sistêmica que transcendem modelos convencionais de transferência de tecnologia, assumindo centralidade estratégica em setores tecnológicos emergentes, dialogando com a literatura dominante na área e oferecendo evidências empíricas para expansão conceitual das teorias de inovação e transição tecnológica.