

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO SETOR DE TRANSPORTES: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA UMA MATRIZ SUSTENTÁVEL NO RIO DE JANEIRO

ANDRÉ MIGUEL BERNARDO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ

ALEXANDRE DE CARVALHO PEREIRA

RODRIGO RODRIGUES DE FREITAS

CEFET - CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA - RJ

MARCELO BORGES ROCHA

Introdução

A transição energética no setor de transportes configura-se como desafio estratégico para o cumprimento das metas climáticas brasileiras. O Rio de Janeiro, maior produtor nacional de gás natural, exemplifica o paradoxo da transição: recurso fóssil pode acelerar ou comprometer a descarbonização. O artigo analisa a integração estratégica do gás natural, biometano e hidrogênio verde como vetores complementares na matriz sustentável fluminense, considerando aspectos técnicos, econômicos e regulatórios.

Problema de Pesquisa e Objetivo

O problema central é a contradição entre a matriz elétrica renovável brasileira e a dependência fóssil no transporte, agravada no Rio de Janeiro pela abundância de gás natural. O objetivo é analisar a viabilidade de integração do gás natural, biometano e hidrogênio verde como vetores complementares na transição energética do transporte fluminense, identificando sinergias e barreiras técnicas, sociais, econômicas e regulatórias.

Fundamentação Teórica

O artigo fundamenta-se na teoria da transição energética, abordando riscos de lock-in tecnológico e ativos encaixados. Adota a perspectiva triple bottom line alinhada aos ODS 7, 9 e 11, incorporando governança multinível para análise da coordenação institucional. Utiliza referenciais de economia circular para o biometano e inovação sustentável para o hidrogênio verde, considerando o marco regulatório brasileiro como elemento central da transição energética no transporte fluminense.

Metodologia

O estudo utilizou revisão bibliográfica qualitativa, consultando Web of Science, Scopus e documentos oficiais (2020-2025). Foram analisados 38 trabalhos mediante critérios de relevância temática e atualidade. A abordagem permitiu análise crítica convergências/divergências na literatura, integrando dimensões técnicas, econômicas e regulatórias dos três vetores energéticos investigados, com foco na aplicabilidade ao caso fluminense.

Análise e Discussão dos Resultados

A análise identifica o gás natural como ponte estratégica, porém com riscos de lock-in tecnológico. O biometano apresenta potencial circular imediato, mas enfrenta barreiras de escala e custos. O hidrogênio verde emerge como solução de longo prazo, dependente de inovação e políticas robustas. A integração dos três vetores requer coordenação institucional, financiamento adequado e regulação clara para efetividade da transição energética fluminense.

Considerações Finais

Conclui-se que a transição energética no transporte fluminense exige integração estratégica dos três vetores analisados. O gás natural opera como ponte transitória, o biometano como solução circular imediata e o hidrogênio verde como alternativa de longo prazo. Sucesso depende de coordenação institucional, investimentos em infraestrutura e políticas alinhadas aos ODS 7, 9 e 11, garantindo transição justa e sustentável para o Rio de Janeiro.

Referências

ANP. Boletim Produção 2025. 2025. BURSZTYN et al. Estudos Avançados, v.39, 2025. CALDERÓN-MÁRQUEZ. Dyna, v.90, 2023. COLUCCI et al. Applied Energy, v.388, 2025. FERREIRA. Horizontes Antropológicos, v.30, 2024. GUZOWSKI et al. Ambiente & sociedade, v.24, 2021. STANLEY. Ciências administrativas, n.23, 2023. TEIXEIRA et al. BNDES Setorial, v.27, 2021.

Palavras Chave

Gás Natural, Biometano, Hidrogênio Verde

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO SETOR DE TRANSPORTES: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA UMA MATRIZ SUSTENTÁVEL NO RIO DE JANEIRO

1 INTRODUÇÃO

A transição energética no setor de transportes configura-se como desafio estratégico para o cumprimento das metas climáticas brasileiras. Responder à crise climática e à pressão sobre recursos naturais exige não apenas inovação tecnológica, mas também incentivos fiscais, regulamentação técnica, financiamento público. Stanley (2024) alerta que a queima de combustíveis fósseis desde o século XX acelerou o aquecimento global, resultando em eventos climáticos extremos, como secas, enchentes e tempestades devastadoras, com elevados custos humanos, ambientais e econômicos.

A própria transição energética, segundo Stanley (2024), carrega riscos próprios, conhecidos como riscos de transição, que incluem a possibilidade de desvalorização súbita de ativos poluentes ("ativos encalhados"), afetando economias inteiras. Além disso, adaptar indústrias, legislações e modelos de negócio a uma economia de baixo carbono implica custos elevados e complexidade elevada.

No Brasil, essa encruzilhada assume características particulares. Apesar de ser considerado uma potência verde, com matriz elétrica baseada em hidrelétricas, energia eólica e biomassa, o setor de transportes permanece fortemente dependente de combustíveis fósseis. Em 2024, o setor respondeu por 33,2% do consumo energético nacional, um aumento de 2,7% em relação a 2023 (EPE, 2025). Essa disparidade gera uma questão central: como liderar em energias renováveis enquanto se mantém um transporte altamente carbonizado?

Ferreira (2021) alerta que a transição energética é fundamentalmente política e geopolítica. Diferentes grupos, de governos a empresas petrolíferas e startups tecnológicas, disputam o controle do futuro energético. Nesse cenário, desigualdades e relações de poder podem se camuflar sob o discurso de sustentabilidade. O Rio de Janeiro, maior produtor nacional de gás natural, é um caso paradigmático, ilustrando como um combustível fóssil pode, paradoxalmente, pavimentar o caminho para um futuro renovável.

2 CONTEXTO HISTÓRICO E FUNDAMENTOS DA TRANSIÇÃO

A relação entre sociedade, economia e meio ambiente sempre foi marcada por tensões. Como destacam Freitas e Balzan (2024), nos últimos cinco séculos, transformações sociais e tecnológicas profundas redefiniram a dinâmica entre humanidade e natureza, resultando em impactos ambientais severos e, muitas vezes, irreversíveis. O modelo de desenvolvimento industrial, baseado na exploração intensiva de recursos naturais, gerou riqueza e inovação, mas também deixou um legado de vulnerabilidades ambientais e sociais, incluindo poluição, desmatamento e desigualdade no acesso à energia limpa (FREITAS; BALZAN, 2024).

No Brasil, a exploração do Pré-Sal realçou a dependência de combustíveis fósseis, criando uma tensão entre a identidade de potência verde e a realidade de uma economia ainda fortemente vinculada à renda petrolífera. O setor de transportes contribui significativamente para as emissões nacionais de gases de efeito estufa, concentrando-se nos estados do Sudeste – especialmente São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro – conforme apresentado pelo SEEG (2023).

Embora o diesel e a gasolina automotiva permaneçam dominantes, observa-se crescimento relativo de alternativas como o gás natural veicular (GNV) e o etanol hidratado, que vêm ganhando relevância dentro da estratégia de transição energética no transporte rodoviário (ALONSO et al., 2025; ABA et al., 2023). Além da dimensão geográfica, a análise

histórica das emissões de CO₂ por combustível revela a predominância do diesel e da gasolina, com crescimento relativo do gás natural seco desde os anos 2000, reflexo da expansão da infraestrutura e adoção tecnológica, enquanto o etanol mantém contribuição mais estável (SEEG, 2023).

Ferreira (2021) destaca que, desde as décadas de 1970 e 1980, os paradigmas de segurança e eficiência energética moldam políticas nacionais, mas frequentemente ignoram dimensões sociais, culturais e políticas cruciais para uma transição justa e transformadora.

Além desses aspectos, a transição energética no Brasil é orientada por um arcabouço regulatório crescente. A Lei nº 14.134/2021, conhecida como Nova Lei do Gás, estabelece a intercambiabilidade do biometano com o gás natural, permitindo sua injeção na rede de gasodutos existente. A Lei nº 14.993/2024 institui programas de incentivo à redução de emissões por meio do uso de biometano, estabelecendo metas para sua inserção gradual no mercado a partir de 2026. Complementarmente, o Decreto nº 12.614/2025 limita inicialmente a inclusão de até 1% de biometano na rede de gás natural, definindo metas escalonadas de aumento e orientando a ANP e o CNPE quanto à fiscalização e à integração do biocombustível na matriz energética.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) também regulamenta especificações técnicas para o biometano destinado a uso veicular e comercial por meio das Resoluções nº 886/2022 e nº 906/2022.

No âmbito do Rio de Janeiro, o Decreto Estadual nº 49.715/2025 regulamenta a Política Estadual de Gás Natural Renovável, permitindo a produção e distribuição de biometano por meio da infraestrutura existente e incentivando a inserção de biogás no sistema de distribuição. Além disso, o Decreto nº 48.813/2023 institui o programa de Corredores Sustentáveis, promovendo postos de combustíveis adaptados para abastecimento com GNV e biometano em rotas estratégicas para transporte pesado, e concedendo o “Selo Corredor Sustentável” aos estabelecimentos que atendem aos critérios de sustentabilidade.

Esse conjunto normativo evidencia que a implementação de alternativas energéticas no setor de transportes depende não apenas da tecnologia ou disponibilidade de recursos, mas de uma coordenação regulatória eficiente, capaz de orientar investimentos, garantir segurança e incentivar práticas sustentáveis.

Dessa forma, a contextualização histórica, tecnológica e regulatória do setor estabelece o pano de fundo necessário para compreender os desempenhos energético e ambiental dos diferentes vetores de combustível, permitindo analisar, na sequência, como o gás natural, o biometano e o hidrogênio verde podem ser integrados de forma estratégica na transição energética brasileira. Essa ponte entre contexto e análise evidencia que qualquer discussão sobre alternativas energéticas não pode se restringir a questões técnicas isoladas, mas deve considerar aspectos históricos, sociais, econômicos e institucionais que influenciam diretamente a viabilidade e o impacto das soluções propostas.

3 METODOLOGIA

O presente artigo foi desenvolvido por meio de uma análise bibliográfica de caráter qualitativo, voltada a compreender o papel do gás natural, do biometano e do hidrogênio verde no contexto da transição energética e usa contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Para tanto, foram consultadas bases de dados reconhecidas, como Web of Science e o Scopus, com o intuito de reunir publicações recentes que abordassem a temática.

O recorte temporal adotado privilegiou estudos publicados entre 2020 e 2025, período em que houve intensificação dos debates sobre descarbonização do setor de transportes e ampliação de pesquisas voltadas a combustíveis de baixo carbono. O critério de seleção considerou a relevância dos trabalhos para os objetivos da pesquisa, de modo a incluir artigos,

relatórios técnicos e documentos de políticas públicas que dialogassem diretamente com a problemática analisada.

A abordagem qualitativa permitiu não apenas identificar evidências presentes na literatura, mas também realizar uma análise crítica e interpretativa das convergências e divergências entre os autores. Dessa forma, buscou-se construir uma síntese capaz de integrar aspectos econômicos, ambientais e regulatórios associados ao uso do gás natural, do biometano e do hidrogênio verde como vetores da transição energética.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desempenho Energético e Emissões no Setor de Transportes

A literatura recente (2020–2025) mostra que o setor de transportes brasileiro permanece fortemente dependente de combustíveis fósseis, com impactos significativos sobre as emissões de gases de efeito estufa (SEEG, 2023; ALONSO et al., 2025; ABA et al., 2023). Diesel e gasolina continuam sendo os principais vetores de emissão, enquanto alternativas como gás natural veicular (GNV) e etanol hidratado apresentam crescimento, mas ainda limitado.

O Estado do Rio de Janeiro, responsável por 63,74% da produção nacional de gás natural (ANP, 2025), exemplifica o paradoxo dessa transição: embora a disponibilidade de um recurso fóssil permita reduções de emissões imediatas, a expansão de infraestrutura de GNV e frota adaptada cria risco de lock-in tecnológico (STANLEY, 2024; TEIXEIRA et al., 2021). Esse cenário evidencia que os ganhos de curto prazo não são suficientes para assegurar metas de descarbonização de médio e longo prazo, sendo necessário planejamento estratégico para evitar dependência prolongada de combustíveis fósseis.

4.2 Avaliação do Papel do Gás Natural

O gás natural é comumente apresentado como combustível de transição, por sua densidade energética, disponibilidade e compatibilidade com a infraestrutura existente (TEIXEIRA et al., 2021). No entanto, essa alternativa carrega limitações importantes:

- Lock-in tecnológico: investimentos em gasodutos, terminais e frota adaptada tendem a prolongar a dependência de combustíveis fósseis, retardando a migração para alternativas renováveis (STANLEY, 2024).
- Impactos climáticos indiretos: vazamentos de metano, conhecidos como *methane slip*, podem reduzir ou mesmo anular os benefícios ambientais esperados, devido ao elevado potencial de aquecimento global do metano em horizontes de 20 anos (STANLEY, 2024).
- Custo-benefício de curto prazo: embora contribua para reduções imediatas de emissões, a eficiência econômica e ambiental do gás natural depende de regulação rigorosa e monitoramento contínuo (TEIXEIRA, 2021).

A Lei nº 14.134/2021 (Nova Lei do Gás) estabelece o marco legal para a integração do gás natural e do biometano, permitindo sua injeção na rede existente. O gás natural, conforme destaca Ferreira (2021), funciona como ponte monitorada dentro de um plano regulatório que define limites e metas para inovações de baixo carbono.

4.3 Biometano: Potencial Circular e Barreiras

O biometano, derivado da purificação do biogás proveniente de resíduos sólidos, agroindústrias e estações de tratamento de esgoto, apresenta atributos estratégicos dentro de uma perspectiva de bioeconomia circular (CALDERÓN-MÁRQUEZ, 2023; MÁRQUEZ, 2023). Além de substituir combustíveis fósseis, ele reduz a emissão direta de metano, contribuindo simultaneamente para mitigação climática. Outro ponto favorável é a compatibilidade com a infraestrutura existente: pode ser injetado na rede de gasodutos e utilizado em motores adaptados, minimizando investimentos adicionais.

Contudo, existem barreiras importantes. A produção descentralizada e os custos elevados de purificação limitam a escalabilidade do biometano. Ademais, apesar das recentes regulamentações, a ausência de políticas públicas específicas que reconheçam e remunerem suas externalidades positivas, bem como a inclusão social de catadores e pequenas cooperativas, permanece um desafio significativo (GUZOWSKI et al., 2021; MÁRQUEZ, 2023). Portanto, embora promissor, o biometano requer suporte regulatório, financeiro e social para se consolidar como vetor de transição eficaz.

4.4 Hidrogênio Verde: Perspectivas de Longo Prazo

O hidrogênio verde surge como vetor estratégico de longo prazo, especialmente para o transporte pesado e de longa distância (COLUCCI et al., 2025). Produzido via eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, pode ser utilizado puro, em blending com gás natural ou em células a combustível, promovendo significativa redução de emissões de gases de efeito estufa.

Desafios econômicos e tecnológicos permanecem relevantes: o custo de produção ainda é elevado, a eficiência energética do ciclo completo é inferior à de baterias elétricas, e toda a infraestrutura de transporte, armazenamento e distribuição precisa ser desenvolvida praticamente do zero (NOGUCHI; NOBRE, 2023).

No Brasil, a regulamentação específica para o hidrogênio verde está sendo estruturada a partir da Lei nº 14.948/2024, que institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, cria incentivos à pesquisa, desenvolvimento e implementação de programas de fomento e estabelece diretrizes para certificação e produção sustentável do hidrogênio. O potencial eólico offshore do Rio de Janeiro pode viabilizar competitividade futura, caso políticas públicas, industrialização e inovação tecnológica endógena sejam coordenadas de maneira estratégica (BURSZTYN et al., 2025).

4.5 Integração dos Vetores Energéticos e Implicações Sociais e Institucionais

A análise aponta que a transição energética no setor de transportes deve integrar os três vetores analisados: gás natural como ponte monitorada, biometano como alternativa circular imediata e hidrogênio verde como solução de longo prazo. Para isso, são fundamentais:

- Coordenação institucional: superar a fragmentação entre ministérios, agências reguladoras e governos estaduais, garantindo planejamento coeso (BURSZTYN et al., 2025).
- Justiça social: evitar que custos de descarbonização sejam repassados desproporcionalmente a usuários vulneráveis, garantindo atenção à pobreza energética (GUZOWSKI et al., 2021).
- Inovação financeira: implementação de mecanismos como créditos de carbono, fundos ESG e incentivos fiscais para atrair capital privado e estimular investimentos em frotas limpas (FREITAS; BALZAN, 2024).

- Conformidade regulatória: respeitar limites legais de injeção de biometano, metas de expansão e regulamentações futuras para hidrogênio, garantindo segurança técnica e previsibilidade para investidores.

Portanto, a transição energética no transporte brasileiro é, antes de tudo, um processo político, social e estratégico, que exige articulação entre interesses diversos, regulação clara e visão de longo prazo (FERREIRA, 2021; STANLEY, 2024; TEIXEIRA et al., 2021). A experiência do Rio de Janeiro demonstra que apenas a integração desses vetores, acompanhada de políticas coordenadas, pode transformar o setor de transportes em motor de desenvolvimento sustentável.

5 CONCLUSÃO

A transição energética no setor de transportes brasileiro, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 9 e 11, configura-se como um processo multifacetado, complexo e cheio de contradições. O caso do Estado do Rio de Janeiro ilustra bem esse dilema: a abundância de gás natural permite reduzir emissões no curto prazo, mas também traz o risco de perpetuar a dependência de combustíveis fósseis, criando um aprisionamento tecnológico e estrutural que pode adiar investimentos em fontes verdadeiramente renováveis.

Os resultados demonstram que a transição para combustíveis sustentáveis no transporte fluminense representa contribuição estratégica para o cumprimento da Agenda 2030, particularmente no acesso à energia limpa (ODS 7), no desenvolvimento de infraestruturas resilientes (ODS 9) e na promoção de cidades sustentáveis (ODS 11).

Fica claro que soluções tecnocráticas ou puramente economicistas não são suficientes. A transição exige abordagens flexíveis, precavidas e adaptativas, capazes de equilibrar os custos imediatos com os benefícios ambientais e sociais de longo prazo. Entre os elementos essenciais estão a redução da pobreza energética, a promoção da justiça climática e a superação da fragmentação institucional.

Além disso, a experiência do Rio de Janeiro mostra que a integração estratégica do gás natural, do biometano e do hidrogênio verde só será efetiva se houver políticas claras, coordenação entre Estado, setor privado e sociedade, e visão de longo prazo. A efetividade da transição energética no transporte fluminense depende da implementação coordenada do marco regulatório recente (Leis 14.134/2021 e 14.948/2024), com alocação específica de recursos para infraestrutura de abastecimento.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural - Abril 2025**. Brasília: ANP, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>. Acesso em: 25 set. 2025.

BURSZTYN, Marcel *et al.* Da proteção social à proteção socioambiental em tempos de mudança climática: uma retrospectiva e uma proposta. **Estudos Avançados**, v. 39, n. 114, 2025.

CALDERÓN-MÁRQUEZ, Ana Julieth. Biogas utilization from municipal solid waste in developing countries towards the transition to sustainable development – The Colombian case. **Dyna**, v. 90, n. 227, p. 147–156, 2023.

COLUCCI, G. et al. Combined assessment of material and energy supply risks in the energy transition: A multi-objective energy system optimization approach. **Applied energy**, v. 388, n. 125647, p. 125647, 2025.

FERREIRA, Andrey Cordeiro. Desenvolvimento e geoecopolítica da energia: uma antropologia da transição energética e dos confrontos por hegemonia no sistema interestatal. **Horizontes Antropológicos**, v. 30, n. 70, 2024.

GUZOWSKI, Carina; MARTIN, María María Ibañez; ZABALOY, María Florencia. Energy poverty: conceptualization and its link to exclusion. Brief review for Latin America. **Ambiente & sociedade**, v. 24, 2021.

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissão de Gases. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-gross-emissions-by-sector-nci&_gl=1*1mr700*_ga*OTAyMzUyOTIuMTc0ODYxNDUyOA.*_ga_XZWSWEJDWQ*czE3NDg2MTQ1MjgkbzEkZzAkdDE3NDg2MTQ1MjgkajYwJGwwJGgw. Acesso em: 9 set. 2025.

SILVA, T. B, Delgado, F., **Leapfrogging do Gás Natural na Transição Energética: Mais Renováveis, Mais Tecnologias E Mais Stranded Assets, 2018**, Coluna Opinião, Fgv Energia, Agosto, disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opiniao_-_leapfrogging.pdf. Acesso em: 08 set. 2025

STANLEY, Leonardo E. Cambio Climático y Desarrollo sustentable: Incertidumbres y Narrativas. **Ciencias administrativas**, n. 23, p. 134, 2023.

TEIXEIRA, Cássio Adriano Nunes ... [et al.]. **Gás natural: um combustível-chave para uma economia de baixo carbono**. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. [131]-175, mar. 2021. Disponível em <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20802>. Acesso em: 08 set. 2025

TEIXEIRA, R. L. P.; PESSOA, Z. S. Energias renováveis e mudanças climáticas: análise de políticas públicas correlatas em estados do Nordeste brasileiro. **Ambiente & Sociedade (Online)**, 2024.