

O papel do hidrogênio na descarbonização do transporte público Tarifa Zero em Maricá.

Coordenadora: Luciana Gomes Postiço¹ Arquiteta e Urbanista, Pós-Graduada em Planejamento Estratégico pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; Tatiana Gomes Postiço¹ Engenheira Civil, Especializada em Mobilidade Ativa; Luiz Roberto Accacio de Matos² Licenciado em Ciências com Hub em Matemática, Pós-Graduado em Gestão e Estratégia de Negócios pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

¹Empresa Pública de Transportes – EPT - Diretoria de Planejamento; Rua das Galhas nº 2876 Centro Maricá – RJ (21) 97962-6501, luciana.postico@eptmarica.rj.gov.br; (21) 99949-9258, tatiana.gomes@eptmarica.rj.gov.br.

²Instituto de Ciência e Tecnologia – Diretoria de Inovação Científica; Rua Barão de Inoã, nº 80 Centro Maricá – RJ (21) 99991-1819, luizaccacio@gmail.com.

RESENHA

A utilização de combustíveis fósseis, como principal vetor energético das atividades econômicas desde a Segunda Revolução Industrial, provocou o aumento significativo na concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, causando impactos ambientais em diversos locais do planeta. Nesse sentido, a maior motivação para a abordagem deste tema advém da necessidade socioambiental de reduzir o uso dos combustíveis fósseis, mediante o risco de comprometimento para as futuras gerações, em razão da elevada emissão de gases de efeito estufa (GEE), causada pelos combustíveis derivados de fonte finitas. Portanto, adverte-se sobre a urgência de transição energética, sendo recomendada a mudança da atual matriz (predominantemente poluente) para uma matriz limpa e renovável. O uso do hidrogênio tem ganhado notoriedade como vetor energético no cenário de transportes públicos urbanos, enquanto alternativa mais limpa e agregadora de qualidade ambiental e social. Neste trabalho, investiga-se o atual panorama da viabilidade econômica e ambiental da utilização do hidrogênio como potencial vetor energético para o setor de transportes públicos urbanos no município de Maricá (RJ), por meio de uma revisão bibliográfica exploratória. Desse modo, foi possível atestar que o hidrogênio pode ser considerado uma fonte de energia promissora, classificado como combustível verde, de queima mais limpa e eficiente. Ressalta-se que o tema envolve fatores tecnológicos, sociais, econômicos, ambientais e políticos, e necessita de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação para sua implantação e ampliação. Ainda assim, evidencia-se a importância da transição energética, pois é preciso abandonar as fontes fósseis e priorizar as fontes renováveis, possibilitando a popularização do hidrogênio na geração distribuída.

PALAVRAS-CHAVE: hidrogênio, vetor energético, transporte público.

INTRODUÇÃO

O Acordo de Paris indica a estabilização da temperatura média global, em busca de um equilíbrio entre emissões e remoções, da atmosfera, de gases de efeito estufa (GEE). Para manter o aumento de temperatura abaixo de 2°C, é preciso que esse balanceamento seja alcançado em aproximadamente meio século. Portanto, os setores energético, de transportes e industrial, que são os principais responsáveis pelas emissões globais de GEE, necessariamente devem ser transformados nesse período, por meio da substituição de fontes e processos atuais por alternativas de baixo carbono.

O hidrogênio como potencial vetor energético se tornou um dos principais objetivos de governos e empresas ao redor do mundo. Acredita-se que, com a retomada econômica pós-pandemia, uma transição energética pode ser acelerada, principalmente devido às políticas

anunciadas por países da União Europeia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). Entre essas alternativas, o hidrogênio (H₂) se destaca pela versatilidade, tanto no consumo quanto na produção. Assim, o seu uso pode viabilizar a redução de emissões, inclusive em setores em que a descarbonização é considerada desafiadora, enquanto sua produção pode ser baseada em um conjunto de rotas adequadas aos recursos de cada região.

De acordo com Agência Internacional de Energia (IEA), em 2020, o setor de transportes foi responsável por 24% das emissões diretas de CO₂ oriundas da queima de combustíveis. Concomitantemente, houve um crescimento de 40% na compra e venda desses veículos de acordo com IEA (2021a), impulsionado pela busca por transportes cada vez mais limpos, bem como pelo uso desses veículos atrelados ao transporte público. Embora ainda tenha sua principal demanda voltada para o setor industrial, a chamada “economia do hidrogênio” agrega o mercado mundial, estimando-se um crescimento no comércio direcionado ao uso energético. Em termos de uso final, o hidrogênio enquanto vetor energético já é uma realidade no setor de transportes públicos urbanos.

Maricá busca inserir na sua frota de veículos do transporte público coletivo unidades híbridas com o uso de células de hidrogênio para geração de energia. Ao desenvolver sua política local do hidrogênio, o município pode se tornar polo estratégico na produção e no uso de hidrogênio de baixo carbono, através da rota de produção (cuja matéria-prima principal é o gás natural). O hidrogênio turquesa tem como subproduto o carbono sólido (negro de fumo), cuja utilização pode permitir agregação de valor e impedir a liberação do carbono como CO₂ para a atmosfera. Dessa forma, objetiva-se gerar um fluxo energético flexível e limpo, a partir do gás natural, possibilitando oportunidades para a cadeia do gás desempenhar papel essencial na energia e na indústria de baixo carbono, além de expandir a função de combustível de transição.

DIAGNÓSTICO

A denominação poluente atmosférico é qualquer matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características que estejam diferentes aos níveis estabelecidos que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; prejudicial ao bem estar público; danoso à flora e à fauna; implicando questões de segurança ao gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (CONAMA, 2023).

Maricá é uma cidade da região metropolitana do estado do Rio de Janeiro, com uma população de 197.300 habitantes (IBGE, 2022) e uma área de 361.572 Km². O transporte público representa um papel fundamental na cidade e conta com uma estrutura de linhas de ônibus operada pela Empresa Pública de Transportes, que oferece ao munícipe tarifa zero em seus deslocamentos.

A frota atual do município conta com 39 linhas, 135 veículos e uma extensão de rede de 498,91 km (EPT, 2023).

Tabela 1 – Dados médios referentes à frota de ônibus a diesel na cidade de Maricá

Número de ônibus frota	135 veículos
Velocidade média nos centros urbanos	30Km/h
Vida útil dos ônibus	10 anos
Número de embarque de passageiros	122 mil/dia
Quantidade de viagens diárias	1.300
Consumo aproximado de diesel da frota	5.581.716 L/ano
Custo anual de diesel consumido pela frota	R\$ 32.094.867,00
Custo total da frota (veículos)	R\$ 97.200.000,00

Do ponto de vista ambiental, o sistema de transporte urbano de Maricá se apresenta desfavorável, por ser a principal causa da poluição atmosférica da região. Os problemas de

qualidade do ar decorrentes principalmente das emissões de poluentes atmosféricos causam efeitos prejudiciais à saúde pública e ao meio ambiente.

A queima de combustíveis fósseis provoca externalidades adversas. A poluição do ar, além de causar danos à saúde, provoca custos ambientais através da perda da biodiversidade e dos sistemas ecológicos, representando um custo social que, em geral, não são facilmente notados. A mensuração desses cálculos é relevante, ao permitir a comparação com outros custos e subsidiar tomadas de decisão por meio de análises de custo-benefício, permitindo ao poder público decidir por alternativas que resultem em maiores benefícios.

Cabe pontuar que, ao ser estimado o custo do transporte urbano de acordo com o preço de todos os seus insumos que compõem a operação do sistema, desconsideram-se os custos sociais como aumento de morbidades, gastos hospitalares e mortalidades associadas à poluição do ar. Contudo, ao se comparar o custo de um ônibus a diesel com um ônibus a hidrogênio, seria preciso levar em conta os custos sociais gerados pela poluição atmosférica (PALADINO, 2013).

Ao se analisar a poluição gerada pelos ônibus a diesel nos grandes centros urbanos, se observa externalidades negativas classificadas em três categorias (Knight e Young, 2006):

- efeitos locais, tais como, redução da visibilidade, névoa e chuva ácida;
- efeitos ambientais globais, como alteração do clima e aquecimento global, que ocorrem através de emissão de CO₂ e outros gases;
- efeitos nocivos à saúde humana, através da exposição a material particulado em níveis elevados causando mortes prematuras e doenças do aparelho respiratório.

Os principais poluentes do ar emitidos pela queima de diesel da frota de ônibus urbano em Maricá são: partículas inaláveis, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarbonetos e ozônio.

Para quantificar os poluentes gerados pelos ônibus a diesel se utiliza a metodologia calculando as emissões dos principais compostos diretamente da quantidade de diesel consumido. Conforme afirma Oliveira (2011), a emissão de cada poluente na queima do óleo diesel pode ser quantificada em função da quantidade de óleo queimado. A tabela 2 apresenta os índices de emissão dos principais poluentes causadores tanto do efeito estufa, como efeito local, gerados na queima do diesel como combustível em gramas por MJ (Oliveira, 2011).

Tabela 2 – Índice de emissão dos poluentes gerados pela queima de óleo diesel

Efeitos	Poluente	Diesel (g/MJ)
GEE	CO ₂	74,06670
	CH ₄	0,00500
	N ₂ O	0,00060
GEL	HC	0,20000
	CO	1,00000
	NO _x	0,80000
	SO _x	0,31389
	MP	0,02778

Fonte: Oliveira, 2011.

Com dados da TAB. 2 pode-se calcular a emissão de poluentes pela equação:

$$E = (C P_{cal} E_{gás}) / 10^{15}$$

Onde E é a emissão do poluente em Mt/ano, C é o consumo anual de diesel pela frota da cidade de Maricá (5.581.716 L/ano), P_{cal} é o poder calorífico do diesel (38.376,21 MJ/m³) e $E_{gás}$ é o índice de emissão dos poluentes provenientes da queima do diesel. Os resultados obtidos são mostrados na TAB. 3.

Tabela 3 – Emissão de poluentes pela frota de ônibus a diesel na cidade de Maricá.

Tipos de efeitos	Poluentes	Emissão (Mt/ano)
GEE	CO2	0,016
	CH4	1,07103E-06
	N2O	1,28523E-07
GEL	HC	4,2841E-05
	CO2	0,000214205
	NOX	0,000171364
	SOX	6,72368E-05
	MP	5,95062E-06

O valor econômico do ar atmosférico degradado pelas emissões de poluentes liberados pela queima do diesel nos ônibus urbanos na cidade de Maricá é composto de uma parcela considerando o valor da degradação do ar por poluentes de efeito local e por gases do efeito estufa.

O cálculo para efeito local é usado a partir dos custos diretos de poluição por tipo de poluente conforme tabela abaixo TAB.4. Esses custos são oriundos de estudos do Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA) e pela Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP) baseados em fontes internacionais adaptados a realidade brasileira, sendo reduzidos de acordo com a relação aproximada da renda *per capita* brasileira (Lascales, 2011).

Tabela 4 – Custo direto da poluição do ar por tipo de poluente

Poluente	US\$/t
NOx	1.289,91
HC	1.312,95
CO	218,82
MP	1.048,05

Fonte: Lascales, 2011.

Multiplicando a quantidade de poluentes de efeito local emitidos, fornecidos na TAB. 3, com o custo da poluição se chega ao valor da degradação do ar causada pelos poluentes de efeitos locais emitido pelo consumo de diesel na cidade de Maricá apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Custo anual do valor de degradação do ar por poluentes de efeitos locais

Poluente	Valor (US\$/t)	Quantidade (tonelada/ano)	(US\$/ano)
NOx	1.289,91	17,1364	22104,42
HC	1.312,95	4,284102108	5624,81
CO	218,82	21,42051054	4687,2361
MP	1.048,05	0,595061783	623,6545
Total:			33040,13

Dessa forma é possível perceber que analisando apenas o custo ambiental e social devido a emissão de poluentes de efeitos locais se estima um custo de US\$ 33040,13 por ano. Tendo a frota total do município 135 veículos a diesel chegam-se a um custo anual aproximado de US\$ 4.460.417,55. Ressalta-se que esse custo deve ser avaliado ao se analisar a viabilidade na substituição da frota de ônibus a diesel por hidrogênio.

PROPOSIÇÕES

Para analisar a viabilidade econômica para substituição da frota de ônibus a diesel por hidrogênio, deve ser feita uma análise dos custos de produção, armazenamento e transporte do hidrogênio. Em seguida, analisam-se os custos de instalação da fábrica de hidrogênio e das estações de abastecimento, a estimativa de preço dos veículos a hidrogênio e o custo do consumo de combustível. Para avaliar os custos de produção, baseia-se em dados da literatura técnica, conforme explicado por Yan e Hino (2011).

Tabela 6 – Custos estimado da tecnologia de produção pelo gás natural

Tecnologia e combustível	Custo da capacidade				Custo da produção de hidrogênio (US\$/kg)			
	Capacidade 1000 kg/dia	Milhões de dólares	Dólares por 1000 kg/dia	Fator de capacidade (%)	Instalação	Matéria prima	O&M	Total
Reforma do gás natural centralizado	379.387	181	477	90	0,18	1,15	0,14	1,47
Reforma do gás natural distribuído	1500	1,14	760	70	0,40	1,72	0,51	2,63

A TAB.6 apresenta apenas os custos de instalação da fábrica e custos com produção, excluindo os custos com armazenamento, transporte, compressão e distribuição, uma vez que são complexos de mensurar pois envolve fatores como equipamentos e distâncias a serem percorridas.

No caso da produção de hidrogênio para substituição da frota de ônibus da cidade de Maricá, deve-se considerar a tecnologia energética, em prol de um meio ambiente saudável, a fim de reduzir ao máximo a emissão de poluentes. O município apresenta esforços para superar as barreiras de transição dos combustíveis fósseis, com foco na economia do hidrogênio, de forma que sejam viáveis todas as fases do ciclo de hidrogênio, incluindo sua produção e seu uso final.

O modelo desenvolvido no município pela Coppe traz algumas características, tais como:

- **Exaustão limpa:** considerando que durante seu funcionamento a célula combustível tem como produto apenas o vapor da água, emissões de CO₂ e outros gases potencialmente poluentes não são liberadas durante o funcionamento do veículo.
- **Alta eficiência:** um dos desafios para os veículos elétricos é equiparar a potência dos motores a combustão; contudo, as células a combustíveis combinadas ao motor elétrico apresentam eficiência duas vezes maior que os veículos à gasolina (MIRANDA, 2019).
- **Rápido abastecimento e sem ruídos:** o tanque de um veículo a célula combustível leva cerca de cinco minutos para ser abastecido. Em maio de 2021, o Toyota Mirai bateu o recorde de distância percorrida com apenas um tanque de hidrogênio, percorrendo 1.003 km. Na ocasião, como parte da demonstração, o tanque levou menos de cinco minutos para ser preenchido, a

uma pressão de 700 bar na estação de recarga (TOYOTA, 2021). É um tempo mínimo e pode ser comparado ao tempo de abastecimento de carros à gasolina; e, como o motor é elétrico, esses veículos são praticamente silenciosos (MIRANDA, 2019).

De acordo com estudos desenvolvidos pelo Município de Maricá através da contratação de encomenda tecnológica de ônibus híbrido a hidrogênio com a Coope, o custo médio de produção desses veículos está em torno de R\$ 1.800.000,00. Possuem a mesma capacidade de transporte de passageiros que o ônibus a diesel, sendo a quantidade de veículos a mesma. Portanto o custo de substituição total da frota seria em torno de R\$ 243.000.000,00. Este custo está superestimado pois não considera a produção em série.

O protótipo em desenvolvimento entrará em fase de teste em 2024, onde serão apurados indicadores e métricas considerando a geografia local, quantidade de passageiros, clima, e número de paradas que influenciam diretamente no consumo para abastecimento. Considerando estudos apresentados por Paladino, 2013 o consumo de hidrogênio seria de 45Kg por 300 km. Assim para percorrer o total percorrido pelos ônibus de Maricá que são 1.460.726 Km/mês em média (EPT, 2023), necessita-se de 219.109 kg de hidrogênio. Segundo estudos da Agência Internacional de Energia (IEA) o custo do hidrogênio azul custa em média US\$ 2,30/Kg, dessa forma o gasto mensal seria em torno de US\$ 503.950,70, convertendo em Real brasileiro a média se dá em R\$ 2.484.476,00. Comparando com o consumo a diesel considerando um consumo mensal de 465.143 L e ainda, o custo médio do diesel no Estado do Rio de Janeiro de R\$ 5,95 o gasto mensal atual com combustível é de R\$ 2.767.600,00.

O país pode se tornar protagonista no desenvolvimento de tecnologias que garantam a demanda na utilização do hidrogênio produzido nacionalmente, ao agregar valor tecnológico e industrial a partir da nova matriz energética que se desenha mundialmente, ultrapassando a sina brasileira da sustentação do PIB a partir de *commodities*.

Ainda sobre o uso do hidrogênio, o Brasil tenta desenvolver suas tecnologias, mercado e usos locais, avaliando as possibilidades de exportação, principalmente através de produtos descarbonizados com esse elemento.

Mediante a diversidade de métodos de produção que exploram características próprias para o hidrogênio renovável e de baixo carbono, evidenciam-se a soberania e a diversidade tecnológica, no desenvolvimento empresarial e na criação de demanda interna, sendo essas premissas prioritárias para o alcance do protagonismo desejado.

CONCLUSÕES

O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo contudo, é preciso compreender como expandir sua utilização para fins energéticos e o uso dessa parcela significativa de demanda necessária ao planeta no momento em que se descortina uma transição energética. Será uma mudança considerável na natureza e no padrão de como a energia será usada no país e no mundo, com o declínio gradual da indústria de energia fósseis e o crescimento da indústria de energia renovável. Trata-se de uma transição que demanda tempo para surgimento, acolhimento e o desenvolvimento de novas tecnologias e procedimentos. É necessário escalar e difundir o desenvolvimento tecnológico para o uso energético do hidrogênio em suas múltiplas rotas de produção.

Os ônibus movidos a diesel geram custos sociais e ambientais que foram analisados junto a viabilidade econômica para substituição da frota. Maricá se mostra favorável quanto à substituição gradativa da frota, pois embora em um primeiro momento se pareça mais onerosa, seus custos ambientais são nulos. Além disso, a vida útil dos ônibus a hidrogênio é maior que a do ônibus a diesel. Também se destacam o conforto oferecido por esses veículos e a emissão zero de gases poluentes, o que deve atrair mais usuários para o sistema de transporte coletivo.

Apesar das aplicações já desenvolvidas, inclusive no setor de transportes públicos urbanos, ainda há limitações tecnológicas, econômicas e regulatórias para uma transição energética. Assim como todas as estratégias em relação à questão energética, o tema envolve fatores tecnológicos, sociais, econômicos, ambientais e políticos. A solução, principalmente no âmbito financeiro, está associada ao estabelecimento de parcerias entre setor privado e público, da indústria, academia e governos, com foco no investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação para difundir e ampliar uma infraestrutura econômica e ambientalmente viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**, IPEA, Brasília, 2011.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente; Resoluções. Disponível em <http://conama.mma.gov.br/>. Acesso em set. 2023.

EPT. Empresa Pública de Transportes. **Estrutura**. Disponível em: <https://www.eptmarica.rj.gov.br/>. Acesso em set. 2023.

IEA. International Energy Agency. **Global ev outlook 2021**. International Energy Agency: Paris, France, 2021a.

IEA. International Energy Agency. **Global Hydrogen Review 2021**. [s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>. 2021b. Acesso em set. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**. Rio de Janeiro: MME, 2021.

HYDROGEN COUNCIL. **Path to hydrogen competitiveness: a cost perspective**. 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Maricá**. Código: 3302700. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/marica.html>. Acesso em set. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The future of hydrogen: seizing today's opportunities**. Paris, 2019.

KNIGHT, V.M.; YOUNG, C.E.F. **Análise custo benefício da substituição do diesel por gás natural veicular em ônibus na Região Metropolitana de São Paulo**, Boletim Infopetro Petróleo & Gás Brasil. Instituto de Economia – UFRJ. Fevereiro, 2006.

LASCALA, T.S.L. **Externalidades da substituição do diesel pelo etanol no transporte público da Região Metropolitana de São Paulo** USP Programa de Pós Graduação em Energia. Tese de doutorado. São Paulo, 2011.

MIRANDA, P. E. V. **Science and engineering of hydrogen-based energy technologies**. [S.l.]: Elsevier, 2019.

OLIVEIRA, J.A. **Estimativa da emissão dos gases de efeito local – GEL's de Efeito estufa – GEE's da frota a diesel do sistema integrado de transportes de Fortaleza – SIT-FOR** Departamento de Engenharia de Transportes – DET Universidade Federal do Ceará – UFC; 2011. Disponível em: http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/antp_15congr/pdf/DU-025.pdf. Acesso em set. 2023.

PALADINO, P. A. **Uso do hidrogênio no transporte público da cidade de São Paulo.** Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear). 216 p. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2013.

TOYOTA. **Toyota mirai breaks world record for distance driven with one fill of hydrogen.** 2021. Disponível em: <https://newsroom.toyota.eu/toyota-mirai-breaks-world-record-for-distance-driven-with-one-fill-of-hydrogen>. Acesso em set. 2023.

YAN, X. L.; HINO, R. **Handbook Hydrogen Production.** Ohio, USA, 2011.