

O HIDROGÉNIO NA FERROVIA – PROJETO FCH2RAIL

Francisco Ganhão

Infraestruturas de Portugal SA, Almada, Portugal, francisco.ganhao@infraestruturasdeportugal.pt

Patricia Figueira

Infraestruturas de Portugal SA, Almada, Portugal, patricia.figueira@infraestruturasdeportugal.pt

RESUMO: O atual sistema ferroviário está alicerçado em dois sistemas de tração de material circulante: a tração elétrica e a tração a diesel. A tração diesel, em oposição à tração elétrica, é geradora de emissões de GEE, de poluição atmosférica e também de um maior nível de ruído. O Green Deal, estabelecido pela União Europeia, em 2019, tem como principal meta alcançar a neutralidade climática até 2050, definindo, para esse efeito, um conjunto de iniciativas para combater as alterações climáticas e promover a transição para uma economia circular. O uso de hidrogénio com recurso a células de combustível contribuindo para a descarbonização, constitui, portanto, uma solução a explorar enquanto potencial alternativa competitiva ao nível de custos e capacidade de serviço em relação ao diesel. O projeto europeu FCH2RAIL segue este alinhamento e visou combinar as vantagens da tração elétrica por catenária com as de um sistema motopropulsor híbrido de células de combustível de hidrogénio, para vias não eletrificadas, numa unidade múltipla bi-modal. Para além do desenvolvimento do protótipo rolante foram realizados testes de aferição e validação das soluções técnicas subjacentes ao mesmo, desenvolvidas bem como avaliadas o respetivo potencial competitivo relativamente à utilização do uso de comboios a diesel.

PALAVRAS-CHAVE: Comboio, ferrovia, hidrogénio, híbrido, sustentabilidade, descarbonização.

1. Introdução

Atualmente, cerca de metade da rede ferroviária na União Europeia já se encontra eletrificada, permitindo o transporte ferroviário sem emissões locais. Os comboios movidos a combustível fóssil (diesel) são utilizados na restante rede e sempre que um itinerário inclui um troço não eletrificado, a operação fica dependente deste tipo de tração. A eletrificação das linhas ferroviárias exige um investimento significativo, vocacionado, por isso, para linhas de maior rentabilidade, ou seja, linhas de alta densidade de tráfego, não sendo sempre viável, quer do ponto de vista económico, quer da integração no território, condicionada pelas condições geográficas locais. Consequentemente, os serviços maioritariamente afetados por este tipo de condições são os serviços regionais de passageiros, em linhas de baixa densidade de tráfego, e os serviços de mercadorias. Neste contexto, o principal desafio é o desenvolvimento de sistemas de propulsão sem emissões e sem catenária, alternativo aos comboios diesel. Tecnologias como a célula de combustível (FC) possibilitam soluções flexíveis, de emissão locais zero e potencialmente competitivas, em termos económicos, podendo, por isso, constituir uma alternativa aos atuais sistemas de propulsão a diesel. O projeto FCH2RAIL visa combinar as vantagens da tração elétrica por catenária e do sistema motopropulsor híbrido de células de combustível para os troços não eletrificados numa unidade múltipla bi-modal. Deste modo, a substituição do sistema motopropulsor diesel, atualmente utilizado em vias não eletrificadas, por um *Fuel Cell Hybrid PowerPack* (FCHPP), constituído por células de combustível a hidrogénio e baterias, reduzirá significativamente as emissões, permitindo continuar a dispor de um sistema motopropulsor elétrico na mesma unidade múltipla.

O FCH2Rail, financiado pelo Programa Europeu H2020, foi desenvolvido por um consórcio constituído pela CAF, DRL, Toyota, Renfe, Adif, CNH2, IP e Stemann-Technik, com um orçamento de 14 milhões de euros.

2. Objetivos

O principal objetivo do projeto FCH2RAIL é desenvolver e testar um novo protótipo de comboio a células de combustível de hidrogénio com base num novo conceito de *Fuel Cell Hybrid PowerPack (FCHPP)*, também adequado para equipar comboios existentes, contribuindo para os objetivos de descarbonização firmados no Pacto Ecológico (Green Deal).

Para o efeito, o projeto FCH2RAIL definiu cinco objetivos específicos:

Objetivo 1: Desenvolver, construir, testar, demonstrar e homologar um *PowerPack (PP)* híbrido de células de combustível (FCHPP) escalável, modular e multifuncional, aplicável a diferentes utilizações ferroviárias (unidade múltiplas, locomotivas principais e de manobras) também adequado para *retrofit* de comboios elétricos e a diesel existentes, alcançando o TRL7.

Objetivo 2: Demonstrar o *PowerPack* híbrido de células de combustível numa unidade múltipla bi-modal que utiliza uma fonte de energia externa (catenária) em troços eletrificados e um sistema híbrido de células de combustível de hidrogénio como fonte de energia em troços não eletrificados, com o apoio de um sistema inovador de gestão da energia à escala do comboio para minimizar o consumo de energia e de potência.

Objetivo 3: Propor um quadro normativo para a colocação no mercado de comboios que utilizam a propulsão por células de combustível a hidrogénio.

Objetivo 4: Demonstrar a competitividade da tração por células de combustível em relação às soluções diesel existentes.

Objetivo 5: Identificar e aferir soluções inovadoras para melhorar a eficiência energética dos sistemas de tração híbridos com células de combustível.

3. Metodologia

A metodologia subjacente ao desenvolvimento do projeto encontra-se estruturada em torno de 7 eixos apresentados na tabela seguinte:

Tabela I - Metodologia

1 - Especificações e requisitos genéricos do comboio bi-modo
2 - Arquitetura e conceito do comboio alimentado a células de combustível de hidrogénio
3 - Desenvolvimento do FCHPP
4 - Implementação e ensaio do FCHPP
5 - Integração, ensaio e homologação do demonstrador
6 - Demonstração da Competitividade
7 - Quadro normativo

3.1 Eixo 1 – Especificações e requisitos genéricos do comboio bi-modo

Este eixo focou-se no estabelecimento dos requisitos fundamentais para o desenvolvimento de um comboio híbrido bi-modo com célula de combustível, integrando as seguintes etapas:

- Análise de parâmetros da operação e da infraestrutura ferroviária, sendo realizada uma análise abrangente dos serviços ferroviários atuais em países como Espanha, Portugal, Eslováquia e Alemanha, contemplando unidades múltiplas a diesel, locomotivas principais e locomotivas de manobras. O objetivo desta análise foi recolher características operacionais e infraestruturais para informar o design e a funcionalidade do comboio a hidrogénio, tendo sido definidos requisitos específicos de potência, consumo energético e autonomia para garantir compatibilidade com a infraestrutura existente.
- Identificação de casos de uso representativos, identificando e simulando, com base nos dados recolhidos, casos de uso representativos. Estas simulações permitiram avaliar requisitos detalhados para o Fuel Cell Hybrid PowerPack (FCHPP), garantindo a sua compatibilidade e eficiência em diferentes cenários operacionais. De um universo de aproximadamente 1500 serviços ferroviários, foram selecionados 23 casos de uso, sobre os quais foram realizadas simulações pormenorizadas de unidades múltiplas utilizando dados sobre as características dos comboios, da operação (horários) e da infraestrutura.
- Definição de requisitos de alto nível para o comboio a hidrogénio e a sua operação, abrangendo tanto o veículo como a infraestrutura. Este passo garantiu que todos os desafios e necessidades potenciais fossem considerados desde as fases iniciais do desenvolvimento.
- Especificações para o abastecimento e armazenamento de hidrogénio, definindo a infraestrutura necessária e os protocolos para apoiar a adoção generalizada de comboios a hidrogénio.

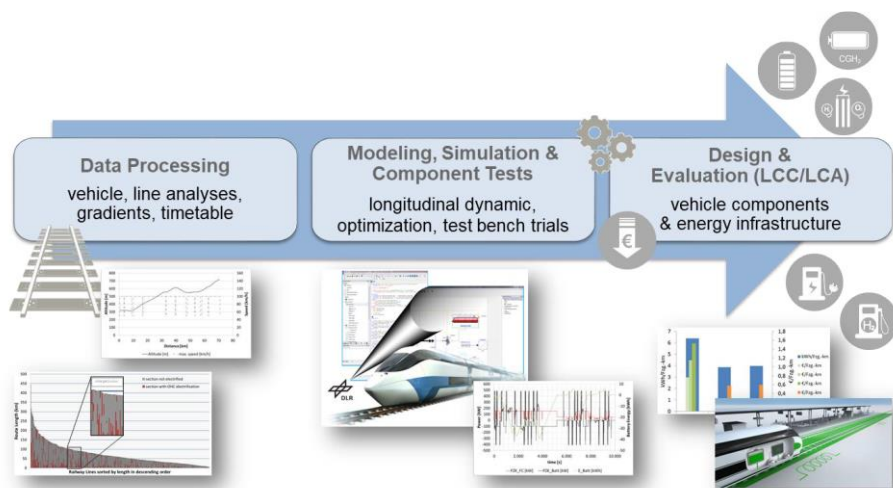


Figura I - Fluxo para estabelecimento das especificações

3.2 Eixo 2 - Arquitetura e conceito do comboio demonstrador alimentado a células de combustível de hidrogénio

O eixo 2 centra-se na integração do FCHPP no comboio demonstrador. Tendo em consideração que o desenvolvimento de um comboio especialmente pensado para ser bi-modo não era exequível no prazo e com o investimento disponível para o projeto, optou-se por utilizar um comboio elétrico já existente e em serviço, tendo a solução para o comboio demonstrador recaído numa unidade CIVIA, da RENFE, identificada na Figura II - Unidade CIVIA (Unidade Tripla Elétrica).



Figura II - Unidade CIVIA (Unidade Tripla Elétrica)

Neste eixo, numa primeira fase, foi realizada a verificação e análise de aplicabilidade das especificações gerais a este comboio demonstrador e, numa segunda fase, foi desenvolvida a arquitetura e as interfaces necessárias para a instalação do FCHPP na plataforma e equipamentos da CIVIA, definindo-se os principais aspetos e códigos de boas práticas a serem considerados para garantir uma integração correta e segura do FCHPP. Foram estudadas e projetadas as necessárias adaptações tanto a nível do FCHPP como a nível do comboio.

3.3 Eixo 3 - Desenvolvimento do FCHPP

Este eixo teve a sua execução a decorrer em paralelo com o eixo 2, para garantir o pleno alinhamento e harmonização do FCHPP e o comboio demonstrador.

Estabeleceu-se como requisitos que o FCHPP seria concebido para ser compatível tanto com novos veículos ferroviários como para o *retrofit* de comboios existentes, incluindo unidades múltiplas com tração elétrica ou a diesel, locomotivas de linha principal e de manobras. Pode também ser utilizado em sistemas de tração bi-modo, em conjunto com a catenária. O conceito de arquitetura subjacente ao FCHPP é ser escalável e modular.

O FCHPP é constituído pelos seguintes componentes:

- Célula de combustível (3 unidades);
- Baterias - OESS (sistema de armazenamento de energia a bordo);
- Conversor DC/DC (eletrónica de potência), permitindo a adaptação a diferentes níveis de tensão;
- DASEM - Sistema de assistência ao maquinista e gestão da energia, responsável pelo controlo inteligente e eficiente de todos os dispositivos;
- Sistema de arrefecimento dos módulos de célula de combustível (3 unidades de alta temperatura e 1 unidade baixa temperatura)
- Sistema de armazenamento de Hidrogénio

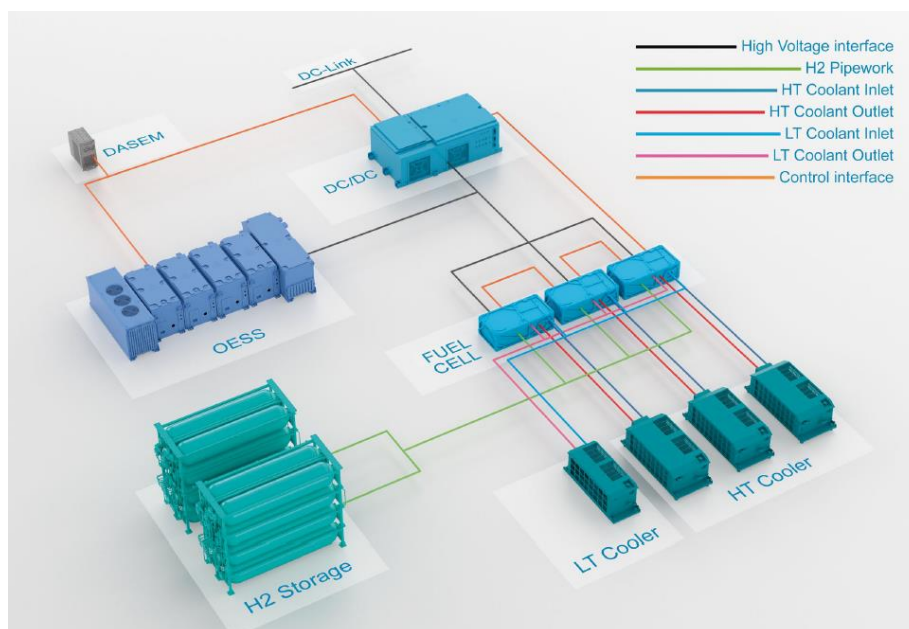


Figura III - Esquema do FCHPP e seus componentes

A escalabilidade do FCHPP é garantida através da variação do número de módulos e de outras características dos subsistemas. O design específico para cada caso de uso depende dos requisitos de potência e consumo energético:

- O consumo médio de energia determina o número de módulos de célula de combustível necessários;
- A potência de pico define o equilíbrio entre baterias e células de combustível;

- A autonomia necessária entre reabastecimentos determina a capacidade do sistema de armazenamento de hidrogénio.

A gestão energética holística permite utilizar o FCHPP em diferentes contextos, garantindo uma operação energeticamente eficiente, reduzindo o consumo de hidrogénio e os custos operacionais dos comboios equipados com este sistema.

3.4 Eixo 4 - Implementação e ensaio do FCHPP

Depois de finalizar a conceção, o fabrico e o ensaio de cada um dos componentes separadamente, foi nesta etapa realizada a primeira montagem do FCHPP, em base laboratorial, com os componentes oriundos de diversas fontes, e realizados os primeiros testes e validações da integração dos componentes. Foram avaliadas a integração mecânica e elétrica, os desempenhos e o correto funcionamento do sistema de hidrogénio em conjunto com o sistema de arrefecimento das células de combustível. Foram nesta fase iniciados também os testes e certificações de segurança necessárias à operação de sistemas de energia com base em hidrogénio.

3.5 Eixo 5 - Integração, ensaio e homologação do demonstrador

Este eixo teve como principal objetivo a modificação e adaptação de um comboio existente para integrar o FCHPP, seguido de testes e gestão das aprovações necessárias para os ensaios dinâmicos em via. As principais etapas foram:

- Modificação do comboio demonstrador, adaptando uma unidade múltipla elétrica existente, fornecida pela RENFE (CIVIA), para incorporar o FCHPP, transformando-a num comboio bi-modo capaz de operar tanto em linhas eletrificadas como não eletrificadas.

A carruagem intermédia transformou-se numa carruagem técnica contendo a maioria dos componentes do FCHPP.

Um dos pontos críticos desta conversão foi a condição da reversibilidade dos trabalhos, na medida em que no final do projeto o comboio terá de retornar à sua forma original e devolvido ao operador.

O projeto final contempla a instalação de dois FCHPP no comboio, de forma a garantir as condições de exploração dos serviços comerciais que se pretenderam simular.

- Testes e validação, realizando testes estáticos e dinâmicos para validar o desempenho do FCHPP no comboio demonstrador. Os testes estáticos foram efetuados nas instalações da CAF em Saragoça para verificar a correta instalação e funcionamento dos sistemas integrados e os dinâmicos foram realizados em vias fechadas e, posteriormente, em linhas da rede ferroviária espanhola e portuguesa.
- Gestão de aprovações, obtendo as autorizações necessárias para a circulação do comboio em testes na rede ferroviária espanhola e portuguesa, garantindo a conformidade com os regulamentos e padrões de segurança.

Este eixo culminou com a demonstração de um comboio híbrido movido a hidrogénio, validando a viabilidade desta tecnologia como alternativa sustentável às locomotivas a diesel e contribuindo para a descarbonização do setor ferroviário.

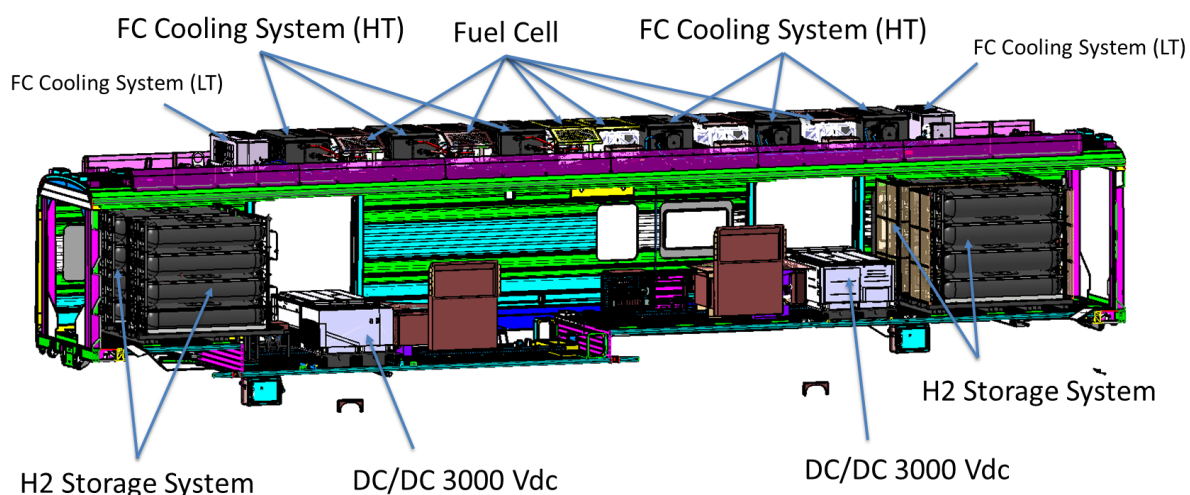


Figura IV - Esquema de localização dos dois FCHPP na carruagem técnica

3.6 Eixo 6 - Demonstração da Competitividade

Este eixo teve como foco, por um lado, a avaliação do desempenho do FCHPP, analisando e comparando os principais indicadores de desempenho do FCHPP em relação aos sistemas de tração a diesel, incluindo a eficiência energética, emissões e custos operacionais e, por outro, a análise do ciclo de vida (LCC), avaliando os custos ao longo do ciclo de vida do FCHPP, desde a produção até à desativação, comparando-os com os associados à tração a diesel, para determinar a viabilidade económica da adoção do FCHPP.

Os indicadores técnicos a avaliar incluem o consumo final de energia diferenciado por modo de funcionamento (eletricidade em catenária e hidrogénio em via sem catenária vs. gasóleo) e a deterioração do sistema de células de combustível durante e após os ensaios através de meios eletrónicos e a previsão, através de métodos bem estabelecidos (inspeção simulada e/ou física) do KPI de durabilidade do sistema de células de combustível.

Foram aplicadas metodologias bem estabelecidas de cálculo dos custos do ciclo de vida (LCC) que refletem as normas ferroviárias, como a IEC 62278 / EN50126.

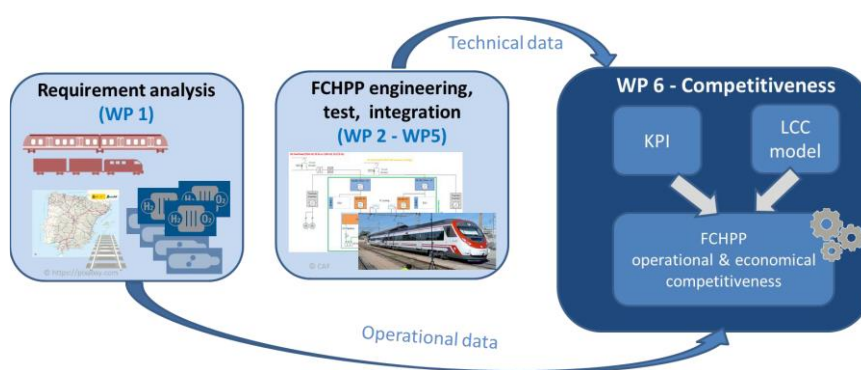


Figura V - Esquema da demonstração da competitividade

3.7 Quadro normativo

A utilização de sistema de energia baseado em células de combustível de hidrogénio no sistema ferroviário está ainda numa fase inicial e como tal, carece de desenvolvimentos na vertente normativa.

Numa primeira etapa foi realizado o levantamento das lacunas no atual panorama normativo internacional, identificando e analisando as interfaces críticas entre o comboio híbrido a célula de combustível e os diversos

stakeholders envolvidos, desde a construção até à operação. Neste contexto foi estabelecida uma rede composta por especialistas externos em normalização.

Para a análise do quadro regulamentar e a subsequente proposta de alteração, foi utilizado o método IMPACT-24, desenvolvido no Shift2Rail. Este método conduzirá ao desenvolvimento de um roteiro para a normalização, a fim de garantir que a variedade de tecnologias desenvolvidas num programa de investigação tão vasto seja transferida para os organismos de normalização corretos de uma forma construtiva.

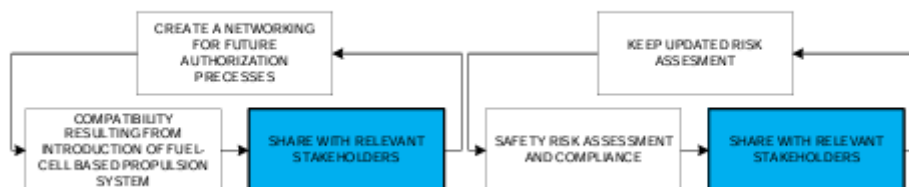


Figura VI - Esquema de participação dos stakeholders

4. Ensaios dinâmicos

Os ensaios do comboio bi-modo iniciaram-se em maio de 2022, após a conclusão com sucesso dos testes estáticos do primeiro FCHPP e respetiva instalação no comboio. Esta primeira fase permitiu afinar todo o processo de funcionamento do FCHPP e as respetivas interfaces com os sistemas existentes a bordo do comboio garantindo a compatibilização de todos os componentes.

Em simultâneo iniciaram-se os trabalhos de avaliação de segurança e a emissão dos respetivos certificados necessários à avaliação por parte dos gestores das infraestruturas ferroviárias de Espanha e Portugal conducentes à emissão das autorizações de circulação nas suas redes.

Em julho de 2022 foram realizados os primeiros testes dinâmicos, numa linha privada. Estes testes foram realizados na versão de um único FCHPP instalado a bordo do comboio. Estes testes serviram para a otimização do sistema de células de combustível de hidrogénio e das baterias tendo em vistas a representatividades dos itinerários de serviços comerciais.

Entre dezembro de 2022 e fevereiro de 2023, foi instalado o segundo FCHPP no comboio e realizados os necessários testes e ensaios em fábrica.

Em junho de 2023 o projeto alcançou um marco importante ao obter a autorização para realizar testes na Rede Ferroviária Espanhola e ao concluir o primeiro dos percursos previstos com a chegada da unidade à estação de Canfranc, nos Pirinéus Aragoneses. A linha de Canfranc é uma linha particularmente exigente devido aos seus declives acentuados e elevada altitude, que constituem um grande desafio para os novos sistemas de produção de energia. Neste teste, o comboio demonstrador circulou na linha Saragoça-Canfranc tanto em modo elétrico, na zona eletrificada, como em modo híbrido, combinando a energia das pilhas de hidrogénio e das baterias nos trechos não eletrificados.



Figura VII - Primeira viagem na rede ferroviária de Espanha

Desde desta data e até abril de 2024 foram realizados mais testes em linhas da rede ferroviária de Espanha permitindo simular serviços comerciais reais e aferir o comportamento do comboio em diversas condições atmosféricas desde temperaturas negativas a temperaturas na ordem dos 40°C.

Foi igualmente realizado um teste à real autonomia do comboio com a alimentação de energia a ser exclusivamente garantida pelo FCHPP. Foi possível realizar uma viagem de mais de 800km sem reabastecimento obtendo-se assim um valor de autonomia superior a 800km. As condições de realização deste teste de autonomia não foram as ideais pelo que será expectável que o valor obtido possa ser ultrapassado.

Em abril de 2024 um segundo marco dos testes foi alcançado. Entre 3 e 6 de abril, o comboio circulou na Linha do Minho entre as estações de Valença e Nine, tornando-se no primeiro comboio a hidrogénio em Portugal. Com estes testes, o projeto FCH2RAIL alcançou um grande marco, tendo obtido a autorização para colocar o comboio demonstrador a circular num segundo país europeu.



Figura VIII - Ensaaios na rede ferroviária Portuguesa
11.º Congresso Rodoferroviário Português – <http://11crp.crp.pt>

Os testes conduzidos em Portugal foram exclusivamente realizados com alimentação através do sistema FCHPP e sem recurso a reabastecimento durante os mesmos.

O programa de testes terminou em abril de 2024 com os ensaios na linha entre Ourense e Santiago de Compostela em Espanha.

Como corolário dos testes realizados destaca-se:

- Cerca de 10.000 km percorridos em modo hidrogénio (>500 km em Portugal)
- Mais de 800 km de autonomia
- Foi atingida a plena funcionalidade e o desempenho exigido do comboio

5. Estação de reabastecimento de hidrogénio

Em complemento ao comboio demonstrador bi-modo, foi desenvolvida uma estação de reabastecimento de hidrogénio (HRS – Hydrogen Refuelling Station). O protótipo da HRS, desenvolvida no projeto, foi utilizada em três locais de Espanha durante os testes e a demonstração realizada nas várias linhas ferroviárias espanholas e portuguesas.

Com os últimos desenvolvimentos realizados a estação de reabastecimento atingiu a sua máxima capacidade de abastecimento permitindo abastecer os depósitos de hidrogénio do comboio demonstrador na sua máxima pressão, maximizando deste modo a autonomia.



Figura IX - Estação de reabastecimento de hidrogénio

No desenvolvimento da HRS foram igualmente realizados todos os estudos de segurança e realizado o processo de certificação de forma a poder ser utilizado no projeto.

6. Conclusões

A conclusão do projeto está prevista para 30 de junho de 2025, pelo que alguns dos resultados do projeto ainda não estão disponíveis. No entanto da análise dos resultados já obtidos, algumas conclusões podem, desde já, ser avançadas:

- O projeto produziu e testou com sucesso um sistema FCHPP adaptável a diversas necessidades de serviço ferroviário;

- Foi possível criar uma solução de alimentação de energia, sem emissões locais, com um nível de performance muito semelhante aquele que se tem com a alimentação por catenária;
- Foi produzido e testado com sucesso um comboio bi-modo, que realizou cerca de 10.000km com alimentação através de células de combustível de hidrogénio, sem anomalias que implicassem a paragem dos ensaios, demonstrando uma assinalável fiabilidade e robustez da solução desenvolvida.
- Foi possível obter a autorização de circulação real em dois países, Espanha e Portugal.
- Foi realizado o levantamento das lacunas regulamentares e estabelecida uma proposta de atuação que permita eliminar as mesmas;

Embora os dados finais do estudo de competitividade da solução FCHPP em relação aos comboios a diesel não estejam ainda disponíveis para divulgação as análises preliminares apontam para que o sistema FCHPP possa ser competitivo num futuro próximo. Um dos fatores preponderantes está relacionado com a disponibilidade de hidrogénio verde em quantidade e preço competitivo, situação que se antevê com evolução favorável devido aos inúmeros investimentos que estão em curso ou programados.

7. Referências Bibliográficas

Pagenkopf, J. Boehm, M., Haas, J., Friedrich, H. (2018) *Analysis of German diesel operated regional railway lines' patterns with regard to the application of battery and fuel cell electric trains*. The Fourth International Conference on Railway Technology - Railways 2018, 3.-7. Sept. 2018, Sitges, Spain.

Projeto FCH2RAIL

<https://fch2rail.eu/>

2025-02-27

Roland Berger (2019): *Study on the use of fuel cell and hydrogen in the railway environment. Study for Shift2Rail and FCHJU*. doi:10.2881/495604.

S2R IMPACT-2, GA No: 777513, Deliverable D5.1 *Global Roadmap Standardisation*, 2019