

Work Project apresentado no âmbito do Mestrado Executivo em Innovation and Entrepreneurship - Executive da Nova School of Business and Economics.

BARREIRAS À ADOÇÃO DO HIDROGÉNIO VERDE PELOS TRANSPORTES
PESADOS RODOVIÁRIOS EM PORTUGAL. MODELOS DE NEGÓCIO E POLÍTICAS
PARA AUMENTAR A SUA PENETRAÇÃO

Paulo José de Oliveira Lopes Jordão

Work project desenvolvido com supervisão de:

Prof. Eduardo Redondo (PhD)

Date of Defense

Abstract (100 palavras no máximo)

Esta investigação analisa as barreiras que explicam a reduzida adoção do hidrogénio verde (H₂V) nos transportes pesados em Portugal e propõe modelos de negócio e políticas para acelerar a sua utilização. Com base em entrevistas a catorze entidades da cadeia de valor e resultados obtidos pela análise temática, identificaram-se barreiras tecnológicas, económicas, regulatórias e infraestruturais. O estudo evidencia a importância de políticas estáveis, desburocratização e modelos colaborativos, para criação de um mercado inicial. Modelos de negócio como a “Integração Vertical”, “*HaaS /Pay-per-Km*”, “Parcerias-Público-Privadas”, e “Reconversão de Veículos”, são apontados como soluções promissoras para fomentar a oferta, a procura e viabilizar a mobilidade pesada descarbonizada.

Keywords

Hidrogénio Verde, Transportes Pesados, Transição Energética, Barreiras à Inovação, Modelos de Negócio, Economia do Hidrogénio, Estratégias para Comercialização, Políticas Públicas e Regulatórias para o Hidrogénio, Fontes de Financiamento.

Agradecimentos

Os meus sinceros agradecimentos a todos os professores e colegas da Nova SBE que me ajudaram a percorrer esta jornada, em especial ao meu orientador, Prof. Eduardo Redondo. Quero agradecer também a todas as pessoas que dispuseram do seu tempo para que eu as entrevistasse. Sem a sua preciosa contribuição este estudo não teria sido possível. Por fim, à minha família, um agradecimento muito especial. Aos meus filhos, Gonçalo e Miguel, por me aturarem nos momentos mais difíceis. À minha mulher, Maria de Jesus, uma especial homenagem e agradecimento pelo apoio incondicional que me deu, mas acima de tudo, por ter sido a pessoa que me incentivou a frequentar este mestrado. Sem ela eu não o teria feito.

This work used infrastructure and resources funded by Fundação para a Ciência e a Tecnologia (UID/ECO/00124/2013, UID/ECO/00124/2019 and Social Sciences DataLab, Project 22209), POR Lisboa (LISBOA-01-0145-FEDER-007722 and Social Sciences DataLab, Project 22209) and POR Norte (Social Sciences DataLab, Project 22209).

Índice

1. INTRODUÇÃO	6
1.1 CONTEXTO	6
1.2 PROBLEMA E OBJETIVOS	6
2. REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 HIDROGÉNIO VERDE – CONCEITOS E TECNOLOGIA	7
<i>Oferta de OEMs em Portugal.....</i>	<i>9</i>
<i>Combustíveis alternativos para veículos pesados.....</i>	<i>9</i>
2.2 BARREIRAS À ADOÇÃO. VIABILIDADE COMERCIAL E ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO. 10	
2.3 MODELOS DE NEGÓCIO	12
<i>Modelos de Negócio Sustentáveis</i>	<i>13</i>
<i>Modelos de Negócio de Baixo Carbono.....</i>	<i>14</i>
<i>Modelos Baseados em Créditos de Carbono</i>	<i>15</i>
2.4 ESTUDOS ANTERIORES E LACUNAS	15
3. METODOLOGIA	16
4. RESULTADOS – ANÁLISE E DISCUSSÃO	17
4.1 BARREIRAS E DESAFIOS ESTRUTURAIS.....	18
4.2 FATORES DE PROCURA E ACEITAÇÃO DO MERCADO.....	20
4.3 POLÍTICAS PÚBLICAS E REGULAÇÃO	21
4.4 MODELOS DE NEGÓCIO.....	23
4.5 ESTRATÉGIAS DE VIABILIZAÇÃO.....	25
4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS EMPÍRICOS.....	26
5. CONCLUSÕES	27

<i>Recomendações</i>	29
<i>Contribuição para o Conhecimento</i>	29
<i>Limitações do estudo</i>	30
<i>Sugestões para Investigação Futura</i>	30
BIBLIOGRAFIA	31
ANEXOS	33
ANEXO A – MERCADO H ₂ V NOS TRANSPORTES PESADOS	34
ANEXO B – TECNOLOGIA	36
<i>Produção de Hidrogénio Verde</i>	36
<i>Veículos</i>	37
ANEXO C – MODELOS DE NEGÓCIO	38
ANEXO D – ENTREVISTAS	40
<i>Mapeamento para design do Guião das Entrevistas</i>	40
<i>Guião das Entrevistas</i>	41
ANEXO E – JORNADA DE DECISÃO DO CLIENTE	43

Índice de Figuras

Figura 1. A economia do Hidrogénio	7
Figura 2. Cadeia de Valor do H ₂ V	8
Figura 3. Mix de tecnologias para atingir o mínimo de gases de efeito de estufa (GEE ou GHG) – Transportes pesados.	10
Figura 4. Inter-relação entre tipos de Modelos de Negócio	12

Índice de Quadros e Tabelas

Quadro 1. Barreiras à adoção do H2V	11
Quadro 2. Estratégias para mitigar as barreiras à adoção e viabilidade em transportes pesados rodoviários em Portugal	11
Quadro 3. Síntese das entrevistas efetuadas	17

Lista de Abreviaturas

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

BEV – Battery Electric Vehicle (Veículo Eléctrico Bateria)

CCD – *Carbon Contracts for Difference* (Contractos de Carbono por Diferença)

CCS – *Carbon Capture and Storage* (Captura e armazenagem de CO₂)

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

CO₂-eq – Dióxido de Carbono equivalente

EN-H2 – Estratégia Nacional para o Hidrogénio

ESG – *Environmental, Social and Governance* (Ambiental, Social e Governação)

ETS – *Emission Trading System* (Sistema de Comércio de Emissões)

FCEV ou H₂-FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle* (Veículo Eléctrico a Pilha de Combustível)

GEE- Gases com Efeito de Estufa

H₂ – Hidrogénio

H₂V – Hidrogénio Verde

HICE ou H₂-ICE – *Hydrogen Internal Combustion Engine* (Motores de Combustão Interna a Hidrogénio)

HRS – *Hydrogen Refueling Station* (Posto para abastecimento de hidrogénio)

HVO – *Hydrotreated Vegetable Oil* (Óleo Vegetal Hidrogenado)

kt ou kton– Mil toneladas

ktep – Mil toneladas equivalentes de petróleo.

LCA – *Life Cycle Assessment* (Avaliação do ciclo de vida)

LCOH – *Levelized Cost of Hydrogen* (Custo Nivelado de Hidrogénio)

LOHC- *Liquid Organic Hydrogen Carrier* (Portador Orgânico Líquido de Hidrogénio)

MNS – Modelos de Negócio Sustentáveis

NO_x – Óxido de Azoto

OEM – *Original Equipment Manufacturer* (Fabricante de Equipamento Original)

PNEC – Plano Nacional de Energia e Clima

PRR – Plano de Recuperação e Resiliência

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SMR – Steam Methane Reformer (Reformador de Vapor de Metano)

TCO – *Total Cost of Ownership* (Custo Total de Propriedade)

t - Tonelada

UHC – *Unburned Hydrocarbons* (Hidrocarbonetos não queimados)

1. Introdução

1.1 Contexto

A crescente preocupação com o aquecimento global e com as alterações climáticas resultantes das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), em particular do carbono, levou à criação de compromissos internacionais que visam limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Este compromisso foi formalizado no Acordo de Paris, ratificado em 2015 por 196 países na COP21 e em vigor desde 2016. Na COP22, realizada em Marraquexe, Portugal reafirmou o objetivo de atingir a neutralidade carbónica até 2050, posteriormente antecipada para 2045, (Lei no 98/2021 de 31 de Dezembro, Lei de Bases Do Clima). Em coerência com este compromisso, Portugal desenvolveu o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050; Conselho de Ministros 2019), e o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030, Assembleia da República 2025), revisto em 2024 e aprovado em 2025. Estes documentos definem metas e políticas para a transição energética e reforçam o papel do hidrogénio verde (H₂V), particularmente nos setores de difícil eletrificação, como os transportes pesados, a indústria e a energia. Reconhecendo essa importância, a Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H₂) (Presidência do Conselho de Ministros 2020) estabelece a incorporação de 1% a 5% de H₂V no consumo energético do transporte rodoviário e a criação de 50 a 100 postos de abastecimento até 2030. No entanto, Portugal ainda não dispõe de postos públicos de abastecimento de hidrogénio e a frota de veículos pesados a H₂V é residual, limitada a projetos-piloto com autocarros urbanos, ao contrário de outros países da UE, como se pode verificar nas Figuras 1.1, 1.2 e 1.3 (Anexo 1).

1.2 Problema e Objetivos

A presente investigação procura responder à seguinte pergunta: **Quais as razões que explicam a fraca adoção do hidrogénio verde (H₂V) no setor dos transportes pesados em Portugal?**

O **objetivo geral** consiste em analisar os fatores que influenciam a reduzida adoção do hidrogénio verde e propor estratégias para mitigar as barreiras e acelerar a sua implementação.

Os **objetivos específicos** são:

- Analisar os principais fatores técnicos, económicos e regulatórios que influenciam a adoção do H₂V nos transportes pesados.
- Identificar as principais barreiras que limitam a viabilidade comercial do hidrogénio verde neste setor.
- Mapear e caracterizar políticas e modelos de negócio existentes, ou em desenvolvimento, com potencial para aplicação no contexto português e avaliar a sua adequação e eficácia na superação das barreiras, propondo recomendações.

2. Revisão da Literatura

2.1 Hidrogénio Verde – Conceitos e Tecnologia

O hidrogénio (H₂), elemento mais abundante do universo (75% da matéria visível), é raro na Terra na forma livre, encontrando-se associado à água, combustíveis fósseis e biomassa, de

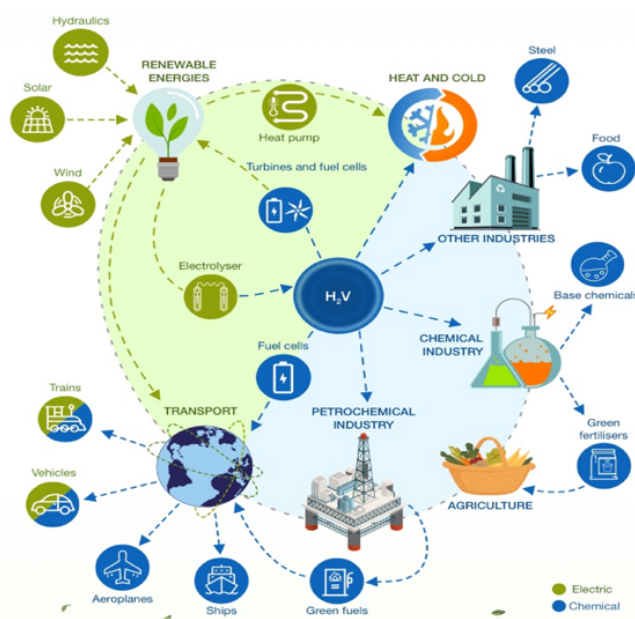


Figura 1. A economia do Hidrogénio

Fonte: Iberdrola

onde pode ser extraído. A sua elevada densidade energética e versatilidade, posicionam-no como um elemento essencial na transição energética e descarbonização, podendo atuar como fonte de energia, vetor energético, ou matéria-prima para, por exemplo, produzir combustíveis sintéticos (*e-fuels*) e biocombustíveis hidrogenados (HVO).

Segundo Roy et al. (2025), o impacto ambiental do H₂ depende do método de produção, sendo classificado por “cores”, tal como ilustrado na Figura B.1 (Anexo B), consoante a origem energética e processo, determinantes na sua pegada carbónica. Atualmente, 99% do H₂ mundial é obtido a partir de combustíveis fósseis. O hidrogénio verde (H₂V), gerado por eletrólise da água com energia renovável, representa menos de 1% da produção global, mas deverá crescer significativamente com a transição energética, dada a sua aplicabilidade em vários setores da economia (Figura 1).

De acordo com a IEA (2025), em 2024 a procura global de H₂ para transportes foi de 100 kt

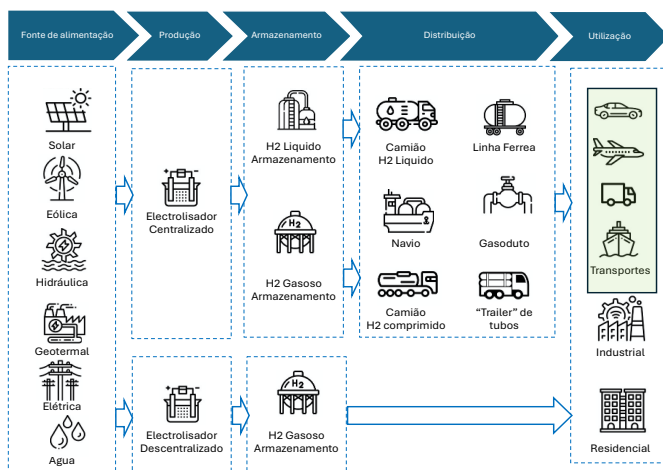


Figura 2. Cadeia de Valor do H₂V

Fonte: Elaboração própria

(+40% face a 2023), dominada pelos transportes pesados na China (75%). Contudo, este setor representa apenas 0,1% da procura total. Em Portugal, prevê-se um crescimento expressivo, tal como indicado no Quadro A.1 (Anexo A), mas o volume ainda é bastante modesto. A sua cadeia de valor pode ver-se esquematizada na Figura 2.

Aplicações do H₂V em transportes pesados rodoviários e combustíveis alternativos

O H₂V ganha relevância nos transportes pesados, onde a eletrificação direta enfrenta limitações de autonomia, peso e tempo de carregamento. As principais aplicações incluem: (a) camiões de médio e longo curso (16 t ou mais); (b) autocarros e frotas municipais de RSU; (c) máquinas industriais.

As tecnologias aplicáveis a estes veículos são: **(a)** *Fuel Cell Electric Vehicles* (FCEV) - convertem H₂V em eletricidade para alimentar motores elétricos, com autonomias até 800 km

e reabastecimento rápido, apresentando menor peso que os BEV (*Battery Electric Vehicles*);

(b) *Hydrogen Internal Combustion Engine* (HICE) - motores de combustão interna a combustíveis fósseis, adaptados para H₂. Embora segundo Shadidi, Najafi, and Yusaf (2021) reduzam o CO, UHC e fuligem, aumentam as emissões de NO_x, não sendo por isso considerados veículos de zero emissões, o que limita o acesso a apoios europeus.

Oferta de OEMs em Portugal

A pesquisa de mercado realizada, mostrou que entre nove marcas de autocarros, apenas a Caetano Bus (Figura B.2 – Anexo B), Mercedes-Benz e Solaris comercializavam modelos H₂-FCEV em Portugal. No segmento dos camiões, nenhuma das sete marcas principais dispunha de alternativas H₂-FCEV ou HICE, conforme se pode verificar pelo Quadro A.2 (Anexo A), embora já existam algumas soluções para mercados da Europa Central (Figura B.3 – Anexo B).

Combustíveis alternativos para veículos pesados

Existem outros combustíveis, para além do H₂, que podem reduzir emissões face ao Diesel, embora sem igual potencial de descarbonização (Kluschke et al. 2019). Podem ter origem fóssil ou renovável e classificam-se em quatro categorias, consoante o CO₂ emitido: sem redução, com redução, neutros e zero. (ver Quadro B.1– Anexo B).

Combustíveis como HVO e biometano são mais facilmente adotáveis, porque aproveitam infraestruturas logísticas e frotas existentes. No entanto, subsiste alguma incerteza quanto à futura tecnologia dominante para combustíveis alternativos e grupos motopropulsores (Kluschke et al. 2019).

Segundo Kramer et al. (2022), o cenário de menores emissões de GEE resulta da coexistência de múltiplas tecnologias, cuja penetração evolui com o tempo (Figura 3). As soluções zero emissões (BEV e FCEV) terão relevância crescente, com os FCEV a ganhar expressão após 2028. Em 2050, 90% da frota pesada deverá ser eletrificada, sendo o biometano uma alternativa transitória para descarbonizar o Diesel.

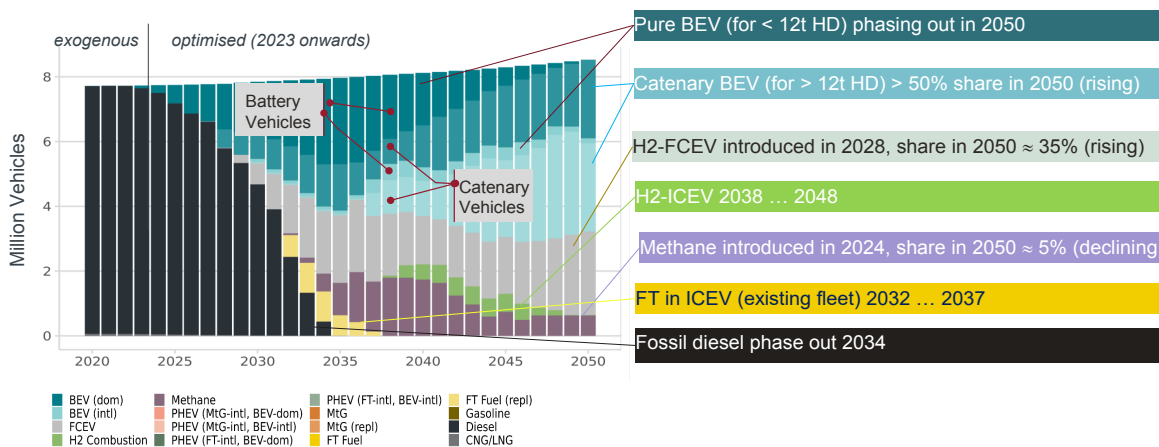


Figura 3. Mix de tecnologias para atingir o mínimo de gases de efeito de estufa (GEE ou GHG) – Transportes pesados.

Fonte: Kramer et al. (2022)

2.2 Barreiras à Adoção. Viabilidade Comercial e Estratégias de Mitigação

A literatura identifica diversas barreiras à adoção do hidrogénio verde (H₂V), que condicionam a sua competitividade e penetração nos transportes pesados. Segundo Raeesi et al. (2024), a produção, armazenamento, transporte e distribuição, constituem uma barreira estrutural chave, parcialmente superável através do planeamento integrado da infraestrutura e de uma adequada localização espacial. De forma convergente, Küffner (2022) identifica a infraestrutura como a barreira mais crítica, defendendo uma forte colaboração entre indústria e governo para ultrapassar esta barreira. A IEA (2025) reafirma a incerteza regulatória e os problemas de licenciamento como razões para a lentidão no avanço do H₂V.

Larson, Parsons, and Kalluri (2024), destacam ainda a incerteza tecnológica e os custos de investimento como fatores limitativos, enquanto Borge-Diez et al. (2024) sublinham que a economia do hidrogénio é travada pelos custos elevados de produção e baixa eficiência global. Fragiaco et al. (2024) quantificam esta limitação, indicando que o eletrolisador representa cerca de 42% do custo total da infraestrutura, ao passo que Zhao et al. (2019) salientam o preço da eletricidade como variável determinante no LCOH (*Levelized Cost of Hydrogen*).

Podemos resumir a tipologia de barreiras identificadas no Quadro 1.

Quadro 1. Barreiras à adoção do H2V

Tipo de Barreira	Descrição
Tecnológica	Baixa eficiência dos eletrolisadores; incerteza na tecnologia emergente para eletrolisadores, motopropulsores e armazenagem.
Económica	Elevado Capex e Opex para produção de hidrogénio, infraestrutura e veículos ; custos de electricidade; falta de escala industrial; LCOH elevado quando comparado com combustíveis alternativos.
Infraestrutura	Falta de postos de abastecimento, armazenagem e rede de distribuição; Localização de Hubs
Regulatória	Falta de normalização técnica ; incerteza de incentivos, políticas de incentivos a longo prazo instável; objectivos de longo prazo instáveis. enquadramento jurídico
Social e de Mercado	Baixa sensibilização e confiança dos operadores; ausência de procura inicial; procura incerta; maturidade da tecnologia; modelos de negócio

Fonte: Elaboração própria.

A barreira económica, sendo a mais determinante, reforça a necessidade de desenvolver modelos de negócio que capturem valor através da descarbonização, acelerando a transição dos combustíveis fósseis para alternativas de zero emissões, onde se inclui o H₂V.

De acordo com os autores atrás referidos, a mitigação destas barreiras pode ser feita com recurso a: (1) Subsídios/incentivos; (2) Integração setorial; (3) Parcerias público-privadas ;(4) Otimização da infraestrutura; (5) Inovação tecnológica; (6) Clareza de políticas. Ou seja, requer uma abordagem integrada, combinando planeamento detalhado, políticas públicas, inovação tecnológica e novos modelos de negócio, os quais se pretende explorar no âmbito desta investigação e cuja aplicabilidade a Portugal se pode resumir no Quadro 2.

Quadro 2. Estratégias para mitigar as barreiras à adoção e viabilidade em transportes pesados rodoviários em Portugal

A - Desenvolvimento de Infraestruturas	Aplicabilidade em Portugal
Planeamento Territorial Detalhado	Otimizar a localização geográfica dos locais onde se devem construir as instalações de armazenagem e os postos de abastecimento, por forma a reduzir custos e melhorar a acessibilidade.
Implementação faseada da infraestrutura	Infraestrutura inicial localizada em corredores de elevado tráfego, em centros regionais (hubs) e polos industriais.
Fazer a integração com energia renovável	Localizar a produção de hidrogénio, sempre que possível, próximo das fontes de energia renovável, tendo por objetivo reduzir custos e emissões.
Obtenção de colaboração governamental	Apoios e investimento públicos para o desenvolvimento de infraestruturas.

Quadro 2 (continuação)

B - Desenvolvimento de Mercado Mecanismos para impulsionar a oferta e a procura	Aplicabilidade em Portugal
Políticas e Quadro Regulatório	Políticas de suporte claras, fortes e estáveis.
Subsídios e Incentivos	Alívio fiscal e subsídios à operação. Pela literatura constatámos que alguns já estão em prática.
Políticas de mitigação de riscos e precificação do carbono	a) Fundos de Transição Justa, para mitigar o risco social e regional. b) Isenções ou tarifas graduais nas ETS- "Emissions Trading System" - para cobrir o risco económico. c) Contratos de carbono a prazo (CCD) para mitigar risco financeiro. d) Mecanismos de compensação para os casos de risco sectorial. e) Investimento em R&D para cobrir o risco tecnológico.

Fonte: Elaboração própria.

2.3 Modelos de Negócio

A literatura sobre modelos de negócio aplicáveis à economia do hidrogénio ainda é limitada, sobretudo no contexto dos transportes pesados movidos a H₂V em Portugal. Para colmatar esta lacuna, adotou-se uma abordagem em quatro níveis (ver Figura 4):

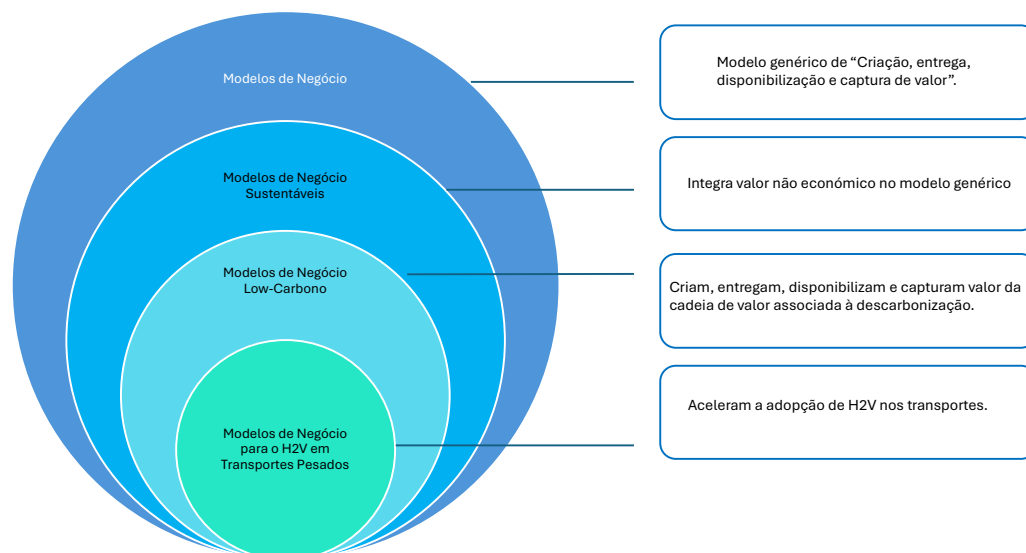


Figura 4. Inter-relação entre tipos de Modelos de Negócio

Fonte: Elaboração própria.

1. Modelos de Negócio genéricos;
2. Modelos de Negócio Sustentáveis (MNS), que incorporam valores de sustentabilidade;
3. Modelos de Negócio de Baixo Carbono, subsector dos MNS que capturam valor da descarbonização.
4. Modelos de Negócio que aceleram a adoção de H₂V nos transportes.

Esta estrutura permitiu identificar arquétipos conceptuais que fundamentam a seleção de modelos adequados à adoção do H₂V nos transportes pesados.

O conceito de “Modelo de Negócio”, surgiu na literatura em 1957 (DaSilva and Trkman 2014), mas apenas nas décadas de 1990-2000 evoluiu como instrumento de análise estratégica (Zott, Amit, and Massa 2011). Atualmente e apesar das múltiplas definições, é entendido como o conjunto de escolhas que definem a forma como uma organização cria, entrega e captura valor (Osterwalder and Pigneur 2010).

Modelos de Negócio Sustentáveis

Os MNS ampliam o conceito tradicional da criação de valor, adicionando valor monetário ao valor não monetário. Procuram criar valor em três áreas: a económica, a ambiental e a social (Geissdoerfer, Vladimirova, and Evans 2018). São considerados a base conceptual da transição energética, pois articulam inovação tecnológica, responsabilidade social e viabilidade económica.

Bocken et al. (2014) identificaram onze arquétipos de MNS, agrupados em três categorias: tecnológica, social e organizacional. Para a viabilização do H₂V em transportes pesados no contexto português, destacam-se quatro arquétipos particularmente relevantes, porque aproveitam excessos de energia renovável, assentam num modelo colaborativo e de partilha de recursos e de risco- ideais para mercados imaturos, em desenvolvimento: (a) criação de valor a partir do desperdício; (b) entrega de funcionalidade em vez de propriedade; (c) substituição por renováveis; (d) desenvolvimento de soluções escaláveis. No mercado português, estes arquétipos materializam-se em modelos de Simbiose Industrial, Acoplamento Setorial, Partilha de Ativos, Inovação em Zero Emissões, *Hydrogen-as-a-Service*, *Joint Ventures*, Parcerias Público-Privadas, Incubadoras e plataformas de Inovação aberta

Modelos de Negócio de Baixo Carbono

Sendo um subconjunto dos MNS, estes modelos permitem criar e capturar valor através da descarbonização, oferecendo bens e serviços de qualidade comparável às alternativas convencionais, mas com menor pegada carbónica (Sairanen and Aarikka-Stenroos 2024). A sua viabilidade depende de: (1) Avanços tecnológicos nos sistemas de energia e processos produtivos; (2) Gestão e valorização do carbono; (3) Políticas e instrumentos económicos que estimulem inovação e investimento em tecnologias limpas.

Entre os dez tipos de modelos identificados por Sairanen and Aarikka-Stenroos (2024), dois foram por nós considerados aplicáveis a Portugal, pois permitem acelerar a descarbonização e aumentar a eficiência, reduzindo emissões, custos operacionais e custos de investimento. Para além disso, favorecem a cooperação empresarial, a inovação e a criação de novas tecnologias limpas, essenciais para a criação e desenvolvimento do mercado de H₂V nos transportes.

Trata-se dos modelos: (1) ***Hydrogen-as-a-service*** – uma forma de “Intensificação do uso do produto” já identificado por Bocken et al. (2014), ideal para pequenos mercados em crescimento, como é o caso português.; (2) ***Tecnologia para descarbonização*** – incluído pelos autores no tipo “Produtos e serviços para descarbonização”, que se destaca pela importância que a inovação tecnológica tem na viabilização económica do H₂V, com especial relevância para o desenvolvimento de eletrolisadores, soluções de armazenagem em materiais e conversão de propulsores Diesel para H₂.

O modelo de “*Sector Coupling*” referido por Trapp, Kanbach, and Kraus (2022) e já anteriormente identificado por Bocken et al. (2014) apresenta algum potencial no contexto nacional, promovendo a integração entre energia, transportes e indústria. Em Portugal, pode traduzir-se na utilização de hidrogénio produzido em *Hydrogen Valleys* industriais, como os que estão projetados para a CIM Médio Tejo, ou para a Marinha Grande (*Nazaré Valley*). Também aqui, a otimização de ativos e a garantia de procura pode ajudar o H₂V, mas está

altamente dependente da presença dum produtor de H₂V no *cluster*. Sem ele, não existe fator de aceleração.

Modelos Baseados em Créditos de Carbono

Lai et al. (2025) apresentam três modelos de negócio baseados em créditos de carbono e de hidrogénio, para viabilizar o H₂V nos transportes pesados:

- **Redução de Emissões** – o diferencial de custos é compensado por créditos de carbono;
- **Créditos de H₂** – recuperação do investimento através da negociação desses créditos;
- **Partilha de Benefícios** – distribuição dos créditos entre operadores, produtores e fabricantes, promovendo cooperação setorial.

Os autores demonstram que, para preços de CO₂ na ordem dos 92 USD/t, o custo médio de condução por quilómetro (*Levelized Cost of Driving*) reduz-se para metade e para valores entre 174-240 USD/t, o custo líquido pode tornar-se negativo, funcionando como subsídio indireta. Estes modelos são especialmente relevantes em Portugal, onde os incentivos económicos podem ser decisivos para a viabilidade do setor.

No quadro C.1 (Anexo C) encontram-se resumidos os modelos de negócio identificados na literatura como aplicáveis aos transportes pesados em Portugal, e a forma como criam, disponibilizam, entregam e capturam valor.

2.4 Estudos Anteriores e Lacunas

A revisão da literatura revela várias lacunas que justificam esta investigação. A maioria dos estudos sobre hidrogénio verde (H₂V) centra-se em análises técnico-económicas, como o *Total Cost of Ownership* (TCO) e a modelação de custos, privilegiando produção, infraestrutura e tecnologia, mas negligenciando modelos de negócio e viabilidade comercial. Há também escassez de estudos sobre transportes pesados e quase ausência de análises focadas em Portugal. Além disso, prevalecem abordagens macroeconómicas que ignoram as dinâmicas de mercado e o papel dos diversos agentes da cadeia de valor - produtores, operadores, fabricantes,

municípios e reguladores - fundamentais para compreender modelos colaborativos e partilha de risco. Observa-se também um défice de investigação em modelos de negócio inovadores, como o *Hydrogen-as-a-Service* ou *hubs* regionais integrados. Estas lacunas abrem espaço para uma investigação que analise de forma integrada, quais os **“Modelos de negócio que ajudam a viabilizar a adoção do hidrogénio verde nos transportes pesados rodoviários em Portugal”**, respondendo a questões não só tecnológicas, mas também a barreiras que condicionam a sua viabilidade, bem como medidas mitigadoras para as ultrapassar.

3. Metodologia

Dada a natureza do problema e objetivo da investigação, adotou-se um desenho metodológico qualitativo, de natureza exploratória, sustentado na recolha de dados primários através de entrevistas semiestruturadas, seguida de análise temática. Adotou-se a estrutura metodológica proposta por Saunders, Lewis, and Thornhill (2019), tendo-se assumido uma filosofia interpretativa e raciocínio indutivo para a obtenção dos resultados extraídos a partir da análise das entrevistas. A recolha de dados primários, qualitativa, foi obtida com recurso a 14 entrevistas individuais que totalizaram a duração de 12h16m. A primeira, não estruturada, permitiu delimitar o foco de investigação e formular a questão principal. As restantes 13 entrevistas semiestruturadas, gravadas e transcritas, foram realizadas com base num guião (ver Anexo D) elaborado a partir dos principais tópicos identificados na revisão da literatura, assegurando a coerência entre o enquadramento teórico e a recolha de dados. O quadro D.1 (Anexo D) contém o mapeamento entre as dimensões da literatura e as questões do guião, evidenciando a ligação entre a teoria e a estratégia de recolha de dados. O Horizonte Temporal da investigação é transversal (*cross sectional*), tendo decorrido entre 1 de Abril e 18 de Setembro de 2025. A Unidade de Análise é o Setor dos Transportes Rodoviários Pesados em

Quadro 3. Síntese das entrevistas efetuadas

Entrevistas	Categoria	Organização	Cargo	Local	Duração (min.)	Data
#1	Consultores / Especialistas	Instituto Superior Técnico	Professor/Investigador	Oeiras	60	27 Fev. 2025
#2	Fornecedores de Serv. de Engenharia e Equipamentos	PRF	CEO - Chief Executive Officer	Leiria	63	17 Jun. 2025
#3	Consultores / Especialista	Associação Portuguesa para a Promoção do Hidrogénio - (AP2H2)	Presidente	MS Teams	60	17 Jun. 2025
#4	Transportes Públicos Municipais	Comunidade Intermunicipal Médio Tejo	Director Executivo	Tomar	71	23 Jun. 2025
#5	Transportes Públicos Municipais	Anónima	Director	MS Teams	49	26 /27 Jun. 2025
#6	Transportes de Mercadorias	Transportes J. Amaral (TJA)	Coord. Gestão de Frota	MS Teams	58	27 Jun. 2025
#7	Transportes Públicos Municipais	Cascais Próxima - CMCascais	Presidente do Conselho de Administração	Cascais	43	1 Jul. 2025
#8	Entidade Licenciadora	Direcção Geral de Energia	Director Geral	Lisboa	28	2 Jul. 2025
#9	Fabricante de Veículos Pesados (OEM)	Caetano Bus	CCO - Chief Commercial Officer	V.Nova de	51	3 Jul. 2025
#10	Fabricante de Veículos Pesados (OEM)	MAN Truck & Bus Portugal	Gestor de Produto	MS Teams	44	8 Jul. 2025
#11	Cliente de Transportadores	BA Glass	Director de Sustentabilidade	MS Teams	35	25 Jul. 2025
#12	Produtor de Hidrogénio	Rega Energy	Business Developer	MS Teams	55	31 Jul. 2025
#13	Desenvolve Tecnologia de Fundação para Indústria Automóvel	Sinter Cast	Director de Operações	MS Teams	39	12 Set. 2025
#14	Distribuição de Combustíveis e Lubrificantes	BP e Castrol Portugal	Head of Country	Oeiras	40	18 Set. 2025

Fonte: Elaboração própria.

Portugal. A amostra foi não probabilística e intencional, representativa dos principais intervenientes da cadeia de valor do hidrogénio em Portugal (ver Quadro 3), entretanto selecionados. A análise dos resultados seguiu uma abordagem qualitativa, indutiva, com base na análise temática proposta por Nowell et al. (2017), iniciando-se com a transcrição integral das entrevistas, revisão e leitura repetida para familiarização. Posteriormente, com o apoio do software Maxqda24, fez-se a codificação dos dados, extraindo-se códigos e subcódigos (552) que foram agrupados em quinze categorias relacionadas com a perceção dos entrevistados sobre a adoção do hidrogénio verde pelos transportes pesados. A partir destas, construíram-se cinco temas, que preenchem as lacunas e melhor resposta dão aos objetivos e à pergunta de investigação. A interpretação dos resultados, baseou-se na articulação entre as evidências empíricas e a literatura existente, de modo a compreender as barreiras, oportunidades e perspectivas que moldam a viabilidade do hidrogénio verde nos transportes, em Portugal.

4. Resultados – Análise e Discussão

O objetivo deste capítulo é interpretar de forma integrada as perceções dos diferentes “*stakeholders*” da cadeia de valor do H₂V e articulá-las com a literatura, tendo em conta os objetivos definidos para a investigação.

A discussão organiza-se em cinco eixos: (1) barreiras e desafios estruturais; (2) fatores de procura e aceitação do mercado; (3) políticas públicas e regulação; (4) modelos de negócio; (5) estratégias de viabilização.

4.1 Barreiras e desafios estruturais

Custos de tecnologia, combustível e infraestrutura

A primeira barreira é económica. A produção de H₂V continua cara quando comparada com combustíveis alternativos, devido ao preço da eletricidade necessária à eletrólise. “*Com eletricidade a 100 €/MWh, o custo equivalente do hidrogénio pode chegar aos 150 €/MWh, quando o gás natural custa cerca de 30 €/MWh*” (Rega Energy). No transporte pesado, o impacto é direto: “*preços de venda atuais do hidrogénio na ordem dos 8–9 €/kg quando a eletricidade é comprada à rede*” (Cascais Próxima), o que inviabiliza a competitividade face ao gasóleo sem apoio público (A2PH2; PRF). Estas perceções confirmam o que foi identificado por Borge-Diez et al. (2024) que considerava o elevado custo de produção e a baixa eficiência global do hidrogénio como uma das principais barreiras.

O custo dos veículos amplia a diferença. “*Um camião a hidrogénio pode custar 3,5 vezes mais do que um diesel, o que é incomportável para operadores que trabalham com margens reduzidas*” (TJA). A infraestrutura acrescenta uma terceira parcela ao custo. A instalação de postos de abastecimento representa mais um investimento elevado - “*entre um milhão e um milhão e meio de euros e só se justifica com garantias de procura e enquadramento legal estável*” (CIM Médio Tejo). Assim, a infraestrutura torna-se simultaneamente uma condição para a criação do mercado e simultaneamente uma barreira. (Cascais Próxima; A2PH2). Também Küffner (2022) e Larson, Parsons, and Kalluri (2024) identificam estas perceções nos seus estudos, apesar do contexto geográfico ser diferente.

Mercado de H₂V- procura e massa crítica

A falta de escala agrava a barreira económica. “*Não temos massa crítica de frota pesada que justifique uma grande aposta em hidrogénio automóvel*” (BP Portugal). “*A escassez de veículos desencoraja fabricantes e fornecedores, que priorizam mercados já operacionais, como os nórdicos e o Benelux*” (TJA). Sem escala, não há assistência técnica eficiente: “*Adaptar oficinas e garantir pós-venda só faz sentido se houver pelo menos 15 ou 20 veículos por zona*” (MAN Trucks). A ausência deste ecossistema reduz confiança e atrasa investimento. Esta perceção é mais forte em mercados pequenos como o português. Laguipo, Forde, and Carton (2022) chegaram à mesma conclusão no estudo que fizeram para a Irlanda e concluíram que a procura é iniciada pelos “*early movers*”.

Incerteza tecnológica e operacional

A maturidade tecnológica permanece limitada. “*Falta experiência, tanto da nossa parte como do consórcio*” (Anónima), refletindo que a maioria dos projetos ainda se encontra em fase piloto. Persistem lacunas na oferta, com “*(...) protótipos ainda em laboratório*” (TJA) e “*(...) soluções altamente customizadas que aumentam riscos e prazos*” (Anónima). Fabricantes como a Caetano Bus sublinham “*(...) risco tecnológico, incerteza legislativa e imprevisibilidade do ciclo de vida dos componentes*” como fatores críticos de adoção. Estas perceções confirmam o que foi identificado por Larson, Parsons, and Kalluri (2024).

Infraestrutura energética e logística

A rede elétrica é outro estrangulamento. “*Não foi pensada para isto; requer milhões de euros de investimento*” (CIM Médio Tejo). As dificuldades da e-Redes em responder a pedidos de ligação de alta potência atrasam projetos de produção por eletrólise. Do lado logístico, o transporte do hidrogénio é caro e limitado: “*Noutros países os trailers operam com pressões superiores e maior volume*” (Cascais Próxima). Como solução, “*Multiplicam-se projetos de frotas cativas, como autocarros urbanos, abastecidas localmente, criando “ilhas” de viabilidade técnica antes de surgir um mercado nacional*” (CIM Médio Tejo).

Incerteza regulatória e morosidade administrativa

A burocracia surge como barreira horizontal e transversal. Os processos de licenciamento são descritos como “(...) *longos, fragmentados e pouco claros*” (Cascais Próxima), “(...) *aplicando-se tanto à produção e armazenamento, como à distribuição do H₂V*” (A2PH2). O licenciamento elétrico é apontado como particularmente moroso (DGEG; CIM Médio Tejo). A falta de envolvimento precoce dos operadores em decisões técnicas conduz a soluções ineficazes: “*Assumem compromissos sem falarem connosco - e esse é um dos grandes problemas*” (BA Glass).

Finalmente, a barreira regulatória é transversal. “*Já existe lei que permite vender hidrogénio, mas o regulamento técnico ainda não existe*” (PRF). Sem regulamentação, é impossível licenciar ou operar postos públicos, travando o investimento. O processo arrasta-se há anos: “*Andamos há 6 ou 7 anos a tentar concluir este regulamento*” (PRF) e soma “*atrasos em leilões e avisos de financiamento que resultam na perda de fundos e no cancelamento de projetos*”. Assim, a falta de enquadramento jurídico e de execução política transforma intenções em paralisia, comprometendo o ritmo da transição energética.

4.2 Fatores de procura e aceitação do mercado

A análise das entrevistas evidencia que a principal barreira à adoção do hidrogénio verde (H₂V) pelo lado da procura também é económica. A disposição dos clientes para pagar mais por soluções descarbonizadas é muito reduzida. “*Porque é que eu vou pagar mais por vidro feito com hidrogénio verde e não com gás natural?*” (Rega Energy). Sem uma vantagem económica tangível ou imposição regulatória, as empresas não absorvem o sobrecusto.

No setor dos transportes pesados, onde se opera com margens reduzidas e forte sensibilidade ao custo por quilómetro, um entrevistado salientou que “*Um trator diesel anda na casa dos 115.000 ou 120.000 euros (...) Um elétrico é cerca de três vezes mais caro e o hidrogénio ainda deve ser um bocadinho mais caro*” (MAN Trucks), o que exclui este tipo de veículos das

decisões de compra dos operadores de transporte, a não ser por imposição dos seus clientes. Apenas alguns nichos com forte componente reputacional, clientes que valorizam explicitamente a sustentabilidade, demonstram alguma abertura a pagar um prémio “verde” (TJA; DGEG).

Esta limitação perpetua o ciclo de bloqueio entre oferta e procura. *“Não há infraestrutura, os fabricantes ainda não produzem em escala, e a procura não se materializa. (...) É um círculo vicioso”* (BP Portugal). Assim, o problema é menos tecnológico e mais de coordenação. *“Ninguém quer ser o primeiro a assumir risco num mercado sem referências”* (Rega Energy). Alguns entrevistados preveem uma mudança induzida por pressão regulatória. *“A partir de 2030, muitos clientes industriais vão ser impactados financeiramente por metas ambientais e poderão ter que pagar multas se não reduzirem emissões”* (TJA). Ou seja, a procura tenderá a resultar mais da necessidade de evitar penalizações do que de incentivos voluntários. No entanto, como vários operadores continuam *“(...) abaixo do limite de emissões relevantes e não pagam taxas de carbono”* (TJA), a urgência económica para adotar o H₂V permanece baixa.

A perceção de risco tecnológico e a dependência de fornecedores estrangeiros agravam o problema. *“A falta de know-how cria uma dependência externa, que é uma barreira crítica”* (Anónima). As empresas estão habituadas a ecossistemas diesel com oficinas e peças acessíveis. Mudar para uma tecnologia onde só um ou dois fornecedores conseguem intervir (MAN Trucks; Caetano Bus) é visto como um risco operacional. Por isso, *“A manutenção da estrutura de pós-venda tradicional é considerada essencial para a viabilidade”* (TJA).

A Figura E.1 (Anexo E) ilustra a jornada de decisão dos clientes para os dois segmentos analisados – mercadorias e passageiros.

4.3 Políticas públicas e regulação

As entrevistas evidenciam um desalinhamento profundo entre o discurso político e a capacidade de execução. Embora Portugal possua uma Estratégia Nacional para o Hidrogénio, as condições

práticas para operar, vender e abastecer continuam incompletas. *“Após a entrada em funcionamento do posto, pretendemos torná-lo acessível ao público. No entanto, isso depende do enquadramento legal para licenciamento e comercialização de hidrogénio ao consumidor final, que ainda não existe”* (Cascais Próxima). Sem regulamentação, os postos não podem ser licenciados nem operados, criando incerteza e travando o investimento.

O atraso estende-se aos mecanismos de financiamento e planeamento. Foram relatados *“(…) concursos e leilões lançados com quatro anos de atraso, resultando na perda de fundos e desistência de projetos”* (PRF). Também a revisão da Estratégia Nacional, prevista após a primeira fase, *“Não foi concretizada por mudanças de governo e falta de continuidade”* (A2PH2). Para os entrevistados, o problema não é falta de visão, mas incapacidade de execução e coordenação.

Há consenso quanto à importância da estabilidade regulatória. *“É preferível ter uma boa lei um pouco mais tarde do que estar sempre a alterá-la”* (DGEG). Contudo, esta visão contrasta com a perceção do setor privado de que *“O Estado tem sido mais um problema do que uma solução”* (PRF). O Estado é, simultaneamente, visto como facilitador indispensável e fonte de bloqueio, refletindo uma tensão estrutural entre ambição política e capacidade institucional.

Quanto ao financiamento, todos concordam que *“Sem apoio público direto dificilmente haverá aceleração”* (BA Glass). *“Projetos de mobilidade só avançaram porque foram “100 % financiados pelo PRR”* (Anónima), revelando que o mercado ainda não é autossustentável (CIM Médio Tejo; Cascais Próxima).

Entre os instrumentos considerados estratégicos estão a *“(…) redução de portagens para veículos a hidrogénio”* (MAN Trucks), *“(…) compensações para mitigar o custo acrescido do combustível”* (DGEG) e mecanismos em que o Estado *“(…) cobre a diferença entre o custo de um camião diesel e o de um camião a hidrogénio”* (CIM Médio Tejo; TJA). Também se

destacam “(...) *fundos regionais, como o Fundo de Transição Justa, que podem financiar até 40 % dos investimentos em produção e distribuição*” (CIM Médio Tejo).

Porém, persiste um desequilíbrio setorial: “*Tem havido avisos de apoio para transporte de passageiros, sim; para mercadorias ainda não há o equivalente*” (PRF). Os incentivos concentram-se nos autocarros urbanos, enquanto o transporte rodoviário de mercadorias que é o mais relevante em emissões, permanece sem apoios. A burocracia surge como barreira horizontal e transversal. Os processos de licenciamento são descritos como “*longos, fragmentados e pouco claros*” (Cascais Próxima), “*(...) aplicando-se tanto à produção e armazenamento como à distribuição do H₂V*” (A2PH2). O licenciamento elétrico é apontado como particularmente moroso (DGEG; CIM Médio Tejo). Estas perceções dos entrevistados, confirmam os resultados descritos pela IEA (2025) sobre licenciamentos e estabilidade regulatória na Europa.

4.4 Modelos de negócio

A análise mostra que os modelos de negócio atualmente mais promissores para o hidrogénio verde (H₂V) nos transportes pesados em Portugal não são de mercado aberto, mas sim estruturas integradas e territorialmente concentradas, baseadas no controlo conjunto de toda a cadeia de valor.

Integração vertical e cadeias de valor fechadas

Verifica-se que os projetos que mais têm avançado, seguem uma lógica de integração vertical: produção local de H₂V com energia renovável própria, armazenamento, compressão, abastecimento e consumo interno em frotas cativas. “*A única forma de viabilizar é com uma cadeia de valor integrada*” (Anónima). Esta configuração, onde “*(...) o eletrolisador é dimensionado para as necessidades operacionais da empresa*” (Anónima), reduz a exposição a preços de mercado e contorna a ausência de infraestrutura pública. Assim, “*O risco e o*

investimento são internalizados, permitindo operar em pequena escala de forma economicamente controlada” (PRF).

Este modelo revela uma tendência para “ilhas de viabilidade”: projetos-piloto circunscritos a um território e a uma frota específica, que funcionam como laboratórios tecnológicos e logísticos, até existir um mercado nacional maduro.

Apesar de não constar na literatura a que tivemos acesso, este modelo mostra-se plausível, dado que assegura a correspondência entre oferta e procura, reduzindo o risco de desequilíbrio do mercado.

Parcerias público-privadas e risco partilhado

As parcerias público-privadas (PPP) surgem como o principal modelo de mitigação de risco nesta fase inicial. Apesar das “(...) *limitações associadas à contratação pública*” (Cascais Próxima), a cooperação entre operadores públicos de transporte e fabricantes de veículos é vista como essencial para viabilizar os primeiros projetos (Caetano Bus; Anónima). “*Existe um esforço partilhado entre duas entidades que acreditam no hidrogénio como solução de mobilidade*” (Caetano Bus).

Estas parcerias permitem partilha de risco tecnológico e reputacional, acesso a financiamento público e condições comerciais mais favoráveis. “*A marca acabou por nos fazer melhores condições de aquisição das viaturas*” (TJA). Para os privados, representam uma estratégia de entrada prudente num mercado incipiente: “*Vamos ver se funciona, com o apoio do sector público, e depois logo se vê se isto é negócio para nós*” (Anónima). Assim, as PPP funcionam como mecanismos de aprendizagem institucional e confiança mútua, preparando o terreno para uma futura fase de mercado aberto. Também Bocken et al. (2014) considera este modelo interessante para partilhar o desenvolvimento da tecnologia, investimento e risco através dum acordo que garante oferta e procura.

Transição gradual através do combustível

Outra via emergente é a transição tecnológica gradual, centrada na reconversão de motores de combustão interna para combustíveis limpos, nomeadamente a hidrogénio e combustíveis alternativos. “*O problema das emissões não é o motor em si, é o combustível*” (SinterCast). “*Este modelo permite reduzir emissões sem substituir toda a frota, aproveitando a base instalada de veículos e oficinas*” (SinterCast; TJA).

A reconversão é particularmente atrativa para operadores com margens estreitas, pois reduz o investimento inicial e preserva a rede de pós-venda existente. “*Parece-nos muito mais viável (...) porque vai manter a estrutura de pós-venda*” (TJA). Além de acelerar a adoção tecnológica, esta estratégia serve como ponte entre o modelo fóssil e a mobilidade a hidrogénio com célula de combustível (FCEV), funcionando como fase intermédia de aprendizagem e de redução de risco.

4.5 Estratégias de viabilização

A análise das entrevistas, evidencia que a viabilização da mobilidade pesada com hidrogénio verde (H₂V) em Portugal, depende de estratégias de coordenação e escala, que permitam ultrapassar a barreira que existe entre a oferta e a procura.

Centralização da procura e coordenação territorial

Uma das vias mais referidas é a coordenação centralizada da procura pública. “*Entidades como a ESPAP podem ter um papel estruturante ao centralizar especificações e realizar compras conjuntas para vários utilizadores*” (CIM Médio Tejo). Tal mecanismo permitiria criar massa crítica nacional, especialmente em frotas públicas, como é o caso da RSU, transporte urbano e regional, tornando o investimento em veículos e infraestrutura economicamente justificável, conforme indicado pelos interlocutores da MAN Trucks e Caetano Bus.

Esta abordagem também reforçaria a previsibilidade da procura, condição essencial para atrair fabricantes e operadores de rede. No entanto, subsistem limitações operacionais e geográficas: “*Cada transportador compra o seu tipo de veículos. Uns transportam combustível, outros bens*

alimentares” (MAN Trucks). Além disso, “(...) *distribuir poucas viaturas de hidrogénio por múltiplos pontos do país obriga o fabricante a montar várias estruturas de assistência ao mesmo tempo, o que é logisticamente frágil*” (MAN Trucks). Assim, a coordenação nacional deve ser acompanhada de planeamento regional, de forma a concentrar a adoção em polos territoriais com capacidade para gerar economias de escala e justificar a criação de oficinas, postos e serviços especializados.

Abordagem faseada e escalável

Os projetos em curso seguem uma abordagem incremental, combinando prudência técnica com expansão faseada. “*Começam com um núcleo pequeno (...), num ambiente controlado e depois, vão crescendo*” (Anónima).

Esta metodologia reduz o risco inicial e permite ajustar a operação à medida que o contexto regulatório e financeiro evolui. Muitas iniciativas já preveem “(...) *aumento da capacidade do eletrolisador e venda do excedente de hidrogénio, quer para mobilidade externa quer para injeção em rede*” (Anónima).

A utilização de postos móveis temporários (Figura B.4 - Anexo B), constitui outro instrumento tático para acelerar o arranque, evitando atrasos causados pela morosidade de licenciamento (Anónima; PRF). Em conjunto, estas práticas refletem uma estratégia de aprendizagem contínua e consolidação gradual do ecossistema nacional de hidrogénio.

4.6 Síntese dos resultados empíricos

A adoção do H₂V no transporte pesado em Portugal é condicionada por fatores económicos, tecnológicos, institucionais e políticos interdependentes, exigindo coordenação entre níveis de decisão. Os custos elevados e a ausência de mercado criam um “dilema ovo–galinha”, também identificado pela IEA (2022): sem infraestrutura não há procura e sem procura não há investimento. As barreiras regulatórias, caracterizadas por ausência de normas técnicas, licenciamentos lentos e instabilidade legislativa, travam a passagem de projetos-piloto a

operações comerciais e desincentivam o investimento privado, o que confirma os estudos e conclusões da IEA (2025): a dependência de apoio público é estrutural. Sem financiamento estatal, a descarbonização avança lentamente, mas essa dependência expõe o setor a riscos políticos e orçamentais. Do lado da procura verifica-se uma contradição, pois há consciência ambiental, mas resistência aos custos adicionais, faltando sinais económicos eficazes para a desenvolver (taxas de carbono, incentivos). Destacam-se ainda modelos territoriais integrados, que reduzem riscos e testam soluções locais. Verificam-se também tensões entre atores, pois a indústria exige estabilidade e planeamento, os operadores pedem incentivos diretos e o Estado é visto como simultaneamente facilitador e entrave burocrático.

5. Conclusões

O presente estudo teve como objetivo analisar os fatores que influenciam a reduzida adoção do hidrogénio verde H₂V pelos transportes pesados rodoviários e propor estratégias para mitigar as barreiras e acelerar a sua implementação. Com base nos resultados discutidos no capítulo anterior, foram alcançados os objetivos de: (1) Analisar os principais fatores técnicos, económicos e regulatórios que influenciam a adoção do H₂V; (2) Identificar as barreiras que limitam a viabilidade comercial do H₂V no setor; (3) Mapear e caracterizar políticas e modelos de negócio existentes, ou em desenvolvimento, com potencial para aplicação no contexto português propondo recomendações para a sua implementação.

Principais Fatores

- **Económicos:** Custos de produção; Competitividade com combustíveis alternativos; Custo dos veículos; Investimento em infraestrutura.
- **Tecnológicos e Operacionais:** Maturidade tecnológica; Ciclo de vida e fiabilidade; Conhecimento técnico.
- **Industriais e Logísticos:** Capacidade da rede elétrica; Armazenamento e transporte de hidrogénio.

- **Regulatórios e Institucionais:** Processos de licenciamento e estabilidade legislativa e regulatória.

Barreiras

As principais barreiras são estruturais e sistêmicas, combinando fatores económicos, tecnológicos e regulatórios. O elevado custo da eletricidade e da eletrólise mantêm o H₂V pouco competitivo face a outros combustíveis, agravado pelo elevado investimento em veículos e infraestrutura. A reduzida dimensão do mercado e a ausência de um ecossistema técnico-operacional consolidado, limitam a confiança dos operadores, perpetuando o ciclo de bloqueio entre oferta e procura identificado pela (IEA 2022). Persistem incertezas e atrasos na regulamentação, morosidade no licenciamento e instabilidade nos programas de financiamento. O Estado é visto simultaneamente como facilitador essencial e entrave burocrático.

Oportunidades

A aceleração da transição energética europeia e as metas de descarbonização reforçam o papel estratégico do H₂V na mobilidade pesada. A valorização do carbono e penalizações às emissões podem tornar o H₂V competitivo. Projetos integrados, como os *Hydrogen Valleys*, permitem testar soluções locais e reduzir riscos. A centralização da procura pública, via compras conjuntas e renovação de frotas municipais, pode gerar massa crítica e atrair investimento.

Políticas Públicas

As políticas públicas são decisivas, mas o desalinhamento entre ambição e execução, falta de continuidade e ausência de regulamentação, reflete-se em atrasos e trava os projetos. É necessária uma governação mais coordenada, com processos simplificados, previsibilidade e instrumentos financeiros estruturais, enquanto a evolução do mercado nacional de carbono se torna crucial como mecanismo económico de suporte.

Modelos de Negócio

Os modelos de negócio são mais uma via para viabilizar o setor, destacando-se:

- **Integração vertical** - produção, armazenamento e consumo sob a mesma entidade.
- **Parcerias público-privadas** - partilha de risco e investimento entre agentes económicos públicos e privados, em particular para o desenvolvimento da infraestrutura.
- **Modelos de transição (H₂ICE)** - adaptação de motores para reduzir emissões.
- **Hydrogen-as-a-Service (HaaS)** - hidrogénio como serviço, com pagamento por uso, reduzindo investimento direto ou, num âmbito mais restrito, “*Pay per Km*”.

Estes formatos promovem coordenação intersectorial e transformação da inovação em soluções de mercado sustentáveis.

Recomendações

Com base nas conclusões obtidas, fazem-se as seguintes propostas:

- Estabilizar o enquadramento regulatório e concluir o regulamento técnico de abastecimento, reduzindo a incerteza para investidores.
- Desenvolver o mercado nacional de carbono, criando um sinal de preço efetivo para as emissões evitadas.
- Criar mecanismos de apoio contínuos (subsídios operacionais, incentivos fiscais e contratos de diferença) que mitiguem o diferencial de custo face ao gasóleo.
- Fomentar modelos de negócio inovadores, nomeadamente o *Hydrogen-as-a-Service* e as Parcerias Público-Privadas (PPP). A adaptação do “*Business Model Canvas*” (Osterwalder and Pigneur 2010) pode ser visto nos Quadros C.2 e C.3 (Anexo C).
- Centralizar a procura pública e apoiar projetos territoriais integrados (*Hydrogen Valleys*) que articulem produção e consumo local.
- Reforçar a coordenação institucional entre entidades públicas e privadas, assegurando coerência e previsibilidade na execução das políticas.

Contribuição para o Conhecimento

Este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a transição energética nos transportes pesados em Portugal, ao oferecer uma visão integrada dos fatores técnicos, económicos e institucionais que condicionam a adoção do hidrogénio verde (H₂V). Empiricamente, revela perceções inéditas dos principais atores da cadeia de valor, evidenciando barreiras sobretudo económicas e regulatórias. Teoricamente, aprofunda a discussão sobre modelos de negócio para a mobilidade sustentável, destacando a integração vertical, as parcerias público-privadas e o modelo *Hydrogen-as-a-Service* como mecanismos de mitigação de risco e estímulo à oferta e à procura. Em termos de aplicabilidade, propõe recomendações que articulam política pública e inovação empresarial, sublinhando o papel do mercado de carbono, da coordenação institucional e da procura pública centralizada, como catalisadores da viabilização do H₂V em Portugal.

Limitações do estudo

O estudo apresenta limitações inerentes à sua natureza qualitativa e ao carácter emergente do hidrogénio verde em Portugal. O número reduzido de entrevistas e a amostragem intencional limitam a generalização, enquanto a rápida evolução tecnológica e regulatória condiciona a atualidade das conclusões. A falta de dados quantitativos sobre custos e desempenho dos projetos-piloto dificulta comparações entre modelos de negócio. Ainda assim, o estudo constitui uma base relevante para futuras investigações e para o desenvolvimento de políticas públicas de apoio à viabilização do H₂V nos transportes pesados

Sugestões para Investigação Futura

Foram identificados três fatores decisivos para a viabilidade do H₂V no transporte pesado: o custo da eletricidade, responsável por 50–60% do custo nivelado do hidrogénio (LCOH); o mercado de carbono, que molda a perceção económica e a procura; e o financiamento público, essencial para viabilizar produção e adoção tecnológica. Futuras investigações deverão explorar o impacto combinado destes fatores na competitividade e sustentabilidade do H₂V em Portugal.

Bibliografia

- Assembleia da República. 2025. *PNEC 2030 Atualização de 2025 - Resolução Da Assembleia Da República n.o 127/2025 | DR. Diário Da República, 1a Serie, No 71 de 10/04/2025*. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-assembleia-republica/127-2025-914597185>.
- Bocken, N. M.P., S. W. Short, P. Rana, and S. Evans. 2014. A Literature and Practice Review to Develop Sustainable Business Model Archetypes. *Journal of Cleaner Production* 65 (February):42–56. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.039.
- Borge-Diez, David, Jay Zarnikau, Eugeniusz Mokrzycki, and Lidia Gawlik. 2024. The Development of a Green Hydrogen Economy: Review. doi:10.3390/en17133165.
- Conselho de Ministros. 2019. *Roteiro Para a Neutralidade Carbónica (RNC 2050) - Resolução Do Conselho de Ministros n.o 107/2019*. Diário da República. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/107-2019-122777644>.
- DaSilva, Carlos M., and Peter Trkman. 2014. Business Model: What It Is and What It Is Not. *Long Range Planning* 47 (6). Pergamon:379–389. doi:10.1016/J.LRP.2013.08.004.
- Fragiacomo, Petronilla, Matteo Genovese, Francesco Piraino, Francesco Massari, and Mehrdad Boroomandnia. 2024. Analysis of a Distributed Green Hydrogen Infrastructure Designed to Support the Sustainable Mobility of a Heavy-Duty Fleet. *International Journal of Hydrogen Energy* 51 (January). Elsevier Ltd:576–594. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.08.047.
- Geissdoerfer, Martin, Doroteya Vladimirova, and Steve Evans. 2018. Sustainable Business Model Innovation: A Review. *Journal of Cleaner Production* 198 (October). Elsevier:401–416. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.240.
- IEA. 2022. *Global Hydrogen Review 2022*. www.iea.org/t&c/.
- IEA. 2025. *Global Hydrogen Review 2025 – Analysis - IEA*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>.
- Kluschke, Philipp, Till Gnann, Patrick Plötz, and Martin Wietschel. 2019. Market Diffusion of Alternative Fuels and Powertrains in Heavy-Duty Vehicles: A Literature Review. *Energy Reports* 5 (November). Elsevier:1010–1024. doi:10.1016/J.EGYR.2019.07.017.
- Kramer, Ulrich, David Bothe, Christoph Gatzen, André Pfannenschmidt, Carolin Baum, Fabian Schrogl, and Osama Mahmood. 2022. FVV_H1313_1452_Future Fuels_FVV Fuel Study IVb_2022.
- Küffner, Christoph. 2022. Multi-Level Perspective for the Development and Diffusion of Fuel Cell Heavy-Duty Trucks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 111 (October). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.trd.2022.103460.
- Laguipo, Jochelle, Conor Forde, and James G. Carton. 2022. Enabling the Scale up of Green Hydrogen in Ireland by Decarbonising the Haulage Sector. *International Journal of Hydrogen Energy* 47 (63). Elsevier Ltd:26812–26826. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.06.053.
- Lai, Xinyi, Jijia Yang, Fushuan Wen, and Zhao Yang Dong. 2025. Operational Economics of Renewable Energy-Hydrogen System With Hydrogen-Powered Transportation. *IEEE Transactions on Smart Grid* 16 (1). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.:718–727. doi:10.1109/TSG.2024.3465505.

- Larson, Paul D, Robert V Parsons, and Deepika Kalluri. 2024. Zero-Emission Heavy-Duty, Long-Haul Trucking: Obstacles and Opportunities for Logistics in North America. doi:10.3390/logistics8030064.
- Lei No98/2021 de 2021-12-31. *Lei de Bases Do Clima*. 2021. *Diário Da República, 1a Série*.
- Nowell, Lorelli S., Jill M. Norris, Deborah E. White, and Nancy J. Moules. 2017. Thematic Analysis: Striving to Meet the Trustworthiness Criteria. *International Journal of Qualitative Methods* 16 (1). SAGE Publications Inc. doi:10.1177/1609406917733847/ASSET/E3E580C8-AF29-4F8E-A810-D37473EEEE85/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_1609406917733847-FIG4.JPG.
- Osterwalder, Alexander, and Yves Pigneur. 2010. *Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, And ...* https://vace.uky.edu/sites/vace/files/downloads/9_business_model_generation.pdf.
- Presidência do Conselho de Ministros. 2020. *Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2) - Resolução do Conselho de Ministros no 63/2020*. Diário da República. <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2020/08/15800/0000700088.pdf>.
- Raeesi, Ramin, Christa Searle, Nazmiye Balta-Ozkan, Laura Marsiliani, Mi Tian, and Philip Greening. 2024. Hydrogen Supply Chain and Refuelling Network Design: Assessment of Alternative Scenarios for the Long-Haul Road Freight in the UK. *International Journal of Hydrogen Energy* 52 (January). Elsevier Ltd:667–687. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.03.474.
- Roy, Riya, Giorgio Antonini, Koami S. Hayibo, Md Motakabbir Rahman, Sara Khan, Wei Tian, Michael S.H. Boutilier, Wei Zhang, Ying Zheng, Amarjeet Bassi, et al. 2025. Comparative Techno-Environmental Analysis of Grey, Blue, Green/Yellow and Pale-Blue Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy* 116 (April). Pergamon:200–210. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2025.03.104.
- Sairanen, Mikko, and Leena Aarikka-Stenroos. 2024. Low-Carbon Business Models: Review and Typology. *Industrial Marketing Management* 123 (November). Elsevier Inc.:222–250. doi:10.1016/J.INDMARMAN.2024.10.001.
- Saunders, Mark, Philip Lewis, and Adrian Thornhill. 2019. *Research Methods for Business Students*. Edited by Pearson Education Limited. 8th ed. Harlow.
- Shadidi, Behdad, Gholamhassan Najafi, and Talal Yusaf. 2021. A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines. *Energies* 14 (19). MDPI. doi:10.3390/EN14196209.
- Trapp, Caledonia T.C., Dominik K. Kanbach, and Sascha Kraus. 2022. Sector Coupling and Business Models towards Sustainability: The Case of the Hydrogen Vehicle Industry. *Sustainable Technology and Entrepreneurship* 1 (2). doi:10.1016/j.stae.2022.100014.
- Zhao, Guangling, Eva Ravn Nielsen, Enrique Troncoso, Kris Hyde, Jesús Simón Romeo, and Michael Diderich. 2019. Life Cycle Cost Analysis: A Case Study of Hydrogen Energy Application on the Orkney Islands. *International Journal of Hydrogen Energy*, April. Elsevier Ltd, 9517–9528. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.08.015.
- Zott, Christoph, Raphael Amit, and Lorenzo Massa. 2011. The Business Model: Recent Developments and Future Research. *Journal of Management* 37 (4). SAGE PublicationsSage CA: Los Angeles, CA:1019–1042. doi:10.1177/0149206311406265.

ANEXOS

Anexo A – Mercado H₂ V nos Transportes pesados

Postos de Abastecimento

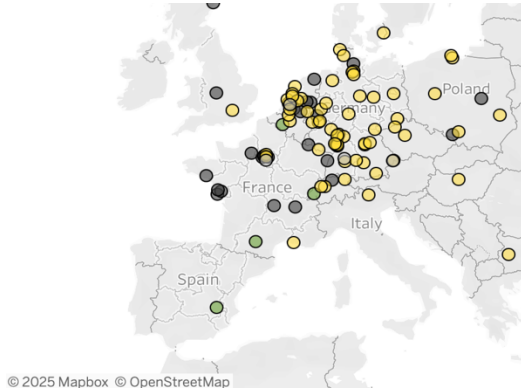


Figura A.1. Localização dos postos de abastecimento públicos de H₂ para veículos pesados na EU+UK (2025)

Fonte: European Hydrogen Observatory

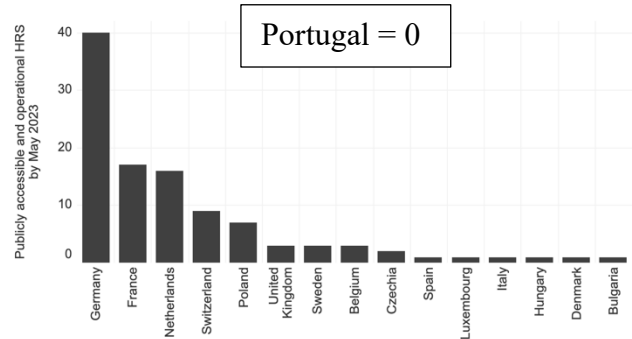


Figura A.2. Nº de postos de abastecimento públicos para veículos pesados em países da EU+UK (2023)

Fonte: European Hydrogen Observatory

Veículos

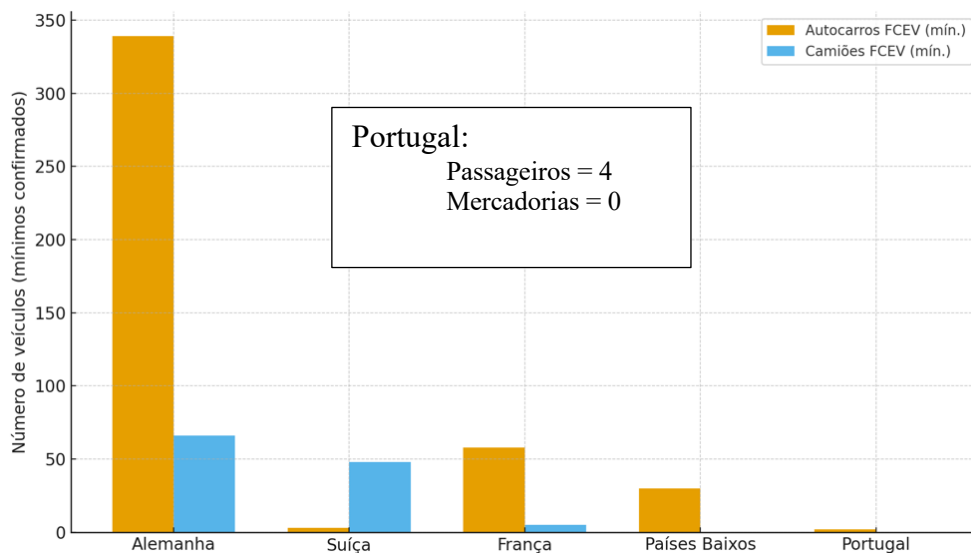


Figura A.3. Veículos Pesados FCEV a Hidrogénio –Mínimos Confirmados por País

Fonte: Elaboração própria.

Quadro A.1. Projeções da evolução da tecnologia de energias renováveis em Portugal com base nas políticas e medidas existentes (cenário World Energy Model-WEM) no setor dos transportes (Ktep)

	2025	2030	2035	2040
Biocombustíveis 1.ª geração*	53	57	0	0
Biocombustíveis avançados**	357	392	516	835
Hidrogénio renovável	0	3	29	72
Eletricidade	105	182	357	647
Total ⁵⁶	515	634	902	1 554

Fonte: PNEC 2030, pág. 206 . DR 71 de 10/04/2025.

Quadro A.2. Veículos pesados à venda em Portugal (Setembro 2025)

Autocarros em Portugal

Tipo de Combustível	Renováveis - Redução de CO2				CO2=0	
	Fóssil	HVO / Biodiesel	GNL / Bio-GNL	H2-ICE	BEV	H2-FCEV
Fabricante / Marca	Diesel	HVO / Biodiesel	GNL / Bio-GNL	H2-ICE	BEV	H2-FCEV
CaetanoBus (Portugal)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	e.City Gold (já comercial, usado em PT e exportado)	H2.City Gold (já comercial, em operação em várias cidades)
Mercedes-Benz (Daimler Buses)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	eCitaro (já em operação na Europa)	eCitaro Fuel Cell (lançado 2023, disponível em PT via Daimler)
Scania	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gama BEV	Em desenvolvimento
MAN	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Lion's City E (já em operação na Europa, início em PT)	Protótipo fuel cell em desenvolvimento
Volvo Buses	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7900 Electric (algumas unidades em PT)	Sem previsão
Solaris (Grupo CAF)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Urbino Electric (já fornecido a operadores em PT)	Urbino 12 Hydrogen (já disponível, alguns projetos na Europa Ocidental)
Irizar (Espanha)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Irizar ie bus / ie tram (em operação em Lisboa e Cascais)	Protótipos fuel cell em desenvolvimento
BYD (China)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gama completa BEV (autocarros em operação na Carris e privados)	Protótipos fuel cell em fase inicial
Yutong (China)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Gama BEV já em Portugal (unidades em operadores privados)	U12 Fuel Cell (comercial, mas ainda não em Portugal)

- = disponível atualmente
 = não disponível / sem aposta significativa

Camiões em Portugal

Tipo de Combustível	Renováveis - Redução de CO2				CO2=0	
	Fóssil	HVO / Biodiesel	GNL / Bio-GNL	H2-ICE	Elétrico a bateria (BEV)	H2-FCEV
Fabricante / Marca	Diesel	HVO / Biodiesel	GNL / Bio-GNL	H2-ICE	Elétrico a bateria (BEV)	H2-FCEV
Mercedes-Benz (Daimler Truck)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	eActros LongHaul (2025)	GenH2 Truck (protótipo)
Volvo Trucks	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	FH Electric (já disponível)	Protótipos (lançamento ~2030)
Scania	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	BEV de longo curso (2024-26)	Protótipos, mas aposta maior em BEV
MAN	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	BEV longo curso em lançamento	Protótipos / estudo
DAF	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	XF Electric (curto/médio curso, em evolução)	Protótipos fuel cell
IVECO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	IVECO/Nikola Tre BEV	Nikola Tre FCEV (pré-comercialização)
Renault	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	E-Tech T	Protótipos/Estudo

- = disponível atualmente
 = não disponível / sem aposta significativa

Fonte: Elaboração própria

Anexo B – Tecnologia

Produção de Hidrogénio Verde

Preto/Castanho	Fonte de Energia: Carvão / Lenhite Feedstock: Carvão / Lenhite Tecnologia : Gaseificação do Carvão Impacto : Muito poluente. Muito altas emissões CO2
Cinzento	Fonte de Energia: Gás Natural Feedstock: Gás Natural Tecnologia: Reformação do Metano sem captura de carbono (CCS) Impacto: Altas emissões de CO2
Azul	Fonte de Energia: Gás Natural ou outros combustíveis fósseis Feedstock: Gás Natural Tecnologia : Reformação de Metano com captura de carbono (CCS) Impacto: Baixas emissões de CO2 se CCS eficaz
Turquesa	Fonte de Energia: Combustível Fóssil Feedstock: Gás Natural Tecnologia: Pirólise do Metano com captura de carbono (CCS) Impacto: Baixas emissões de CO2
Rosa	Fonte de Energia: Electricidade de origem nuclear Feedstock: Gás natural Tecnologia: Reformação de Metano com captura de carbono (CCS) Impacto: Muito baixas emissões de CO2
Amarelo	Fonte de Energia: Electricidade de origem fotovoltaica Feedstock: Gás natural Tecnologia: Reformação de Metano com captura de carbono (CCS) Impacto: Zero emissões de CO2
Verde	Fonte de Energia: Electricidade de origem renovável. Feedstock: Água Tecnologia: Electrólise da Água Impacto: Zero emissões de CO2

Figura B.1- As cores do hidrogénio

Fonte: Elaboração própria.

Quadro B.1. Tipos de combustível para grupos motopropulsores de veículos pesados

	AFP	Origem	Motores	Emissão de CO2
Diesel	Diesel	Fóssil	Combustão Interna	S/ Redução de CO2
LPG	Butano, Propano ou Mistura	Fóssil	Combustão Interna	Redução de CO2
CNG	Gás Natural Comprimido (Metano)	Fóssil	Combustão Interna	Redução de CO2
LNG	Gás Natural Liquefeito (Metano)	Fóssil	Combustão Interna	Redução de CO2
HYB/CAT	Diesel + Electricidade	Fóssil + Renovável	Comb.Interna+Eléctrico	Redução de CO2
Biodiesel	(FAME- Fatty Acid Methyl Esters)	Renovável	Combustão Interna	Neutros em CO2
HVO	Óleo Vegetal Hidrotornado	Renovável	Combustão Interna	Neutros em CO2
Biometano (Bio-CNG;Bio-LNG)	Biogás (resíduos organicos purificados)	Renovável	Combustão Interna	Neutros em CO2
e-SYN	Electricidade Verde-> H2Verde + CCO2	Renovável	Combustão Interna	Neutros em CO2
H2	Hidrogénio Verde	Renovável	Combustão Interna	Zero CO2
FCEV	Hidrogénio Verde + Electricidade	Renovável	Eléctricos	Zero CO2
BEV	Electricidade	Renovável	Eléctricos	Zero CO2

Fonte: Elaboração própria

Veículos



Figura B.2. Autocarros com tecnologia FCEV, modelo H2.City Gold da Caetano Bus – Vila Nova de Gaia

Fonte: Fotografias do autor



Figura B.3. Camião MAN com tecnologia FCEV para transporte de mercadorias.

Fontes: www.truckandbusbuilder.com, www.man.eu



Figura B.4. Posto de Abastecimento móvel.

Fonte: www.prf.pt

Quadro C.1- Modelos de Negócio propostos para acelerar a adoção do H2V nos transportes pesados em Portugal.

Modelo de Negócio	Criação de Valor	Disponibilização de Valor	Entrega de Valor	Captura de Valor
Parcerias Público-Privadas (PPP)	Desenvolvimento de infraestruturas de abastecimento de H ₂ V em regime de partilha de risco e de benefício. Aumentar a segurança do investimento privado através de garantias públicas, concessões ou contratos de longo prazo. Valor público: redução de emissões, criação de emprego e incorporação nacional de inovação tecnológica	Através dos canais institucionais : concursos públicos, concessões e consórcios. O governo e as entidades municipais e intermunicipais funcionam como facilitadores da procura (ex. frota municipais, transporte público).	A operação das estações de abastecimento é feita sob gestão privada, com investimento inicial partilhado. A infraestrutura é pública.	Para o Estado: Recetas de concessão e partilha das margens de fornecimento. Para os privados - Eventuais incentivos ao Capex, partilha das margens de fornecimento de H ₂ V. Margens moderadas nas estações, com partilha de riscos regulatórios e de mercado. O estado como parte interessada agiliza processos regulatórios e de licenciamento.
Acoplamento Setorial (Setor Eléctrico + Mobilidade + Indústria)	Utilização de excedentes elétricos renováveis, para produzir H ₂ V destinado a transportes, evitando o desperdício energético e promovendo a flexibilidade do Sistema Eléctrico Nacional (SEN) e a estabilidade da rede eléctrica. Valor ambiental por evitar desperdícios de energia eléctrica. Valorização de sinergias entre energia, mobilidade e indústria.	Parcerias verticais entre operadores de energia eléctrica, produtores de H ₂ e operadores de transportes. Contratos bilaterais "Power Purchase Agreement" (PPA) de H ₂ V.	Integração tecnológica entre electrólise, armazenamento transporte e abastecimento. Gestão otimizada da produção, conforme preço spot de electricidade e procura de H ₂ V.	Modelos híbridos de receita - venda de H ₂ V e de serviços de flexibilidade à rede eléctrica.
Joint Ventures (JV)	Combinação de competências complementares do tipo: produtor de energia renovável, produtor de H ₂ V (podem ser um só), operador de transportes e fabricante de veículos. Reduz riscos individuais e acelera o "time-to-market".	Lançamento conjunto de soluções integradas (veículo + combustível + manutenção). Novos mercados através do acesso a redes dos fabricantes de veículos (OEM's) e reputação dos parceiros.	Partilha de ativos e de recursos operacionais (produção eléctrica, electrólisadores, frota). Estrutura de "governance" partilhada, com centros de competência especializados em produção, operação e comercialização.	Partilha proporcional dos lucros em função do investimento e do valor acrescentado ao consórcio. Minigação dos riscos tecnológicos.
Frotas Localizadas	Oferta de H ₂ V em locais onde a concentração de veículos e rotas previsíveis permite economia de escala (ex. portos, zonas industriais, parque logísticos, cidades / municípios). Redução das emissões de CO ₂ e GEE.	Acordos B2B diretos com operadores de frotas. Contratos de fornecimento garantido e planos de transição energética personalizados.	Estações de abastecimento dedicadas. Logística simplificada e operação otimizada devido à previsibilidade do consumo.	Receta por volume de H ₂ V fornecido, previsível. Margens mais elevadas devido à eficiência logística.
Pay-per-Km	Elimina o CAPEX inicial de construção de infraestrutura e aquisição dos veículos. O cliente paga apenas pelo uso (€/km ou €/ton transportada).	Oferta através de contratos de "Mobility-as-a-Service" mobilidade como serviço. Canais digitais de monitorização e faturação por quilómetros.	Integração de sensores e plataformas de telemetria para medição e cobrança. Parceria com empresas de leasing e operadores logísticos para gestão da frota.	Receta variável por km percorrido ou ton entregue. Monetização previsível. Margem baseada no uso.
Hydrogen-as-a-Service (Haas)	Destina-se a clientes corporativos que pretendam descartonar operações sem complexidade técnica. Oferta integrada de produção, abastecimento e manutenção, sem necessidade de investimento (Capex) pelo cliente.	Contratos de fornecimento "clear-as-a-need" com base em Service Level Agreements (SLA's). Plataformas digitais para gestão do consumo e performance energética.	Operação "end-to-end" de toda a cadeia (produção, transporte, abastecimento e manutenção). Forte base tecnológica.	Receta por assinatura ou por Km percorrido, ou por H ₂ V fornecido. Modelo previsível e escalável.
Reconversão de Veículos a Diesel	Os clientes alvo são os operadores de transporte com frotas existentes. Reduz os custos de transição energética. Prolonga a vida útil dos veículos.	Oferta através de oficinas certificadas ou OEM's. Comunicação centrada no TCO (Total Cost of Ownership) e no Payback rápido.	Tecnologia de conversão modular (kits de conversão). Cadeia de fornecimento de kits e certificação técnica.	Monetização com contratos de manutenção por conversão e manutenção. Margens elevadas nas fases iniciais, mas mercado finito.

Fonte: Elaboração própria.

Quadro C.2. Modelo de Negócio PPP para Rede de Postos de Abastecimento

Valor para o Cliente (Customer Value Proposition)	Estratégia para o Mercado (Go-to-Market)
<ul style="list-style-type: none"> Cientes-alvo: Operadores de transporte de mercadorias, autocarros municipais, frotas RSU Problema: Disponibilidade de H₂V para abastecer frotas de pesados Solução: Disponibilizar rede pública interoperável de abastecimento de H₂V com acesso universal Preço: Baseado em contratos de longo-prazo entre investidores, produtores e operadores. Variáveis de operador para operador, os quais estabelecem com os clientes frotistas contratos com quantidades mínimas (“take or pay”) e preços anuais garantidos. 	<ul style="list-style-type: none"> Canal de distribuição: 3 fases. 1ª- Parques de frotas municipais; 2ª - Hydrogen Valleys; 3ª- Principais eixos rodoviários/ corredores logísticos. Geração de Procura: Contratos-quadro com municípios e operadores logísticos e integração com Cartões de Frota. Razões porque os clientes (frotistas) compram H₂V: <ul style="list-style-type: none"> - Op. de Mercadorias – Redução futura de custos, penalizações de carbono e exigência dos seus clientes (políticas ESG). - Op. de Passageiros – Cumprimento de metas ambientais em contratos de serviço público. Pressão social / política para frotas sustentáveis.
Entrega de Valor (Tech and Operations)	Modelo de Lucro (Profit Formula)
<ul style="list-style-type: none"> Cadeia de Valor: Produção de Eletricidade renovável, Produção de H₂V, Armazenagem, Transporte e Distribuição. Integração Vertical: Todas as actividades da Cadeia de Valor são externalizadas . Propriedade Intelectual: patente para marca própria e Kits de abastecimento Posicionamento: Garante a entrega de H₂V em todo o território nacional, com tecnologia standard, fiável e acessível. Diferenciação: Contratos individuais com operadores, com acesso a toda a rede. 	<ul style="list-style-type: none"> Monetização /Precificação: tarifas de abastecimento (€/Kg), fee de acesso, contratos take or pay com operadores de transporte, subsídios indexados ao preço da electricidade (top-up) TAM: 600.000 ton/ano ; TOM: 240.000 ton/ano Estrutura de Custos: Capex -terreno, c. civil, equipamento; Opex-energia, água, manutenção, operação Drivers de Lucro: Volume de H₂V; preço da electricidade, subsídios públicos

Fonte: Elaboração própria

Quadro C.3. Modelo de Negócio "Pay per Km" (Hydrogen-as-a-Service)- Serviços de Mobilidade

Valor para o Cliente (Customer Value Proposition)	Estratégia para o Mercado (Go-to-Market)
<ul style="list-style-type: none"> Cientes-alvo: Operadores de transporte de mercadorias, autocarros municipais, frotas RSU, frotas empresariais com metas ESG. Problema: Investimento em veículos a H₂V e infraestrutura para abastecimento. Know how para construção e operação da infraestrutura e da gestão da cadeia de valor. e Risco tecnológico. Solução: OEM's disponibilizam serviço integrado (veículo +seguros + H₂V + infraestrutura de abastecimento + manutenção de ambos, com contrato mínimo de 8 anos.. Risco tecnológico, operacional e financeiro fica a seu cargo . Capex por conta das OEM. Preço: Preço por Km percorrido, com uma base mínima anual em regime take or pay, revisto anualmente. 	<ul style="list-style-type: none"> Canal de distribuição: Venda direta (B2B) a operadores de transporte e frotas empresariais. Plataforma digital ou portal. Parcerias com OEM's.Campanhas ESG. Razões porque os clientes aderem a este modelo: Zero investimento inicial. Custo variável. Manutenção, abastecimento e fiabilidade. Km's 100% zero emissões. Acesso à frota mais avançada do mercado. Cumpre metas de ESG. Sem risco financeiro. Sem risco tecnológico. Foco no core business.
Entrega de Valor (Tech and Operations)	Modelo de Lucro (Profit Formula)
<ul style="list-style-type: none"> Cadeia de Valor: Fornecimento de H₂V, construção da infraestrutura, fornecimento de veículos. Integração Vertical: Fornecimento de H₂V, construção e fornecimento e manutenção de equipamentos em consórcio ou outsourcing. Fornecimento de veículos e sua manutenção “in house”. Propriedade Intelectual: Tecnologia dos Veículos Posicionamento: Mobilidade pesada, descarbonizada como serviço. Diferenciação: Transforma o H₂V num serviço integrado de mobilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> Monetização /Precificação: Tarifa/Km, serviços de gestão da frota, incluindo “reporting” para ESG, certificação de emissões, telemetria. Pagamento mensal. TAM ⁽¹⁾: 7.300 MKm/ano; TOM ⁽²⁾: 7.200 MKm/ano Estrutura de Custos: Variáveis - H₂V, Logística, manutenção dos veículos, manutenção e operação das HRS. Fixos : Capex, seguros, custo financeiro. Pessoal. Sistemas. Depreciação e amortização. Drivers de Lucro: “Network Effect”, margem unitária, Km contratados, custo do H₂V, eficiência dos veículos. <p>⁽¹⁾ 4.000 autocarros @40.000 Km/ano ; 55.000 camiões @130.000 Km/ano ⁽²⁾ 40% autocarros + 100% camiões</p>

Fonte: Elaboração própria

Anexo D – Entrevistas

Mapeamento para design do Guião das Entrevistas

Quadro D.1. Mapeamento entre questões da literatura e o Guião das Entrevistas

Tema / Dimensão	Literatura	Perguntas do Guião
Contexto Organizacional	A literatura sublinha que os papéis dos atores (empresas de energia, operadores de transporte, municípios, etc.) são determinantes na forma como os modelos de negócio se estruturam e evoluem.	1) Quer falar-me um pouco da sua organização - missão, objetivos, principais atividades?
Inovação / Adoção Tecnológica	Estudos destacam a natureza experimental e gradual da adoção do hidrogénio verde, com trajetórias marcadas por barreiras técnicas, regulatórias e financeiras.	2) Como é que tem sido a jornada do hidrogénio? Dificuldades, sucessos, etc.?
Potencial do Mercado / Competitividade	A literatura reconhece o hidrogénio como solução estratégica para descarbonizar os transportes pesados, mas questiona a sua viabilidade face à eletrificação direta (BEV).	3) Como avalia o potencial do hidrogénio verde no sector dos transportes pesados em Portugal?
Procura / Aceitação do Mercado	Vários estudos identificam como: a) Barreiras principais: custo, confiança na tecnologia, infraestrutura, fraca procura. b) Medidas mitigadoras: incentivos, parcerias, contratos de longo prazo.	4) O que faria alterar a procura por veículos pesados movidos a hidrogénio verde?
Modelos de Negócio	Alguns estudos apontam que os modelos de negócio mais promissores envolvem a integração vertical (produção-distribuição-consumo), PPP (Parcerias Público-Privadas), clusters e contratos de aquisição conjunta de veículos.	5) Através da revisão e análise da literatura chega-se à conclusão de que os modelos de negócio que se destacam, são aqueles que combinam projeto integrado de infraestruturas, colaboração público-privada e estratégias de recuperação de custo. Conhece alguns? Qual a sua opinião?
Barreiras e Drivers	A literatura aponta barreiras estruturais e fatores críticos de sucesso (apoios públicos, projetos-piloto, parcerias estratégicas).	6) Pode falar um pouco sobre a sua visão e experiência? Implementação, barreiras, fatores de sucesso.
Modelos de Negócio adaptados ao contexto nacional	Escassez de estudos sobre modelos de negócio aplicáveis à realidade portuguesa.	7) Há algum modelo que considere particularmente viável no mercado português?

Barreiras à adoção	Estudos identificam custos elevados, ausência de infraestrutura, falta de escala, incerteza regulatória e risco tecnológico.	8) Que barreiras considera mais críticas?
Políticas Públicas e Incentivos	A literatura identifica pacotes de incentivos financeiros, fundos europeus, metas obrigatórias.	9) Que tipos de apoio público ou incentivos considera essenciais para viabilizar a adoção do H2 verde?
Oportunidade de Melhoria		10) O que pode melhorar?
Procura - Aceleração	PPP e aprovisionamento conjunto surgem como estratégias de mitigação de risco e aceleração da procura.	11) Como avalia a eficácia das PPP ou compras conjuntas de veículos
Procura - Aceleração	A literatura aponta o papel das empresas em inovar modelos de negócio, investir em I&D e criar procura inicial	12) Como pode o sector privado acelerar a adoção?
Procura - Aceleração	Estudos mostram que pilotos e clusters criam confiança, massa crítica e aprendizagem coletiva, reduzindo o risco.	13) Que papel vê para projetos piloto regionais e clusters logísticos?
Alinhamento modelo de negócio	A literatura evidencia que muitos projetos falham por não integrar a necessidade dos operadores.	14) Que aspetos considera críticos para alinhar modelos de negócio com as necessidades operacionais?

Fonte: Elaboração própria

Guião das Entrevistas

Introdução

- Agradecimentos pela disponibilidade e participação.
- Apresentação da minha pessoa.
- Objetivo: Esta entrevista faz parte de um estudo sobre modelos de negócio inovadores para acelerar a adoção de hidrogénio verde no setor de transporte pesado em Portugal. O seu contributo ajudará a identificar oportunidades, barreiras e estratégias eficazes.
- Processo: Entrevista semiestruturada como método exploratório de recolha de dados primários. Explicar o método, estrutura e duração.
- Confidencialidade e Consentimento: Se nada tiver a opor, o seu nome, cargo e organização farão parte da lista de entrevistas. Caso contrário, o nome será omitido e tanto o cargo como a organização figurarão por categoria e como sector de atividade. O que prefere?

Com o seu consentimento, esta conversa será gravada apenas para fins de análise, respeitando a confidencialidade total. Podemos continuar?

Perfil do Entrevistado / Background

1. Quer falar-me um pouco da sua organização (missão, objetivos, principais atividades).
2. Como é que tem sido a jornada do hidrogénio verde? Dificuldades, sucessos, etc

Percepção do Mercado

3. Como avalia o potencial do hidrogénio verde no sector dos transportes pesados em Portugal?
4. O que faria alterar a procura por veículos pesados movidos a H₂?

Modelos de Negócio e Viabilidade

5. Através da revisão e análise da literatura chega-se à conclusão de que os modelos de negócio que se destacam, são aqueles que combinam projeto integrado de infraestruturas, colaboração público-privada e estratégias de recuperação de custo.
6. Pode falar um pouco sobre a sua visão e experiência. Implementação, barreiras, os fatores de sucesso.
7. Há algum modelo que considere particularmente viável no contexto português? Porquê?
8. Que barreiras considera mais críticas?

Políticas e Incentivos

9. Que tipo de apoios públicos ou incentivos considera essenciais para viabilizar o H₂V?
10. O que pode melhorar?
11. Como avalia a eficácia de parcerias público-privadas ou compras conjuntas de veículos?

Estratégias de Aceleração

12. Como pode o setor privado contribuir para acelerar a adoção?
13. Que papel vê para projetos-piloto, projetos regionais ou clusters logísticos?
14. Que aspetos considera críticos para alinhar modelos de negócio com as necessidades operacionais?

Encerramento

- Tem algum interesse em rever a transcrição da entrevista, ou acompanhar de alguma forma o presente estudo?
- Gostaria de fazer alguma recomendação relativamente ao papel do regulador ou de algum dos “*stakeholders*” da cadeia de valor?
- Agradecimento pela valiosa contribuição.

Anexo E – Jornada de Decisão do Cliente

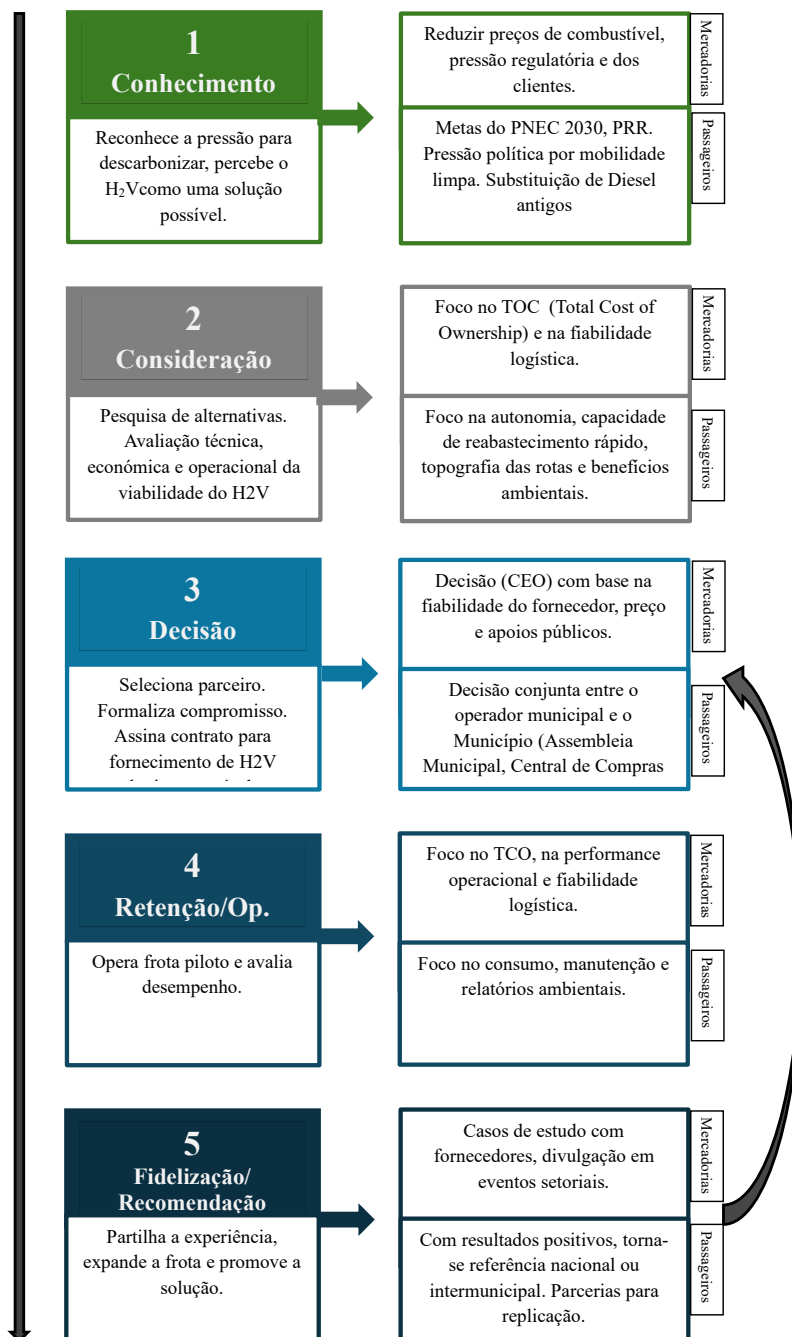


Figura E.1. Jornada de Decisão do Cliente no processo de adoção do H₂V em transportes pesados – Mercadorias e Passageiros (públicos)

Fonte: Elaboração Própria