

# **DESCARBONIZAÇÃO DA FROTA DE ÔNIBUS DE FORTALEZA: Dimensionamento de Infraestruturas de Produção de Hidrogênio Verde via Energia Eólica**

**Autor:** Hariel Abreu Pereira (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE)

**Co-Autores:** João José Moura Vieira (Universidade Federal do Ceará - UFC);  
Ana Carolina Miranda Magalhães (Universidade Federal do Ceará - UFC);  
William Magalhães Barcellos (Universidade Federal do Ceará - UFC);  
Auzuir Ripardo de Alexandria (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE)

**Responsável pela apresentação:** Hariel Abreu Pereira

## **RESUMO**

A extensa utilização de combustíveis fósseis como principal fonte de energia na economia desde a Segunda Revolução Industrial provocou um substancial aumento na concentração de Gases de Efeito Estufa (GEEs) na atmosfera. Essa elevação nos níveis de GEEs que por séculos foi negligenciada, vem resultando em impactos ambientais significativos em várias regiões do planeta, atingindo, inclusive, algumas áreas do Brasil particularmente vulneráveis. Destaca-se, nesse contexto, a importância da Descarbonização dos Transportes. Este setor, sendo o segundo maior poluidor da atmosfera, não apenas contribui para questões climáticas globais, mas também gera problemas locais, principalmente nas grandes cidades brasileiras, como a poluição sonora. Nesse sentido, este trabalho propõe o dimensionamento das infraestruturas de geração de Energias Renováveis e produção de Hidrogênio Verde direcionado à Descarbonização integral da Frota de Transporte Coletivo Urbano da Cidade de Fortaleza, no Brasil. Essa ação de descarbonização se dá por meio da substituição dos veículos tradicionais, com sistemas de propulsão movidos à diesel, por Ônibus com Células de Combustível à Hidrogênio. Para atender a demanda da proposta de implantação no município de Fortaleza, é necessário produzir 37.819,32 kg de hidrogênio por dia. Dessa forma, propõe-se a caracterização de subsistemas de produção, armazenamento, compressão e abastecimento, por meio do dimensionamento e de análises energética, econômica e de logística. Os resultados revelaram uma demanda de geração anual de energia elétrica de 766.93 GWh para suprir o consumo de todos os subsistemas contemplados por esta proposta. Nesse sentido, foi dimensionada uma Usina Eólica com capacidade de 840 GWh anuais. Por fim, a avaliação econômica dessa proposta indicou uma economia de US\$ 359.541.391,20 no tempo de vida útil da maioria dos equipamentos e um payback simples do investimento em 13 anos.

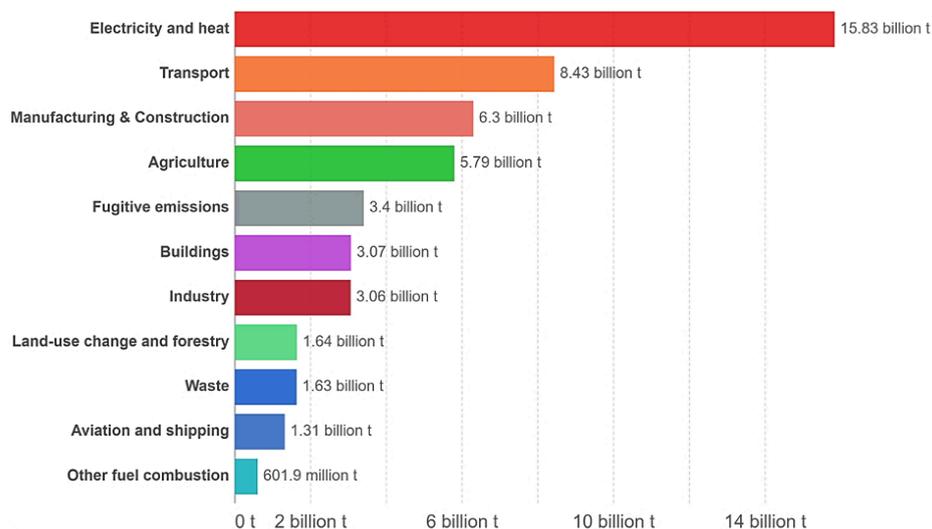
**Palavras-chave:** Hidrogênio Verde; Energia Eólica; Descarbonização; Transporte Público.

## 1 INTRODUÇÃO

As inovações tecnológicas decorrentes das Revoluções Industriais ocorridas desde meados do século XVIII, sobretudo a Máquina a Vapor e o Motor à Combustão Interna (MCI) possibilitaram o desenvolvimento da sociedade ao patamar atual. No entanto, também foram impulsionadas as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs), a exemplo do Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e dos Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>), elevando a concentração dessas substâncias na atmosfera.

Nesse contexto, estima-se um aumento na concentração de CO<sub>2</sub> de cerca de 280 partes por milhão (ppm), na Era pré-Industrial, para mais de 400 ppm na última década, o que já provoca impactos sensíveis em diversas regiões do planeta e é apontado como principal causa do Aquecimento Global (LAN *et al.*, 2023). Além disso, outros GEEs também desencadeiam alterações climáticas com base na sua capacidade de reter o calor proveniente da radiação solar na atmosfera, dessa forma, o índice de Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*) mede essa característica dos GEEs, atribuindo o valor de 1 ao CO<sub>2</sub>, o que permite comparar os impactos nocivos de diferentes emissões com base na unidade CO<sub>2eq</sub> (CO<sub>2</sub> equivalente) (IPCC, 2021).

Figura 1: Níveis de Emissões dos Setores Econômicos.



Fonte: Adaptado de Our World in Data, 2019.

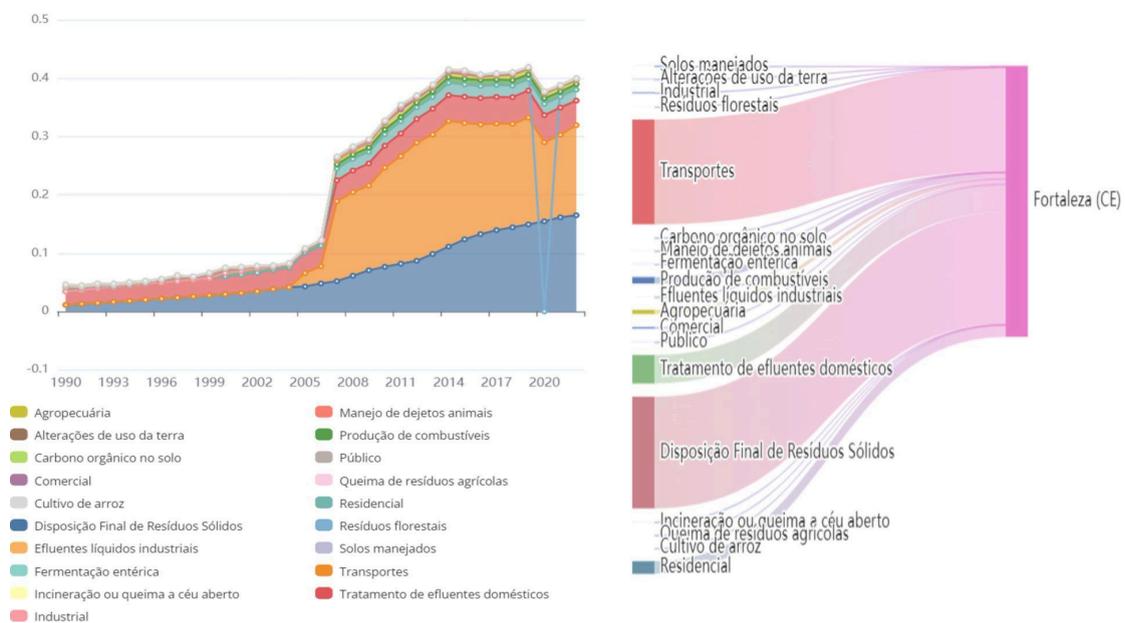
Nesse sentido, a Figura 1 destaca a contribuição de cada setor da economia global em emissões de GEEs, utilizando a unidade CO<sub>2eq</sub> como parâmetro, evidenciando o protagonismo dos transportes em termos de poluição atmosférica.

Nas cidades, devido ao adensamento urbano, essa tendência é ainda mais salientada. Para mensurar isso,

O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) é uma iniciativa do Observatório do Clima que compreende a produção de estimativas anuais das emissões de gases de efeito estufa no Brasil, documentos analíticos sobre a evolução das emissões e uma plataforma digital que abriga os dados do sistema e sua metodologia (SEEG, 2023).

Sendo assim, a Figura 2 ilustra dois gráficos que permitem a visualização do crescimento das emissões de GEEs em CO<sub>2eq</sub> na cidade de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, no Brasil, por atividade econômica, em que é enfatizado o maior impacto do Setor de Transportes, com quase a totalidade das emissões relacionadas aos modais rodoviários, entre eles o Transporte Coletivo.

Figura 2: Série Histórica de Emissões em Fortaleza/CE.



Fonte: SEEG, 2023.

Com o intuito de enfrentar esse cenário, foi traçado o Plano Fortaleza 2040 durante a gestão do ex-prefeito Roberto Cláudio, que consiste em uma rota para o desenvolvimento sustentável da capital cearense até 2040. Entre os sete eixos estratégicos que compõem o Plano Fortaleza 2040, o Eixo 4 se destaca pelo foco na criação de uma Cidade Ambientalmente Sustentável, adotando 3 estratégias, com destaque à Estratégia 2:

Os potenciais energéticos de Fortaleza, a saber: eficiência no consumo; geração distribuída de energia elétrica e aproveitamento energético de resíduos, deverão ser executados de forma integrada, estimulando e fomentando a atração de investimentos públicos e privados, resultando em uma cadeia produtiva sólida, eficiente, confiável e competitiva, e

fomentando um ambiente fértil para o desenvolvimento científico e tecnológico de soluções energéticas e o empreendedorismo de negócios inovadores (FORTALEZA, 2016).

Dessa maneira, fica evidente o interesse do Poder Executivo do município, na forma de política de Estado, em combater as mudanças climáticas por meio de ações multifacetadas, incluindo o aproveitamento dos potenciais energéticos da cidade. Sendo assim, iniciativas que visem à descarbonização de setores estratégicos como os Transportes que, além de figurar entre os responsáveis pela poluição atmosférica em Fortaleza, também fazem parte do cotidiano dos fortalezenses, tendem a ser valorizados pelo Poder Público.

Para isso, no intuito de compreender o atual estado do sistema de transportes coletivos de Fortaleza, a Divisão de Planejamento (DIPLA), da Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (ETUFOR) detalha a frota de ônibus com 2029 veículos. No entanto, este contingente encontra-se reduzido em virtude da diminuição da utilização do transporte coletivo pós-pandemia da Covid-19, para este trabalho, foi considerada uma frota ativa de 1680 veículos, que percorrem uma distância média diária de 205 quilômetros.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo geral propor a descarbonização da frota de ônibus do município de Fortaleza, visando à troca dos modais coletivos viários com enfoque na substituição dos modelos tradicionais com MCIs à diesel por um veículos com células a combustível, a partir do dimensionamento de estações de produção de Hidrogênio Verde via Energia Eólica.

Concomitantemente, para a efetivação da proposta deste trabalho, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

**a)** Caracterizar os subsistemas de produção, de compressão, de armazenamento e de reabastecimento de hidrogênio, determinando os fluxos energéticos envolvidos na substituição total da frota de ônibus de Fortaleza por Ônibus com células a combustível à Hidrogênio (FCEBs, do inglês *Fuel Cell Electric Buses*);

**b)** Dimensionar uma Usina Eólica com capacidade de geração de energia suficiente para suprir o consumo energético de todos os subsistemas dimensionados;

**c)** Analisar economicamente a substituição da frota de ônibus atual por FCEBs, avaliando os custos de infraestrutura e de substituição dos veículos.

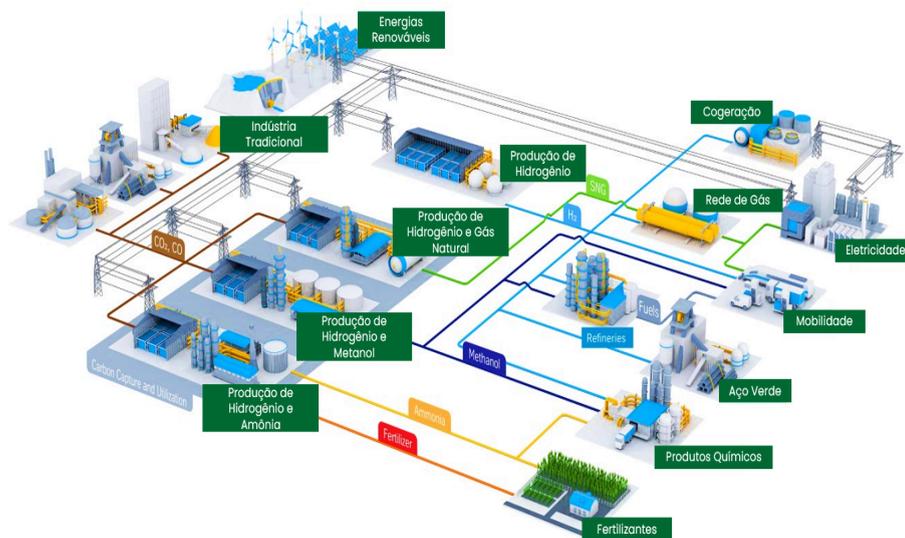
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Energia Eólica e Tecnologias do Hidrogênio

A Energia dos Ventos é utilizada para a movimentação de equipamentos criados pelos seres humanos desde as primeiras civilizações, sobretudo na navegação e no bombeamento de água em benefício à colheita de grãos. “Porém, somente a partir do século XII, esse tipo de energia foi disseminado para a Inglaterra, França e Holanda, e logo depois, espalhado por toda a Europa” (FONTANET, 2012).

As principais partes de um aerogerador são: Pás eólicas, responsáveis pela captação da energia mecânica dos ventos por meio do perfil aerodinâmico, convertendo sua potência ao rotor; Rotor, elemento de fixação das pás e de transmissão do movimento aos eixos internos da nacela; Nacela, responsável pela transformação da rotação em energia elétrica; Torre e fundação, responsáveis pela elevação da altitude dos demais componentes, bem como pela sua sustentação (NEOENERGIA, 2021).

Figura 3: Cadeia de Valor do Hidrogênio.



Fonte: Adaptado de Thyssenkrupp (2023).

Já “a tecnologia do hidrogênio refere-se ao conjunto de dispositivos e conhecimentos que possibilitam o aproveitamento do hidrogênio como vetor energético, compreendendo toda a cadeia de utilização: produção, armazenamento, transporte, distribuição e uso final” (GODOY, 2013). O Hidrogênio emerge como uma alternativa aos combustíveis fósseis, visto que, em sua forma molecular (H<sub>2</sub>), é um gás com densidade de 0,08987 kg.m<sup>-3</sup> a 0 °C e 1

bar, e poder calorífico inferior (PCI) de 119.960 kJ./kg (SILVA, 1991). A baixa densidade aliada ao alto teor energético confere uma vasta gama de aplicações ainda pouco exploradas na economia global, tais como demonstradas na Figura 3 (THYSSENKRUPP, 2023).

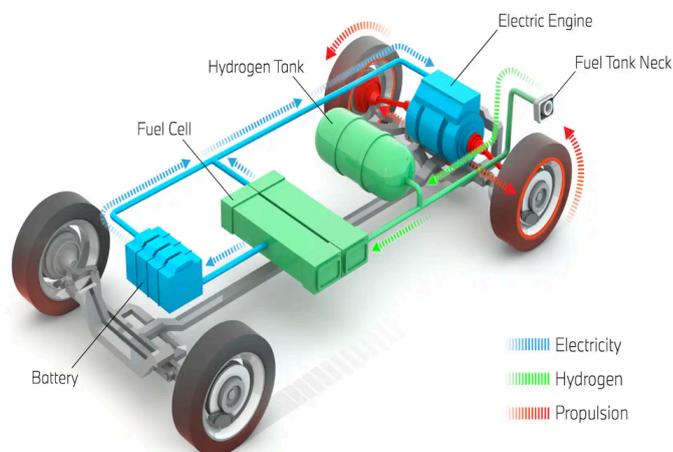
Em vista disso, pode-se afirmar que o Hidrogênio possui utilizações similares ao petróleo e seus derivados, podendo então, atuar como vetor energético no contexto de uma economia global descarbonizada, sobretudo com a queda nos custos nivelados das fontes de Energias Renováveis.

## 2.2 Ônibus com Célula de Combustível a Hidrogênio

Um dos destaques da cadeia de valor do Hidrogênio Verde é a aplicação desse combustível em transportes de pessoas e de cargas. Nesse contexto, os veículos com células a combustível (FCEVs, do inglês *Fuel Cell Electric Vehicles*) são alternativas viáveis para a descarbonização. (HYDROGEN COUNCIL, 2021).

Os FCEBs se destacam por apresentar carga reduzida, maior durabilidade, autonomia estendida e tempos de abastecimento mais rápidos em comparação com os ônibus elétricos com baterias. Isso sugere que possuem melhores perspectivas de implementação em nível local e regional para a descarbonização dos transportes coletivos. Embora essa possibilidade de utilização do Hidrogênio em transportes possa parecer complexa, na realidade, esse tipo de aplicação é relativamente simples e oferece diversas vantagens mecânicas, além da redução de emissões de GEEs. A Figura 4 apresenta um esquema básico de funcionamento de um FCEB, com tecnologia atual de acionamento híbrido.

Figura 4: Diagrama de funcionamento de um FCEB.



Fonte: BMW (2022).

## 4 METODOLOGIA

### • Cálculo da Demanda

O ponto de partida para o dimensionamento proposto por este trabalho é o cálculo da Demanda de Hidrogênio no cenário de substituição total da frota de ônibus coletivos de Fortaleza, atualmente movida à Diesel por FCEBs do modelo Urbino 12 Hydrogen, da fabricante Solaris. Esse veículo possui motor elétrico de acionamento integrado próximo às rodas de potência máxima do motor de tração de 250 kW, alimentado por uma Célula a Combustível, tipo PEM e um conjunto de baterias de íons de lítio, ambos com 70 kW, e com um tanque de armazenamento de hidrogênio que totaliza 37,5 kg à pressão de 350 bar, proporcionando uma autonomia de até 340 km sem necessidade de reabastecimento (SOLARIS, 2021).

A demanda  $D_{H2}$ , em kg/dia, é dada pela Equação X, em que  $Q_v$  é a quantidade de veículos que compõem a frota ativa,  $C_m$  é o consumo médio típico de um FCEB, considerando um gasto de 2kg de Hidrogênio a mais para cada 100km rodados em virtude da climatização necessária na cidade de Fortaleza, isto é, 0,11 kg/km e  $D_d$  é a distância média percorrida por dia por veículo.

$$D_{H2} = (Q_v \cdot C_m \cdot D_d) \quad (1)$$

Portanto, há uma demanda equivalente a 37.819,32 kg/dia de hidrogênio, o que pressupõe uma necessidade de produção de hidrogênio a uma vazão de 1575,8 kg/h, considerando um ritmo de operação diária de 24h nas Estações de Eletrólise. Essa vazão horária é relevante, tendo em vista que as especificações da maioria dos eletrolisadores é dada nesta unidade.

### • Análise Energética

A Análise Energética objetiva o balanço das energias de entrada e de saída em cada um dos volumes de controle considerados, bem como as perdas energéticas associadas. Nesse sentido, para fins de simplificação, o processo que compreende desde a produção do hidrogênio até o abastecimento dos veículos será tratado como 95% eletrointensivo, isto é, 95% da energia gerada deverá ser destinada ao consumo das unidades de eletrólise, enquanto o restante deverá ser destinado ao processo de compressão e sustentação energética das HRSs.

Assim, o produto entre a demanda de produção de hidrogênio, em kg/h, multiplicada pelo consumo de energia por quilograma de gás produzido indicado

pelo fabricante, em kWh/kg, resulta na demanda energética do principal componente do conjunto, que representa 95% do saldo energético que deve ser fornecido para a substituição da frota. Vale ressaltar que o Hidrogênio possui um poder calorífico de 119.960 kJ/kg, que, efetivando as devidas conversões, resulta em 33,32 kWh/kg, ou seja, o quantitativo energético que efetivamente é convertido em hidrogênio pode ser obtido por meio da multiplicação desse PCI pela demanda, dessa forma também obteve-se a eficiência de 84%.

- **Análise Econômica**

Para a efetivação da solução proposta por esse trabalho, a análise econômica é substancialmente relevante em virtude da necessidade de envolvimento de diversas entidades públicas e privadas relacionadas à Mobilidade Urbana. Nesse sentido, os dados de custo de aquisição, operação, manutenção e vida útil dos equipamentos conforme dimensionado na Análise Energética, foram obtidos por meio de pesquisas disponibilizadas na literatura referenciada, expostos na Tabela 1.

Tabela 1: Análise Econômica de equipamentos.

<b>Equipamento</b>	<b>Custo de Aquisição</b>	<b>Vida Útil</b>
Usina Eólica	1.473 US\$/kW (IRENA, 2020)	30 anos (WISER; BOLLINGER, 2019)
Eletrolisadores	$3.424 * P^{0,885}$ US\$ (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018)	20 anos (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018)
Compressores	$40.035 * P^{0,6035}$ US\$ (MICENA, 2020)	20 anos (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018)
Tanques de Baixa Pressão	1.001 US\$/kg (MICENA, 2020)	20 anos (MICENA, 2020)
Tanques de Alta Pressão	1.534 US\$/kg (FCH JU, 2017)	20 anos (FCH JU, 2017)
Subsistemas de Operação e Manutenção	285 US\$/kg/dia (MICENA, 2020)	20 anos (MICENA, 2020)
HRS	1,13 US\$/kg/dia (FCH JU, 2017)	20 anos (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018)

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de FCH JU (2017), Gröger *et al.* (2018), IRENA (2020), Micena (2020) e Wiser; Bollinger (2019).

Em outra perspectiva, a efetivação da proposta deste trabalho promove diversos benefícios além da diminuição dos gastos com a compra de combustíveis fósseis, sobretudo a redução do quantitativo de emissões de gases

nocivos na cidade. Nesse aspecto, segundo Paiva (2021), a quantificação dos impactos econômicos, relacionados sobretudo aos problemas ambientais e de saúde devidos à liberação de gases poluentes na atmosfera, é tradicionalmente associada à valoração de cada gás, cabendo ao Poder Público arcar com os custos decorrentes dessas emissões. A Tabela 2 contém os valores dos principais gases emitidos por veículos à MCI e a quantidade de cada gás emitida por quilômetro rodado em veículos pesados movidos a diesel em marcha lenta.

Tabela 2: Valoração de Gases Emitidos.

<b>Gás</b>	<b>Valoração (US\$/t) (PAIVA, 2021)</b>	<b>Quantidade (g/km) (AGUIAR <i>et al.</i>, 2015)</b>
CO <sub>2</sub>	108,21	≈ 0
CO	673,32	1,5
NO <sub>x</sub>	3.445,08	1,89
SO <sub>x</sub>	13.112,88	≈ 0
Hidrocarbonetos	2.980,41	0,17
Material Particulado	17.622,05	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Aguiar *et al.* (2015) e Paiva (2021).

## 5 RESULTADOS E CONCLUSÃO

No intuito de sintetizar a apresentação dos resultados obtidos a partir da execução da metodologia proposta, são subdivididos os itens:

- **Estações de Eletrólise**

No intuito de estabelecer uma base de cálculo, o **eletrolisador Siemens Silyzer 300**, possui uma taxa de produção de 330 kg/h no arranjo completo composto por 24 módulos (pilhas) do tipo PEMEC, a uma potência de 17,5 MW, com eficiência de 75,5%, consumo energético estimado de 39,45 kWh/kg, alimentação de água de 10 kg/kg de hidrogênio produzido e pressão de saída dos gases customizável. (SIEMENS, 2021).

Adotando como base duas instalações compostas por 3 eletrolisadores desse tipo, isto é, 52,5 MW de potência cada, é efetivada a produção total a uma vazão de 1980 kg/h, suficiente para abastecer totalmente a frota de FCEBs dimensionada para a cidade de Fortaleza, acrescida de uma folga de 25% para a previsão de expansão da frota e/ou redução no ritmo de produção dos eletrolisadores, no intuito de prolongar sua vida útil.

- **Sistemas Auxiliares**

Uma vez que o Hidrogênio foi produzido em quantidade suficiente para o abastecimento da frota, é necessária a sua correta disposição em **Estações de Reabastecimento de Hidrogênio** (HRS, do inglês *Hydrogen Refuelling Station*), em que as cargas ocorrem à pressão de 350 bar conforme o padrão J2601-2 da Sociedade de Engenharia Automotiva (SAE, do inglês *Society of Automotive Engineering*), a diferença substancial consiste no faturamento do combustível em quilogramas nas bombas. (CAPONI *et al.*, 2021).

Segundo o FCH JU (2017), uma HRS de grande porte possui capacidade de 6000 kg/dia de abastecimento, logo, considerando a demanda e a produção apresentadas, seriam necessárias 7 estações de reabastecimento para disponibilizar o hidrogênio produzido à frota.

No entanto, outra variável importante é o tempo de reabastecimento, já que, considerando um ritmo normal conforme o protocolo SAE J2601-2, de 3,6 kg/min, um FCEB do modelo selecionado levaria em torno de 10 min para ser completamente abastecido. Esse fato representa um total de 42 FCEBs abastecidos por hora em todas as HRS, isto é, seriam necessárias mais de 24h por dia de abastecimentos contínuos em cada estação para suprir a quantidade

de veículos da frota. Para contornar esse problema, será adotada a composição de 16 HRS com capacidade de 6000 kg/dia cada, resultando em uma rotina de abastecimento de 17,5h por dia para recarregar todos os FCEBs.

Vale ressaltar que o Hidrogênio precisa ser entregue na pressão de 350 bar, também conforme o protocolo SAE J2601-2, logo, o **Sistema de Compressão** dimensionado para este trabalho admite uma entrada diária equivalente à  $D_{H_2}$  proveniente dos eletrolisadores, a uma pressão de 20 bar, de acordo com especificações da fabricante, objetivando o aumento a níveis superiores a 350 bar ideais para o abastecimento nos FCEBs, nesse estudo, se estabelece o valor de 450 bar como referência para a análise energética do processo de compressão.

Nesse contexto, com o intuito de estabelecer uma base de cálculo com equipamentos comercialmente disponíveis, o compressor Sauer 6000 Series BasSealH2 possui especificações de pressurização equivalentes, a uma taxa máxima de 1000 m<sup>3</sup>/h com uma potência de 200 kW, em soluções modulares com 2, 3 e 4 estágios e 6 cilindros (SAUER, 2021). Em vista disso, considerando a densidade do hidrogênio de 0,08987 kg/m<sup>3</sup>, a taxa máxima de compressão é de 89,87 kg/h, sendo necessários portanto, associados a cada Estação de Eletrólise e considerando um ritmo de atuação de 10h por dia, um arranjo de 21 compressores desse modelo.

A estratégia de **armazenamento e distribuição** adotada neste estudo é a de produção de hidrogênio localizada em pontos periféricos da cidade, com fácil abastecimento de água e de energia elétrica, e de transporte do gás por meio de caminhões até às Estações de Reabastecimento distribuídas no interior de Fortaleza, em locais estratégicos como garagens, proximidades de terminais e inícios/fins de rotas. Dessa maneira, são dimensionados dois locais para armazenamento do gás.

O tanque de baixa pressão foi designado com capacidade para suportar metade da demanda diária em cada um dos pontos de produção, totalizando a disponibilidade de um dia para eventuais manutenções preventivas e/ou corretivas, além de falhas dos equipamentos. Logo, o tanque de baixa pressão, a 2 MPa e 27°C, deve ter capacidade de 18909,66 kg, com a densidade do hidrogênio de 1,61 kg/m<sup>3</sup> nessas condições, segundo Micena (2020). Portanto, o volume do tanque de baixa pressão deve ser equivalente a 11.745,13 m<sup>3</sup>,

podendo também ser composto por um banco de tanques de menor volume. O tanque de alta pressão, por sua vez, foi designado com capacidade para suportar a demanda diária em cada um dos pontos de produção, totalizando a disponibilidade de dois dias para eventuais problemas de abastecimento ou de compressão. Logo, o tanque de alta pressão, a 45 MPa e 27° C, deve ter capacidade de 37891,32 kg, com a densidade do hidrogênio de 28.184 kg/m<sup>3</sup> nessas condições, segundo CMB.Tech (2021). Portanto, o volume do tanque de alta pressão deve ser equivalente a 1.344,43 m<sup>3</sup>.

- **Usina Eólica**

Assume-se, neste trabalho, um sistema compensatório hipotético em que a energia gerada pelo Parque Eólico é injetada na rede elétrica e, conforme a demanda, consumida pelos equipamentos, desconsiderando os modelos tarifários e leilões de compra e venda de energia, tendo como único parâmetro o quantitativo energético anual, no intuito de focar a abordagem no aspecto técnico e nos custos de implantação dos empreendimentos. Nesse aspecto, a Usina Eólica deve produzir uma quantidade de energia anual equivalente a 365 vezes o consumo de energia elétrica diário dos equipamentos.

Considerando o modelo de aerogerador e a localidade escolhidos, com velocidade média dos ventos de 9,5 m/s e EAG de 28 GWh por aerogerador instalado, o Parque Eólico foi dimensionado com 30 aerogeradores, totalizando uma potência instalada de 180 MW, fornecendo 840 GWh à rede elétrica. Isso representa um quantitativo superior em 9,53% à demanda da proposta estabelecida por esse estudo, destinados, sobretudo, à compensação das perdas mecânicas e elétricas no processo de conversão energética, que equivale a 73,07 GWh.

A partir do dimensionamento, o layout proposto para o Parque Eólico é ilustrado na Figura 5, detalhando o posicionamento dos aerogeradores na área designada para o empreendimento, as áreas elípticas de distanciamento para a prevenção do “efeito esteira”, as conexões elétricas entre os aerogeradores e o posicionamento da subestação elevadora.

Figura 5: *Layout* de Usina Eólica proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Análise Econômica**

Em conformidade aos dimensionamentos dos subsistemas propostos por este estudo, foram calculados os custos com a aquisição dos equipamentos. Além disso, sobre esse valor foram adicionados os complementos de 5% para preparação do terreno, 10% para Engenharia, 5% para contingência e 3% para permissões (MICENA, 2020).

A Tabela 3 sintetiza os custos de aquisição dos equipamentos da tabela Y. Nesse aspecto, admite-se o valor de aproximadamente US\$ 657,6 milhões para a aquisição e instalação dos equipamentos, com vida útil igual ou superior a 20 anos. Ademais, é necessário considerar o custo anual do consumo de água para a eletrólise, com valores de 18,48 R\$/m<sup>3</sup> indicados pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece) (2021) para categoria industrial, o dispêndio anual foi calculado em US\$ 455.533,70, considerando uma densidade de 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Para estabelecer uma base comparativa, os custos com combustível para a frota atual de veículos à diesel, considerando um consumo médio de 0,40 L/km, e os mesmos parâmetros utilizados para o cálculo da demanda de hidrogênio, isto é, 1680 veículos em atividade e 205 km/dia de distância média percorrida,

obteve-se uma demanda diária de 137.524,8 L de diesel.

Tabela 3: Custo de Investimento em Equipamentos.

<b>Equipamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Investimento (US\$)</b>
Usina Eólica	180 MW	265.140.000,00
Eletrolisador	105 MW	95.123.163,62
Compressores	2 x 21 x 200 kW	9.373.885,96
Tanques de Baixa Pressão	2 x 18.909,66 kg	37.857.139,32
Tanques de Alta Pressão	2 x 37.891,32 kg	116.250.569,80
Operação e Manutenção	37.891,32 kg/dia	10.799.026,20
Estações de Reabastecimento	16 x 6000 kg/dia	108.480,00
<b>Investimento em Equipamentos</b>		<b>534.652.264,9</b>
Preparação do Terreno (5%)		26.732.613,25
Engenharia (10%)		53.465.226,50
Contingência (5%)		26.732.613,25
Permissões (3%)		16.039.567,95
<b>Investimento Total</b>		<b>657.622.285,82</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o preço do diesel de 5,67 R\$/L informado pela Petrobrás para janeiro de 2022 no Estado do Ceará, foi calculado um custo anual de US\$ 49.932.359,62. A infraestrutura de recarga dos ônibus à diesel já está estabelecida nos postos de abastecimento comuns da cidade, no entanto, o valor do diesel atinge valores mais altos a cada ano, com a expectativa de aumento ainda maior à medida que as grandes economias transitam para a descarbonização. Em vista disso, já é possível traçar expectativas de retorno financeiro a longo prazo, mesmo com a aquisição e instalação de toda a infraestrutura de produção do hidrogênio.

Tabela 4: Valores e emissões anuais em Fortaleza.

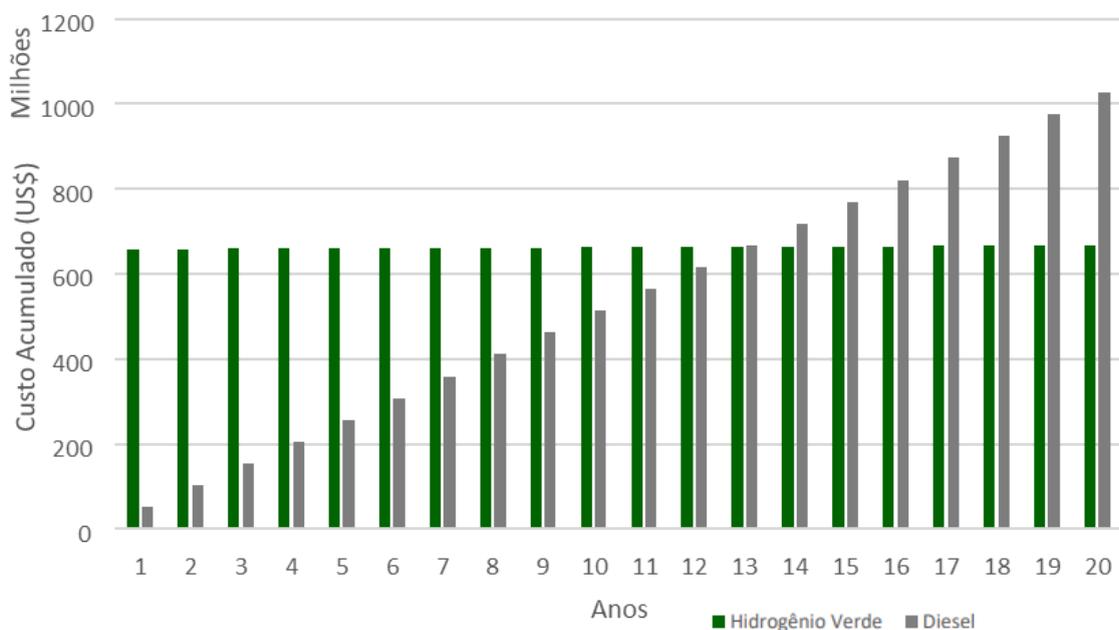
<b>Gás Emitido</b>	<b>Quantidade (kg)</b>	<b>Valor Associado (US\$)</b>
CO	188.237,07	126.743,78
NOx	237.178,71	817.099,62
Hidrocarbonetos	21.333,54	63.573,93
Material Particulado	21.333,54	375.940,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, no contexto da emissão de gases, a Tabela 4 sintetiza os valores anuais emitidos pela frota de ônibus atual e sua valoração respectiva, conforme a demanda de diesel calculada e os valores de referência. Dessa forma, US\$ 1.383.357,93 são gastos, em média, anualmente em decorrência dos problemas ambientais e de saúde relacionados à emissão de gases tóxicos. Isso totaliza um custo atual de US\$ 51.315.717,55 por ano relacionado ao combustível e às emissões decorrentes de sua combustão.

Sendo assim, a Figura 6 demonstra o comparativo entre o custo total acumulado, no período de 20 anos, para o abastecimento das duas modalidades de ônibus analisadas por este estudo, em que, para o Hidrogênio Verde consideram-se o investimento inicial em infraestrutura de aquisição e instalação dos equipamentos para sua produção e as entradas anuais relacionadas ao custo da água consumida, já para o diesel, consideram-se somente as entradas anuais relacionadas ao custo do combustível.

Figura 6: Comparativo entre combustíveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 6 é possível notar o payback do investimento inicial em infraestrutura para produção do Hidrogênio Verde em 13 anos, totalizando uma economia, no tempo total de vida útil dos equipamentos, equivalente a US\$ 359.541.391,20.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, S. D. O. et al. Avaliação das emissões de escapamento veicular em condições específicas do motor: partida e marcha-lenta. *Transportes*, v. 23, n. 3, p. 35, 2015.

BMW Group. Como funcionam os carros de célula de combustível de hidrogênio. [BMW Group Website]. 2023.

CAPONI R, MONFORTI F A, BOCCI E, VALENTI G, DELLA PIETRA M. Thermodynamic modeling of hydrogen refueling for heavy-duty fuel cell buses and comparison with aggregated real data. *International Journal Hydrogen Energy*. v. 46, n.35, p. 18630 - 18643, 2021

GODOY, G. A. R. Rodovia do hidrogênio Brasil - Paraguai: estudo técnico, econômico e ambiental. 2013. 163 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em:  
<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264135>. Acesso em: 7 fev. 2021.

FCH JU, The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots. 2017.

FONTANET, Flávia Aguiar. Avaliação de uma opção de espera de um Parque Eólico pelo Método de Opções Reais. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2012. Disponível em:  
[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/22813/22813\\_1.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/22813/22813_1.PDF). Acesso em: 7 fev. 2024.

GRÜGER, F.; DYLEWSKI, L.; ROBINIUS, M.; STOLTEN, D. Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior. *Applied Energy*, Londres, v. 228, n. July, p. 1540–1549, 2018.

IPCC. Annex VII: Glossary. In: MATTHEWS, J.B.R.; MÖLLER, V.; VAN DIEMEN, R.; FUGLESTVEDT, J.S.; MASSON-DELMOTTE, V.; MÉNDEZ, C.; SEMENOV, S.; REISINGER, A. (Eds.). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. pp. 2215–2256. DOI: 10.1017/9781009157896.022.

IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2019, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

HYDROGEN COUNCIL. Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. 2021. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.

FORTALEZA, Prefeitura Municipal. Plano Fortaleza 2040. 8 Volumes. Fortaleza: Iplanfor, 2016.

LAN, X.; TANS, P.; THONING, K.; NOAA Global Monitoring Laboratory. Trends in globally-averaged CO<sub>2</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements.[S.l.]: NOAA GML, 2023. Disponível em: <<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>>. Acesso em: 5 jan. 2024.

MICENA, Raul Pereira. Estação de produção e abastecimento de hidrogênio solar: análise técnica e econômica. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.

NEOENERGIA. Você sabe como funciona um aerogerador?, 2021. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-umaerogerador.aspx>. Acesso em: 5 jan. 2024.

OUR WORLD IN DATA. Global atmospheric CO concentration: Atmospheric carbon dioxide (CO) concentration is measured in parts per million (ppm). 2023. Acesso em: 5 jan. 2024.

PAIVA, V. R. C. Monetização dos Benefícios Sociais e Ambientais da Eletrificação das Frotas de Ônibus. 9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável (PLURIS 2021 DIGITAL). v. 9. n. 1. 2021.

SAUER. Hydrogen Compressors: Dependable up to 500 bar – anywhere, anytime, anygas. 2021. Disponível em: [https://www.ynna.cz/obrazkysoubory/sauer\\_hydrogen\\_compressors\\_en-378c4.pdf?redir](https://www.ynna.cz/obrazkysoubory/sauer_hydrogen_compressors_en-378c4.pdf?redir). Acesso em: 7 fev. 2024.

SEEG. Plataforma SEEG. [S.l.]: SEEG, 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 7 fev. 2024.

SILVA, E. P. da. Introdução À Tecnologia e Economia do Hidrogênio. Unicamp: Campinas, 1991.

SOLARIS. Zero Emissions Powertrains: Product Catalogue 2021/2022. 2021. Disponível em: [https://www.solarisbus.com/public/assets/content/pojazdy/2021/2021/EN\\_Zero\\_emisyjne\\_1920\\_x\\_1080.pdf](https://www.solarisbus.com/public/assets/content/pojazdy/2021/2021/EN_Zero_emisyjne_1920_x_1080.pdf). Acesso em 7 fev. 2024.

THYSSENKRUPP. thyssenkrupp expands production capacities for water electrolysis plants. 2023. <<https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/media/press-releases/thyssenkrupp-expands-production-capacities-for-water-electrolysis-plants>>. Acesso em: 9 fev. 2024.

WISER, R.H. BOLLINGER, M. Wind Technologies Market Report. 2019. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

## **DECARBONIZATION OF FORTALEZA'S BUS FLEET: Sizing Infrastructure for Green Hydrogen Production via Wind Energy**

**Author:** Hariel Abreu Pereira (Federal Institute of Education, Science, and Technology of Ceará - IFCE)

**Co-Authors:** João José Moura Vieira (Federal University of Ceará - UFC);  
Ana Carolina Miranda Magalhães (Federal University of Ceará - UFC);  
William Magalhães Barcellos (Federal University of Ceará - UFC)  
Auzuir Ripardo de Alexandria (Federal Institute of Education, Science, and Technology of Ceará - IFCE)

**Presentation Supervisor:** Hariel Abreu Pereira

### **ABSTRACT**

Extensive reliance on fossil fuels as the primary energy source in the economy since the Second Industrial Revolution has led to a substantial increase in greenhouse gas (GHG) emissions in the atmosphere. This rise in GHG levels, long neglected, has resulted in significant environmental impacts in various regions of the planet, including some particularly vulnerable areas in Brazil. In this context, the importance of Transport Decarbonization is emphasized. This sector, the second-largest polluter of the atmosphere, not only contributes to global climate issues but also generates local problems, especially in major Brazilian cities, such as noise pollution. Therefore, this study proposes sizing Renewable Energy generation infrastructures and Green Hydrogen production aimed at the comprehensive decarbonization of the Urban Public Transport Fleet in the city of Fortaleza, Brazil. This decarbonization action involves replacing traditional vehicles with diesel-powered propulsion systems with Hydrogen Fuel Cell Buses. To meet the demand of the implementation proposal in the municipality of Fortaleza, it is necessary to produce 37,819.32 kg of hydrogen per day. Thus, characterization of production, storage, compression, and refueling subsystems is proposed through sizing and energy, economic, and logistics analyses. Results revealed an annual electricity generation demand of 766.93 GWh to supply consumption of all subsystems covered by this proposal. In this regard, a Wind Farm with a capacity of 840 GWh per year was sized. Finally, the economic evaluation of this proposal indicated a saving of US\$ 359,541,391.20 over the useful life of most equipment and a simple payback of the investment in 13 years.

**Keywords:** Green Hydrogen; Wind Energy; Decarbonization;; Public Transport.