

Infraestrutura inteligente para transporte de cargas autônomo: contribuições ao ODS 9 a partir de corredores rodoviários brasileiros

Smart infrastructure for autonomous freight transport: contributions to SDG 9 from Brazilian road corridors.

Kamila de Fátima Machado Paiva, Universidade Federal de Juiz de Fora.

kamila.machado@estudante.ufjf.br

Luísa Muglia Souza Porphyrio, MSc, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

luisa.muglia@pet.coppe.ufrj.br

José Alberto Barroso Castañón, DSc, Universidade Federal de Juiz de Fora.

jose.castanon@ufjf.br

Resumo

Este artigo investiga a contribuição da infraestrutura rodoviária brasileira para a sustentabilidade e o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 9 (ODS 9) no contexto da operação de caminhões autônomos. A metodologia empregada incluiu uma revisão sistemática da literatura sobre veículos autônomos e infraestrutura, um diagnóstico da malha rodoviária nacional com base em dados da Pesquisa CNT de Rodovias 2025, e a análise da infraestrutura digital e conectividade móvel fornecida pela Anatel. Os resultados revelam um descompasso significativo entre as exigências técnicas para a operação segura e eficiente de caminhões autônomos e a realidade da infraestrutura física e digital brasileira. A precariedade do pavimento, as deficiências na sinalização e a ausência de acostamentos em extensos trechos, somadas à cobertura intermitente de conectividade 4G e 5G em corredores logísticos, configuram-se como entraves substanciais. Conclui-se que a modernização integrada da infraestrutura física e digital é um imperativo estratégico para a materialização dos benefícios ambientais, econômicos e de segurança dos caminhões autônomos, alinhando o setor de transportes brasileiro às metas de descarbonização e inovação preconizadas pelo ODS 9.

Palavras-chave: ODS 9; Caminhões Autônomos; Infraestrutura;

Abstract

This article investigates the contribution of Brazilian road infrastructure to sustainability and the achievement of Sustainable Development Goal 9 (SDG 9) in the context of autonomous truck operation. The methodology employed included a systematic literature review on autonomous vehicles and infrastructure, a diagnosis of the national road network based on data from the 2025 CNT Road Survey, and an analysis of digital infrastructure and mobile connectivity provided by Anatel. The results reveal a significant disparity between the technical requirements for the safe and efficient operation of autonomous trucks and the reality of Brazil's physical and digital infrastructure. Poor pavement conditions, signaling deficiencies, and the absence of shoulders on extensive stretches, coupled with intermittent 4G and 5G connectivity coverage in logistics corridors, constitute substantial obstacles. It is concluded that the integrated modernization of physical and digital infrastructure is a strategic imperative for realizing the environmental, economic, and safety benefits of autonomous trucks,

aligning the Brazilian transport sector with the decarbonization and innovation goals advocated by SDG 9.

Keywords: SDG 9; Autonomous Trucks; Infrastructure;

1. Introdução

A descarbonização do setor de transportes é reconhecida como um dos principais desafios no enfrentamento das mudanças climáticas, figurando como eixo estratégico de políticas ambientais internacionais, como a Lei do Clima da União Europeia, que estabelece a neutralidade climática até 2050 (Plötz et al., 2023). Nesse contexto, o transporte rodoviário de cargas destaca-se pelo elevado consumo energético e por sua contribuição significativa às emissões de gases de efeito estufa, configurando-se como um setor prioritário para ações de mitigação em escala global e local (International Energy Agency, 2022).

A busca por soluções mais sustentáveis tem sido orientada por marcos internacionais, com destaque para a Agenda 2030 das Nações Unidas. O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 9 (ODS 9) enfatiza o desenvolvimento de infraestruturas resilientes, a modernização tecnológica e o estímulo à inovação como pilares do crescimento econômico sustentável (Nações Unidas Brasil, 2025). No setor de transportes, essas diretrizes se traduzem na necessidade de modernização das redes logísticas e dos sistemas de mobilidade, visando à maior eficiência, segurança e à redução de impactos ambientais.

Nesse cenário, as tecnologias autônomas aplicadas ao transporte de cargas emergem como uma alternativa promissora ao integrar inovação tecnológica à infraestrutura de transportes. Sistemas baseados em comunicação veículo a veículo e em estratégias cooperativas de condução apresentam potencial para elevar a eficiência operacional e reduzir o consumo de combustível ao longo da cadeia logística (Sindi e Woodman, 2021; Anderhofstadt e Spinler, 2019). Ademais, sistemas inteligentes de rastreamento e mapeamento contribuem para o aprimoramento do gerenciamento de rotas e para a mitigação de gargalos logísticos (Villarreal et al., 2017).

Entretanto, a materialização desses benefícios depende diretamente da disponibilidade de uma infraestrutura física e digital adequada. Rodovias com pavimentos em boas condições, geometria compatível e sinalização eficiente, associadas a redes de conectividade confiáveis, especialmente o 5G, são essenciais para garantir a operação segura e resiliente de sistemas autônomos, viabilizando o intercâmbio contínuo de dados em tempo real (Llopis-Castelló, 2024; Boer et al., 2017). A degradação da infraestrutura, intensificada pelo tráfego elevado e por fatores climáticos, compromete a confiabilidade operacional e representa um entrave relevante à automação do transporte rodoviário (Sattar et al., 2025).

No Brasil, essa discussão assume particular relevância, uma vez que o modo rodoviário predomina na matriz de transportes, respondendo por cerca de 65% do transporte de cargas e 95% dos passageiros (CNT, 2025). Embora a automação de frotas apresenta potencial para reduzir acidentes e otimizar custos operacionais, sua implementação ainda enfrenta desafios estruturais significativos. Apesar do avanço do debate internacional, a literatura nacional

carece de análises aprofundadas sobre a viabilidade técnica e logística da adoção de caminhões autônomos em corredores rodoviários brasileiros. Diante desse contexto, o presente artigo analisa como a infraestrutura necessária à operação de caminhões autônomos pode contribuir para a sustentabilidade e para o cumprimento do ODS 9 no cenário nacional, buscando subsidiar o debate técnico-científico e a formulação de políticas públicas voltadas à modernização da infraestrutura rodoviária.

2. Referencial Teórico

2.1. Os Desafios do Transporte Rodoviário Brasileiro frente às Metas de Sustentabilidade: Infraestrutura, Segurança e Inovação.

A transição energética e o enfrentamento das mudanças climáticas colocam o setor de transportes no centro do debate acadêmico e regulatório. No Brasil, o Balanço Energético Nacional (BEN, 2024) indica que a oferta de energia atingiu 322,0 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), crescimento de 2,4% em relação a 2023, sendo o setor de transportes o principal demandante, responsável por 35,2% do consumo final. Esse consumo concentra-se fortemente no modal rodoviário, que absorve 93,9% da energia utilizada pelo setor.

Essa dependência é agravada pelas deficiências da infraestrutura viária nacional. A recorrência de pavimentos degradados — com trincas, buracos e remendos inadequados — induz a regimes de condução ineficientes, caracterizados por acelerações e frenagens frequentes, aumento da rotação dos motores e maior consumo de combustível. Dados da Pesquisa CNT de Rodovias (2024; 2025) indicam que pavimentos classificados como regulares, ruins ou péssimos elevou em cerca de 5,0% o consumo de combustível, resultando em um consumo excedente estimado em 1,2 bilhão de litros de diesel por veículos pesados, na emissão adicional de aproximadamente 3,2 milhões de toneladas de CO₂ equivalente e em prejuízos financeiros da ordem de R\$ 7,2 bilhões aos transportadores.

A urgência de reverter esse cenário é reforçada pela Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil, no âmbito do Acordo de Paris, que estabelece metas de redução entre 59% e 67% das emissões de gases de efeito estufa até 2035, com vistas à neutralidade climática em 2050. Diante das limitações dos modelos tradicionais de transporte para atender a essas metas, torna-se essencial redirecionar recursos hoje dissipados pelo consumo excessivo de diesel para a modernização do setor.

Nesse contexto, a adoção de tecnologias como o agrupamento de caminhões (platooning) e sistemas de condução autônoma desponta como alternativa promissora para superar gargalos associados à condução humana e às limitações da infraestrutura física. Conforme apontam Elshazli et al. (2024), essas soluções apresentam potencial para reduzir congestionamentos, aumentar a segurança viária e diminuir o consumo de combustível por meio da redução do arrasto aerodinâmico, configurando-se como um dos pilares da transição do transporte rodoviário de cargas rumo à sustentabilidade.

2.2 Caminhões Autônomos: Conceito, Benefícios e Condições para Implementação

2.2.1 Conceito e Níveis de Automação

O conceito de caminhões autônomos baseia-se na integração de sistemas avançados de percepção, como sensores LiDAR, radares e câmeras, com algoritmos de Inteligência Artificial (IA) e conectividade veicular. O objetivo primordial é capacitar o veículo a executar funções operacionais com intervenção humana reduzida ou, idealmente, inexistente. A Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE) estabeleceu, em 2023, o padrão global para essa transição tecnológica, classificando os níveis de automação em uma escala que varia de 0 (ausência completa de sistemas automatizados) a 5 (automação total em qualquer condição de via).

Inicialmente, a expectativa era que a automação plena fosse alcançada até o final da década de 2020, com a comercialização em larga escala prevista para a década de 2030. Contudo, o cronograma de absorção em massa, projetado para meados de 2045, enfrenta barreiras críticas que vão além dos desafios tecnológicos. Fatores como o alto custo de implementação e de infraestrutura, lacunas na regulamentação jurídica e a aceitação pública emergem como obstáculos substanciais à rápida adoção (Litman, 2023). É fundamental compreender que, embora o nível 5 represente o ápice da autonomia veicular, as Tecnologias de Transporte Automatizado (AETs) não dependem da automação plena para gerar impactos significativos no setor (Engholm et al., 2021). Nesse contexto, a formulação de políticas públicas direcionadas a veículos altamente automatizados (VAAs) torna-se indispensável para mediar uma transição segura da condução humana para os sistemas automatizados (Li, 2019).

2.2.2 Benefícios Potenciais

Sob a perspectiva econômica, a literatura aponta a automação como um importante vetor de eficiência financeira no transporte de cargas. Estudos indicam que caminhões autônomos podem promover reduções significativas no Custo Total de Propriedade (TCO) (Wadud, 2017; Engholm et al., 2020) e, consequentemente, nos custos operacionais diretos (Ghandriz et al., 2020; Lee et al., 2023; Engholm et al., 2024). Além do impacto sobre o frete, as tecnologias de transporte automatizado apresentam potencial estratégico para a otimização da multimodalidade, ao atuarem como elos eficientes entre origens, destinos e terminais de transporte, contribuindo para a redução de gargalos logísticos (Lee et al., 2023; Engholm et al., 2021).

Entre as aplicações mais promissoras, destaca-se o platooning, que permite a circulação de caminhões em espaçamentos reduzidos por meio da comunicação veículo a veículo (V2V). Essa configuração reduz o arrasto aerodinâmico e a resistência ao rolamento, resultando em ganhos relevantes de eficiência energética e na diminuição das emissões de dióxido de carbono (CO₂) (Zhang et al., 2020; Elshazli et al., 2024). Dessa forma, o platooning configura-se como uma solução integrada, capaz de elevar os níveis de segurança e eficiência operacional, conciliando rentabilidade econômica e sustentabilidade ambiental. O estágio avançado dessa tecnologia é evidenciado pelos investimentos de grandes fabricantes globais, como DAF Trucks, Daimler Trucks, Iveco, MAN Truck & Bus, PACCAR, Scania e Volvo Group (Konrad e Wangler, 2018).

Além da eficiência energética, a adoção de caminhões autônomos tende a gerar impactos positivos na sustentabilidade logística ao facilitar o compartilhamento de cargas e otimizar o uso da capacidade volumétrica dos veículos (Sindi e Woodman, 2021). No âmbito da segurança viária, a redução do erro humano — principal fator associado aos sinistros rodoviários — aponta para uma diminuição significativa dos acidentes. Ademais, a maior difusão dessas tecnologias pode contribuir para a redução dos custos de transporte, com efeitos positivos sobre os preços finais das mercadorias e benefícios ao consumidor.

2.2.3 Condições Necessárias para Implementação

A materialização dos benefícios associados à adoção de veículos autônomos está intrinsecamente vinculada à existência de uma infraestrutura digital robusta. A ampla cobertura das redes 4G e 5G, conforme dados da Anatel (2025), constitui o pilar dos Sistemas de Transporte Inteligentes Cooperativos (C-ITS). Em especial, a tecnologia 5G atua como catalisadora da segurança devido à sua baixíssima latência e elevada capacidade de transmissão, requisitos essenciais para aplicações críticas em tempo real. Essa conectividade viabiliza a comunicação veículo a veículo (V2V) e veículo a infraestrutura (V2I) em um raio de até 2 km (Piarç, 2021), funcionando como uma camada de redundância que mitiga falhas de sensores embarcados e aumenta a resiliência da operação autônoma.

Paralelamente, a infraestrutura física impõe exigências rigorosas. A previsibilidade da superfície e do traçado, assegurada pela qualidade do pavimento e da geometria viária, é fundamental para o desempenho eficiente de sensores como câmeras e LiDAR (CNT, 2024). Além disso, a presença contínua de acostamentos é um fator crítico, pois possibilita paradas seguras quando o veículo atinge os limites de seu domínio operacional de projeto (ODD) ou diante de falhas sistêmicas; sua ausência pode resultar na imobilização na faixa de rolamento, elevando o risco de colisões traseiras (Souza, 2024).

Por fim, a implementação de modalidades como o platooning demanda cuidados adicionais quanto ao uso da pista. O aumento das cargas dinâmicas decorrente do tráfego concentrado de comboios requer análises estruturais que assegurem a integridade do pavimento no longo prazo (Xue, 2019). Soma-se a isso o desafio da convivência com o tráfego convencional, uma vez que caminhões autônomos apresentam padrões distintos de aceleração e frenagem. Nesse contexto, a literatura indica que a adoção de faixas exclusivas para veículos autônomos pode representar uma alternativa mais segura e eficiente do que o compartilhamento irrestrito ou a segregação total das vias (Amelink, 2020).

2.2.4 Infraestrutura como elemento-chave para o ODS 9

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 9 (ODS 9), estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), preconiza a edificação de infraestruturas resilientes, a promoção da industrialização inclusiva e sustentável e o fomento à inovação (Nações Unidas Brasil, 2025). Nesse escopo, a infraestrutura transcende a mera conotação de ativos físicos, configurando-se como o alicerce indispensável para o desenvolvimento tecnológico. A infraestrutura resiliente é caracterizada por sua capacidade de suportar, absorver e recuperar-se eficientemente de perturbações, sejam elas de natureza ambiental, econômica ou social. Concomitantemente, a infraestrutura inteligente integra tecnologias digitais e sistemas de

informação para viabilizar o monitoramento em tempo real, a otimização de recursos e a maximização da eficiência operacional. A sinergia entre resiliência e inteligência resulta em sistemas que não apenas exibem durabilidade, mas que também se adaptam dinamicamente às demandas sociais e ambientais.

2.2.5 Elementos estratégicos para a infraestrutura no contexto do ODS 9

A consecução de uma infraestrutura alinhada aos preceitos do ODS 9 demanda a consideração de elementos estratégicos. A conectividade emerge como um componente crítico, funcionando como o sistema nervoso central da infraestrutura inteligente, ao permitir a comunicação intersistêmica e assegurar o acesso ubíquo às tecnologias de informação (Nações Unidas Brasil, 2025). A qualidade do pavimento constitui um determinante fundamental para a eficiência logística e a segurança viária, contribuindo para a redução do consumo de combustíveis e das emissões de gases de efeito estufa, além de mitigar os custos de manutenção. A geometria viária, por sua vez, influencia diretamente a fluidez do tráfego e a prevenção de sinistros, sendo um fator crucial para a resiliência do sistema de transportes. Adicionalmente, a gestão do tráfego, por meio de sistemas inteligentes de monitoramento e resposta a incidentes, representa uma estratégia vital para a minimização de congestionamentos e de impactos ambientais, harmonizando o setor de transportes com as metas de sustentabilidade (Abreu et al., 2022).

2.2.6 Investimento e sustentabilidade de longo prazo

Evidencia-se uma correlação direta entre o volume de investimentos em infraestrutura e a capacidade de uma nação de sustentar um crescimento econômico e social equitativo. Investimentos direcionados à modernização e à reabilitação industrial, com ênfase em tecnologias limpas e na otimização do uso de recursos, são imperativos do ODS 9 para assegurar que o progresso econômico não se materialize em detrimento da integridade ambiental (Nações Unidas Brasil, 2025). A sustentabilidade de longo prazo é, portanto, alcançada quando a infraestrutura é concebida e implementada sob uma ótica de viabilidade financeira, inclusão social e responsabilidade ambiental.

2.2.7 O Brasil e a convergência com o ODS 9

O Brasil tem demonstrado um engajamento proativo na busca pelo cumprimento das diretrizes do ODS 9, notadamente por meio de parcerias internacionais estratégicas que visam à superação de lacunas tecnológicas e de financiamento. Os acordos bilaterais e multilaterais recentes ilustram essa abordagem. O Plano de Cooperação Brasil-China (2024), por exemplo, que integra o Plano de Transformação Ecológica e a Nova Indústria Brasil, reflete o foco do país na modernização de sua base industrial e na construção de infraestruturas com menor pegada ambiental. Adicionalmente, a cooperação com os Estados Unidos em minerais de transição e a adesão às recomendações da OCDE para a facilitação da cooperação tecnológica evidenciam o esforço em integrar sua infraestrutura em cadeias de valor globais de maneira resiliente e inovadora, buscando um equilíbrio entre o desenvolvimento industrial, a preservação ambiental e o avanço tecnológico (United States of America, 2026; BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022).

3. Procedimentos Metodológicos

O presente estudo adota uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório, com o objetivo de analisar a prontidão da infraestrutura rodoviária brasileira para a implantação de caminhões autônomos e sua contribuição para a sustentabilidade e para o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 9 (ODS 9). Essa abordagem justifica-se pela necessidade de investigar um campo ainda incipiente no contexto nacional, permitindo uma análise interpretativa baseada em critérios técnicos, evidências documentais e achados da literatura, conforme discutido por Tisdell, Merriam e Stuckey-Peyrot (2025).

Os critérios de avaliação da prontidão rodoviária fundamentaram-se no estudo de Paiva, Souza e Castañon (2025), que analisou os principais requisitos de infraestrutura para a introdução de veículos autônomos no corredor da BR-116. A partir dessa base, foi estruturado um modelo de avaliação organizado em duas dimensões centrais — infraestrutura física e infraestrutura digital —, conforme apresentado na Figura 1. Essa estrutura foi associada às diretrizes do ODS 9, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de infraestrutura resiliente, à modernização tecnológica e ao estímulo à inovação no setor de transportes.

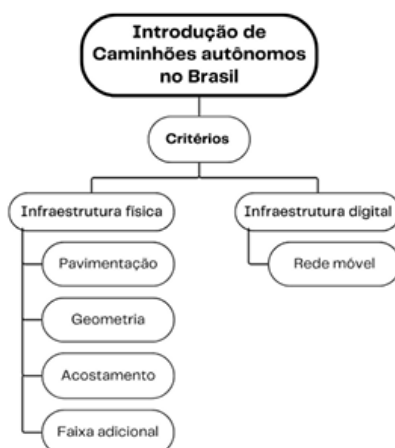


Figura 1: Critérios físicos e digitais para introdução de VA. Fonte: (PAIVA; SOUZA; CASTAÑON, 2025).

O diagnóstico da infraestrutura rodoviária brasileira baseou-se nos dados da Pesquisa CNT de Rodovias 2025, que fornece uma avaliação detalhada das condições das rodovias no país. De forma complementar, informações sobre a infraestrutura digital e a cobertura de conectividade móvel foram obtidas junto à Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), considerando a relevância da conectividade para a operação segura e eficiente de sistemas de transporte autônomos.

A revisão de literatura foi realizada por meio de uma revisão sistemática em bases científicas internacionais, como Scopus, IEEE Xplore e Web of Science, utilizando termos relacionados à temática, incluindo “autonomous trucks” e “infrastructure”. Adicionalmente, conduziu-se uma pesquisa documental em bases nacionais e institucionais, envolvendo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a Polícia Rodoviária Federal

(PRF), a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e a Confederação Nacional de Transportes (CNT). A análise dos dados também considerou o potencial da infraestrutura avaliada para promover eficiência operacional, redução de riscos e suporte à inovação tecnológica, aspectos diretamente associados à sustentabilidade do sistema de transportes e aos princípios do ODS 9.

4. Resultados

4.1 Infraestrutura física

Em 2025, a Confederação Nacional do Transporte (CNT) avaliou 114.197 km de rodovias em todo o Brasil. O diagnóstico revela a situação da infraestrutura nacional dividida em quatro pilares principais:

4.1.1 Classificação Geral das Rodovias

Tabela 1: Classificação geral das rodovias brasileiras.

Categoria	Ótimo	Bom	Regular	Ruim	Péssimo
Estado Geral	10,1%	27,8%	43,0%	15,1%	4,0%
Pavimento	32,5%	11,0%	37,0%	15,0%	4,5%
Sinalização	16,8%	33,6%	33,5%	9,7%	6,4%
Geometria/ Traçado	20,8%	17,0%	28,3%	20,7%	13,2%

Fonte: CNT(2025).

Além da classificação geral, o levantamento detalha deficiências específicas que comprometem diretamente a segurança viária e a eficiência do transporte. Conforme a tabela 1, no que concerne à pavimentação, constatou-se que 0,5% da extensão total avaliada apresenta o pavimento completamente destruído. Quanto aos elementos de sinalização, os dados revelam que 5,5% da malha não possui faixa central e 10,0% carece de faixas laterais, o que agrava os riscos de colisões. A geometria da via também apresenta fatores críticos, com a predominância de pistas simples em 85,2% das rodovias e a inexistência de acostamento em 45,8% dos trechos analisados. Adicionalmente, observa-se uma grave lacuna na sinalização de trechos sinuosos, visto que 29,0% das curvas perigosas não possuem advertências adequadas. Esse conjunto de variáveis culminou na identificação de 2.146 pontos críticos de alto risco distribuídos pelo país, evidenciando a urgência de intervenções estruturais.

4.1.2 Infraestrutura digital

Nos centros urbanos, especialmente em capitais e regiões metropolitanas, observa-se ampla cobertura 4G e crescente disponibilidade do 5G. A elevada densidade de estações

rádio-base e a presença de redes de fibra óptica asseguram maior estabilidade da conexão, velocidades superiores e menor latência. Estudos indicam que usuários urbanos permanecem conectados a redes 4G e 5G durante a maior parte do tempo, com desempenho significativamente superior ao registrado em áreas rurais (OpenSignal, 2023). A implantação do 5G tem se concentrado nesses ambientes em função da maior demanda por serviços de alta capacidade e do retorno econômico mais imediato.

Em áreas não urbanas, sobretudo zonas rurais e agrícolas, a conectividade ainda apresenta limitações relevantes. Apesar da expansão recente do 4G e, de forma incipiente, do 5G, a cobertura permanece desigual e concentrada em núcleos habitados ou áreas produtivas específicas. A menor densidade de infraestrutura resulta em velocidades inferiores, maior instabilidade e predominância do 4G, enquanto o 5G apresenta baixa penetração, tanto por restrições de rede quanto pela menor difusão de dispositivos compatíveis.

A conectividade ao longo das rodovias brasileiras constitui um desafio adicional. Dados da Agência Nacional de Telecomunicações indicam que apenas parte da malha rodoviária dispõe de cobertura 4G contínua, sendo a presença do 5G limitada a trechos próximos a centros urbanos (Anatel, 2025). Em extensos segmentos, especialmente em regiões remotas, a ausência ou a intermitência do sinal comprometem a segurança viária e aplicações dependentes de dados em tempo real. Embora programas governamentais busquem ampliar essa cobertura, a universalização ainda não foi alcançada.

De modo geral, o panorama da conectividade móvel no Brasil evidencia forte assimetria entre ambientes urbanos, não urbanos e rodoviários. Apesar dos avanços associados ao 5G, o 4G permanece como a principal tecnologia para garantir o acesso à internet móvel em grande parte do território nacional, especialmente fora dos grandes centros.

5. Discussão

A comparação entre as exigências técnicas para a operação de caminhões autônomos e a realidade da infraestrutura rodoviária brasileira revela um descompasso significativo. Dados da Pesquisa CNT de Rodovias 2025 mostram que a maior parte da malha apresenta condições regulares a péssimas, especialmente quanto ao pavimento, à geometria viária e à sinalização, comprometendo a previsibilidade da via e o desempenho de sensores embarcados, como câmeras e sistemas LiDAR, o que eleva os riscos operacionais e limita níveis avançados de automação.

A ausência ou a descontinuidade de acostamentos constitui um entrave crítico, uma vez que quase metade dos trechos avaliados não dispõe desse elemento essencial para paradas seguras quando o veículo ultrapassa seu Operational Design Domain (ODD) ou em situações de falha sistêmica. Nessas condições, a parada na faixa de rolamento aumenta significativamente os riscos à segurança viária, sobretudo em corredores de alto fluxo de cargas.

No campo da infraestrutura digital, observa-se forte assimetria espacial na conectividade: enquanto áreas urbanas contam com ampla cobertura 4G e expansão do 5G, extensos trechos rodoviários permanecem com cobertura limitada ou inexistente. Essa lacuna compromete

aplicações baseadas em comunicação veículo a veículo (V2V) e veículo a infraestrutura (V2I), essenciais aos Sistemas de Transporte Inteligentes Cooperativos (C-ITS), restringindo a automação a ambientes controlados ou projetos-piloto. Além disso, tecnologias como o platooning introduzem novos desafios à engenharia rodoviária, ao intensificar cargas dinâmicas sobre o pavimento e exigir avaliações estruturais específicas, sobretudo em contextos de convivência com o tráfego convencional. Nesse sentido, a literatura aponta soluções intermediárias, como faixas dedicadas, como alternativas mais seguras e eficientes em corredores logísticos estratégicos.

Sob a ótica do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 9, a automação do transporte rodoviário de cargas no Brasil depende de uma modernização integrada da infraestrutura física e digital. As deficiências identificadas configuram entraves à inovação e à sustentabilidade do sistema, limitando ganhos ambientais, econômicos e de segurança. Assim, investimentos direcionados à melhoria do pavimento, da geometria viária, da sinalização e da conectividade nos principais corredores logísticos mostram-se alinhados às diretrizes do ODS 9 e essenciais para o desenvolvimento de uma infraestrutura mais resiliente e eficiente.

6. Conclusão

A análise realizada neste artigo evidencia que a infraestrutura rodoviária brasileira, em seu estágio atual, constitui o principal gargalo para a viabilização de caminhões autônomos e, consequentemente, para a captura dos benefícios de sustentabilidade associados a essa tecnologia. O descompasso entre as exigências técnicas dos sistemas de automação avançada e a realidade física e digital das rodovias nacionais demonstra que a modernização da infraestrutura não é apenas um requisito operacional, mas um imperativo estratégico para o cumprimento das metas do ODS 9 no Brasil.

Os resultados indicam que a precariedade do pavimento, as deficiências na sinalização e a ausência de acostamentos em parcela significativa da malha rodoviária comprometem a previsibilidade necessária à operação segura de sensores como LiDAR e câmeras. Paralelamente, a assimetria na conectividade digital, com lacunas relevantes de cobertura 4G e 5G nos corredores logísticos, limita a comunicação em tempo real (V2V e V2I), restringindo o potencial de inovações como o platooning na redução do consumo de combustível e das emissões de gases de efeito estufa.

Em síntese, a contribuição da infraestrutura para a sustentabilidade e para o ODS 9 depende de uma abordagem integrada que vá além da manutenção corretiva. A transição para um sistema de transporte de cargas mais inteligente e resiliente requer investimentos consistentes na infraestrutura física, com foco na qualidade do pavimento e na adequação geométrica das vias, bem como na ampliação da conectividade digital ao longo dos principais eixos rodoviários, especialmente por meio da expansão da rede 5G. Adicionalmente, esse processo demanda políticas públicas voltadas à inovação, incluindo marcos regulatórios e mecanismos de incentivo à modernização tecnológica da frota e da infraestrutura viária, em alinhamento com as metas de descarbonização do setor.

Conclui-se que a infraestrutura necessária à operação de caminhões autônomos constitui a base para uma industrialização inclusiva e sustentável. Ao superar os entraves estruturais identificados, o Brasil poderá modernizar sua logística e consolidar um sistema de transportes mais seguro, eficiente e ambientalmente responsável, em consonância com a Agenda 2030.

Referências

ABREU, Victor Hugo Souza de; BALTAR, Marina Leite de Barros; SANTOS, Andrea Souza. O papel do gerenciamento de incidentes de tráfego no atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. *Mix Sustentável*, Florianópolis, v. 8, n. 3, p. 67–78, maio 2022. DOI: 10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n3.67-78.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). *Painel de cobertura móvel*. Brasília, 2025. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/infraestrutura/cobertura-movei>. Acesso em: 16 jan. 2026.

AMELINK, M. et al. Road map and action plan to facilitate automated driving on TEN road network – version 2020. Deliverable SA4.2 v. 6.0. [S. l.]: European ITS Platform, 2020. Disponível em: https://www.connectedautomateddriving.eu/wp-content/uploads/2023/06/Roadmap-and-Action-Plan-to-facilitate-automated-driving-on-TEN-road-network_v6.0_DeliverableTask3_20-11-2020_EU-EIP.pdf. Acesso em: 16 jan. 2026.

ANDERHOFSTADT, B.; SPINLER, S. Factors affecting the purchasing decision and operation of alternative fuel-powered heavy-duty trucks in Germany: a Delphi study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 73, p. 87–107, 2019.

BOER, A.; VAN DE VELDE, R.; DE VRIES, M. *Self-driving vehicles (SDVs) & geo-information*. [S. l.]: Geonovum, 2017. Disponível em: <https://www.geonovum.nl/uploads/documents/Self-DrivingVehiclesReport.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). *Pesquisa CNT de Rodovias 2025*. Brasília: CNT; SEST SENAT; ITL, 2025.

ELSHAHLI, M. T. et al. Advancing infrastructure resilience: machine learning-based prediction of bridges' rating factors under autonomous truck platoons. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, v. 5, 2024. DOI: 10.1186/s43065-024-00096-x.

ENGHOLM, A. et al. Exploring cost performance tradeoffs and uncertainties for electric- and autonomous electric trucks using computational experiments. *European Transport Research Review*, v. 16, n. 1, 2024. DOI: 10.1186/s12544-024-00662-0.

ENGHOLM, A.; KRISTOFFERSSON, I.; PERNESTÅL, A. Impacts of large-scale driverless truck adoption on the freight transport system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 154, p. 227–254, 2021. DOI: 10.1016/j.tra.2021.09.003.

GHANDRIZ, T. et al. Impact of automated driving systems on road freight transport and electrified propulsion of heavy vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 115, 2020. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102610.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2022*. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 16 jan. 2026.

KONRAD, K.; WANGLER, L. U. Tailor-made technology: the stretch of frugal innovation in the truck industry. *Procedia Manufacturing*, v. 19, p. 10–17, 2018.

LI, S. et al. Policy formulation for highly automated vehicles: emerging importance, research frontiers and insights. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 124, p. 573–586, 2019. DOI: 10.1016/j.tra.2018.05.010.

LITMAN, Todd. *Autonomous vehicle implementation predictions: implications for transport planning*. Victoria: Victoria Transport Policy Institute, 2023. Disponível em: <https://www.vtpi.org/avip.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2026.

LLOPIS-CASTELLÓ, D. et al. Estimation of pavement condition based on data from connected and autonomous vehicles. *Infrastructures*, v. 9, n. 10, 2024. DOI: 10.3390/infrastructures9100188.

PAIVA, Kamila de Fátima Machado; SOUZA, Luísa Muglia; CASTAÑÓN, José Alberto Barroso. Infraestrutura para automação de frotas no Brasil: um estudo exploratório em corredores da BR-116. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 39., 2025, Goiânia. Anais... Goiânia: ANPET, 2025. p. 2240–2245.

PLOTZ, Patrick et al. Policies and greenhouse gas budgets for zero-carbon road transport. *Climate Policy*, v. 23, n. 3, p. 343–354, 2023. DOI: 10.1080/14693062.2023.2185585.

SATTAR, K. A. et al. Detecting road defects and hazards in metropolitan environments using optimized deep learning techniques. *Transportation Research Procedia*, v. 84, p. 528–533, 2025. DOI: 10.1016/j.trpro.2025.03.105.

SINDI, Safaa; WOODMAN, Roger. Implementing commercial autonomous road haulage in freight operations: an industry perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 152, p. 235–253, 2021. DOI: 10.1016/j.tra.2021.08.003.

SOUZA, Luísa Muglia. *Readiness assessment for autonomous vehicles: a comprehensive evaluation of rural road infrastructure suitability*. 2024. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2024.

VILLARREAL, B. et al. Improving road transport operations through lean thinking: a case study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, v. 20, n. 2, p. 163–180, 2017. DOI: 10.1080/13675567.2016.1170773.

WADUD, Z. Fully automated vehicles: a cost of ownership analysis to inform early adoption. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 101, p. 163–176, 2017. DOI: 10.1016/j.tra.2017.05.005.

ZHANG, L. et al. Fuel economy in truck platooning: a literature overview and directions for future research. *Journal of Advanced Transportation*, v. 2020, 2020. DOI: 10.1155/2020/2604012.