

PROJETO DE LOCOMOTIVA HÍBRIDA PARA A OPERAÇÃO NORTE DA RUMO

Autores:

Agnaldo Lopes – Consultor - Rumo Logistica S/A
Vinicius dos Santos Sanches – Especialista - Rumo Logistica S/A
Luis Carlos Hohmann – Consultor – WABTEC Co
Rodrigo Venditti – Consultor - WABTEC Co

2025

RESUMO

O artigo tem por objetivo apresentar o desenvolvimento e os benefícios da locomotiva híbrida (diesel-elétrica com baterias) como uma solução viável e estratégica para a descarbonização e modernização do transporte ferroviário de cargas no Brasil.

Palavras – chave: Locomotiva híbrida. Baterias. Eficiência energética.

ABSTRACT

The article has the goal of presenting the development and benefits of the hybrid locomotive (diesel-electric with batteries) as a viable and strategic solution for the decarbonization and modernization of freight rail transport in Brazil.

Keywords: Hybrid locomotive. Batteries. Energy efficiency.

SUMÁRIO

RESUMO..... 1

ABSTRACT 1

1 INTRODUÇÃO 3

2 METODOLOGIA..... 3

2.1 Contextualização sobre a Matriz Energética no Transporte Ferroviário..... 3

2.2 Conceito da Locomotiva Híbrida..... 4

2.3 Funcionamento da Locomotiva Diesel-Elétrica..... 4

2.4 Participação das Baterias no Sistema Híbrido 5

2.5 Comparativo entre Tipos de Locomotivas 5

3 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS..... 5

3.1 Potencial energético..... 5

3.2 Arquitetura do projeto da locomotiva Híbrida 6

3.3 Topologia da Locomotiva Híbrida..... 8

3.4 Visão geral do sistema de baterias 8

3.5 Principais características 9

3.6 Simulações..... 9

3.7 Resultados teóricos de reduções em emissões e de eficiência energética 10

3.8 Status de desenvolvimento do projeto 11

4 CONCLUSÕES..... 12

REFERÊNCIAS 14

1 INTRODUÇÃO

O setor ferroviário desempenha um papel estratégico na descarbonização dos transportes, especialmente no segmento de cargas, devido à sua elevada eficiência energética em comparação a outros modais. Com menor emissão de gases de efeito estufa por tonelada-quilômetro transportada, a ferrovia surge como uma solução sustentável para a matriz logística nacional e global.

Nos últimos anos, diversas soluções tecnológicas vêm sendo implementadas para potencializar ainda mais essa vantagem ambiental. Entre elas, destacam-se:

- Automação operacional, voltada ao cálculo de novas composições ferroviárias, com o objetivo de otimizar o uso das locomotivas. Essa iniciativa está integrada a sistemas de condução semiautônoma e a programas avançados de análise e otimização, visando maior eficiência nas rotas e nas manobras operacionais.
- Biocombustíveis, no setor ferroviário, os biocombustíveis já marcam presença, especialmente o biodiesel, que atualmente é adicionado ao diesel fóssil em uma proporção de 15% V/V. Trata-se de uma solução imediata e relevante para as metas de descarbonização.
- Desenvolvimento de locomotivas híbridas (diesel-elétricas com baterias), que reduzem o consumo de combustível e as emissões diretas;
- Desenvolvimento de locomotivas à bateria, onde a bateria atua como a principal fonte de energia para tração, ao contrário das locomotivas que dependem de motores a diesel ou da eletricidade fornecida pela rede elétrica.
- Eletrificação de trechos ferroviários, onde viável, com uso de energia proveniente de fontes renováveis.

A combinação dessas tecnologias, aliada à robustez estrutural do modal, consolida a ferrovia como um vetor essencial para alcançar metas de neutralidade de carbono e promover uma transição energética no transporte de cargas.

2 METODOLOGIA

2.1 Contextualização sobre a Matriz Energética no Transporte Ferroviário

Esta seção tem como objetivo apresentar a evolução da matriz energética no setor ferroviário, considerando variáveis-chave como prazos de implantação, custos envolvidos, maturidade tecnológica, complexidade de implementação e ganhos em eficiência e sustentabilidade. O objetivo é o desenvolvimento de linhas de raciocínio e ações para a formação de uma matriz energética limpa e eficiente.

O *roadmap* de transição energética contempla:

- Curto prazo (1–3 anos): Adoção de locomotivas híbridas diesel-elétricas com baterias, digitalização de ativos e uso de biocombustíveis em frotas existentes.
- Médio prazo (4–8 anos): Expansão da infraestrutura de eletrificação em trechos estratégicos, aumento da aplicação de biocombustíveis avançados e introdução de soluções híbridas modulares.
- Longo prazo (8+ anos): Implantação de tecnologias disruptivas como tração 100% elétrica com energia de fontes renováveis e locomotivas movidas a hidrogênio verde.

Neste cenário, as locomotivas híbridas assumem um papel de transição essencial — representam uma solução viável de curto e médio prazo, com equilíbrio entre custo, impacto ambiental e aplicabilidade imediata — especialmente em redes ferroviárias não eletrificadas.

2.2 Conceito da Locomotiva Híbrida

A locomotiva híbrida combina duas fontes principais de energia para propulsão: o sistema Diesel-Elétrico e baterias elétricas. Conceitualmente, esse tipo de locomotiva utiliza um motor a diesel para acionar um gerador elétrico, que por sua vez fornece energia aos motores de tração elétricos conectados às rodas. A inovação no sistema híbrido está na integração de um banco de baterias que trabalha em conjunto com o gerador. Essas baterias podem armazenar energia recuperada por meio de frenagem regenerativa, e depois utilizá-la para auxiliar na tração, especialmente durante partidas, acelerações ou subidas.

2.3 Funcionamento da Locomotiva Diesel-Elétrica

Na locomotiva Diesel-Elétrica, o motor à combustão interna (de ciclo Diesel) não traciona diretamente as rodas. Em vez disso, ele aciona um gerador elétrico, que produz eletricidade para alimentar os motores de tração elétrica. Esse sistema oferece maior controle,

eficiência energética e menor desgaste mecânico em comparação com sistemas puramente mecânicos.

2.4 Participação das Baterias no Sistema Híbrido

No sistema híbrido, as baterias atuam como uma fonte adicional e auxiliar de energia. Elas entram em ação para suprir picos de demanda ou operar em modos de baixa emissão, como manobras em áreas urbanas ou túneis. Além disso, o sistema pode operar temporariamente apenas com as baterias, eliminando a emissão de poluentes nesse período e reduzindo o consumo de diesel.

2.5 Comparativo entre Tipos de Locomotivas

Tabela 1 - Principais conceitos de construção de locomotivas no âmbito de fontes de energia

Tipo de Locomotiva	Fonte de Energia Principal	Vantagens	Desvantagens
Eletrificada	Energia elétrica da rede aérea	Alta eficiência, zero emissão local, baixo ruído	Alto custo de infraestrutura (catenária, subestações)
À bateria	Banco de baterias recarregáveis	Zero emissão, silenciosa, ideal para áreas urbanas	Autonomia limitada, tempo de recarga elevado e alto custo de aquisição
Híbrida (Diesel + Bateria)	Diesel + Baterias	Menor consumo de combustível, redução de emissões, flexível	Emissões ainda presentes, custo mais alto que modelos simples

Fonte: Os autores (2025)

3 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

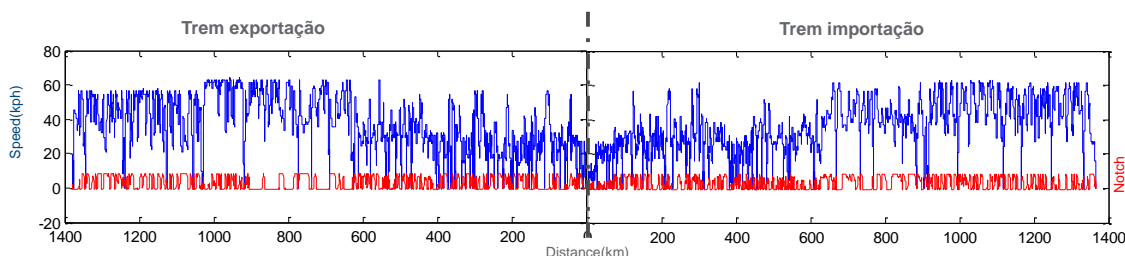
3.1 Potencial energético

O primeiro passo do projeto é a análise da quantidade de energia de tração e frenagem dinâmica envolvida na operação dos trens em todo o ciclo (exportação + importação), para isto foram analisados dados dos registradores de evento das locomotivas.

A primeira constatação é que o perfil da ferrovia do trecho ferroviário operado pela Rumo Logística é ondulado em grande parte do trajeto, com descidas e subsequentes subidas que oferecem múltiplas oportunidades de regeneração de energia em frenagem dinâmica, seguidas de trechos em subida em tração, com possibilidade de utilização imediata de energia regenerada. Isto acontece em ambos em ambos os sentidos, o que torna o cenário bastante promissor para locomotivas híbridas. Esse ciclo dinâmico de recuperação e uso da energia representa um ganho substancial na eficiência energética do sistema de tração, reforçando o potencial da tecnologia híbrida no contexto ferroviário brasileiro.

Uma análise mais detalhada mostra que esta sequência de ciclos demandará do pacote de bateria a necessidade de, seguidas vezes, absorver e fornecer grandes quantidades de energia ao longo do trajeto.

Figura 1 - *Download* do registrador de eventos. Velocidade do trem x distância percorrida e ponto de aceleração (*notch*) x distância percorrida



Fonte: Wabtec Corporation (2025)

3.2 Arquitetura do projeto da locomotiva Híbrida

Os principais desafios técnicos de projeto de uma locomotiva híbrida são:

- Segurança operacional;
- Atender as limitações de máximo peso por eixo da locomotiva;
- Manter as dimensões máximas da locomotiva atual para atender o gabarito da ferrovia;
- Ser uma solução compatível para o ambiente ferroviário;

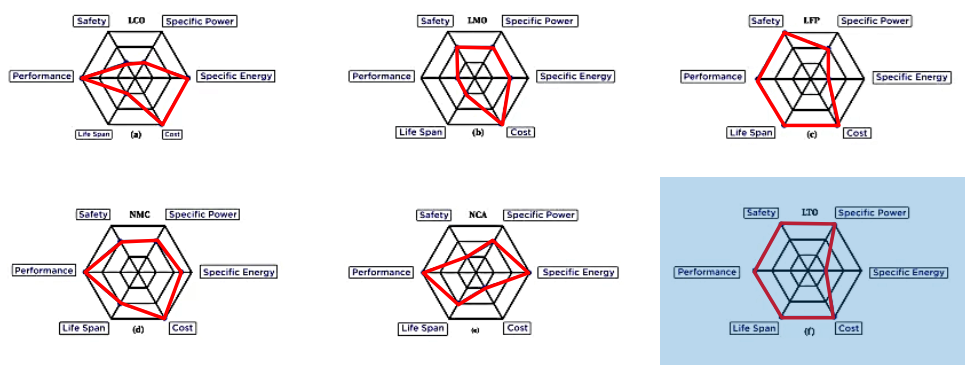
- Não impactar nas características operacionais da locomotiva como esforço de tração, autonomia (volume do tanque de combustível) e ciclos de manutenção, que são fortes requisitos operacionais da ferrovia;
- Ser uma solução utilizável para a hibridização da frota existente através de “retrofit”.

Os requisitos técnicos de projeto combinados com a análise de potencial energético sinalizaram a necessidade de minimizar o pacote de baterias e maximizar o fluxo energético para que, através de diversos ciclos de carga, fosse possível obter uma taxa de substituição de energia relevante.

Uma abordagem sobre as características dos tipos diferentes de baterias de Íons de Lítio nos leva a concluir que, apesar de serem mais caras do que outros tipos de baterias de íon de lítio, a bateria LTO é uma alternativa interessante para o projeto em função das seguintes características:

- É uma das baterias de íon de lítio mais seguras, possui alta estabilidade térmica em altas temperaturas;
- Alta taxa de carga e descarga (*C-rate*), podendo chegar a 10 vezes a sua capacidade nominal;
- Longa vida útil em quantidade de ciclos;
- Podem operar em uma ampla faixa de temperaturas, de -50°C a 60°C;
- Já aplicadas em ambientes ferroviários no transporte de passageiros.

Figura 2 - Common Lithium Ion Battery Type Characteristics



Fonte: [1]

Com a definição do tipo de bateria a ser utilizado, foi definida a topologia da locomotiva com a inserção de todos os equipamentos necessários para a hibridização, com as respectivas interfaces com os sistemas existentes da locomotiva.

3.3 Topologia da Locomotiva Híbrida

Figura 3 - Topologia da locomotiva híbrida



Fonte: Wabtec Corporation

3.4 Visão geral do sistema de baterias

- Alta capacidade de carga-descarga: foi adotado o *C-rate* de 6,6 o que significa uma capacidade de carga-descarga mais do que 6 vezes maior quando comparado com outras químicas (LFP);
- Longo ciclo de vida útil (mínimo de 30.000 ciclos);
- Alta segurança por ter características químicas estáveis (menor propensão ao “*thermal runaway*”);
- Sistema de gestão de temperatura da bateria (*battery thermal management unit* - BTMU) de alta capacidade, baseado em refrigeração líquida para manter a uniformidade e controle preciso da temperatura de trabalho das células de bateria;
- A energia das baterias de tração é usada somente para a operação de tração e alimentar o BTMU;

- Sistema de proteção (LOTO) para segurança durante operação e/ou manutenção;
- Em modo híbrido, o motor Diesel será responsável pela alimentação de 4 eixos e as baterias de tração serão responsáveis pela alimentação de 2 eixos;
- Em modo Diesel, o motor Diesel será responsável pela alimentação dos 6 eixos;
- Projetada com baterias LTO para operações com múltiplos ciclos de alta potência em tração e frenagem dinâmica.

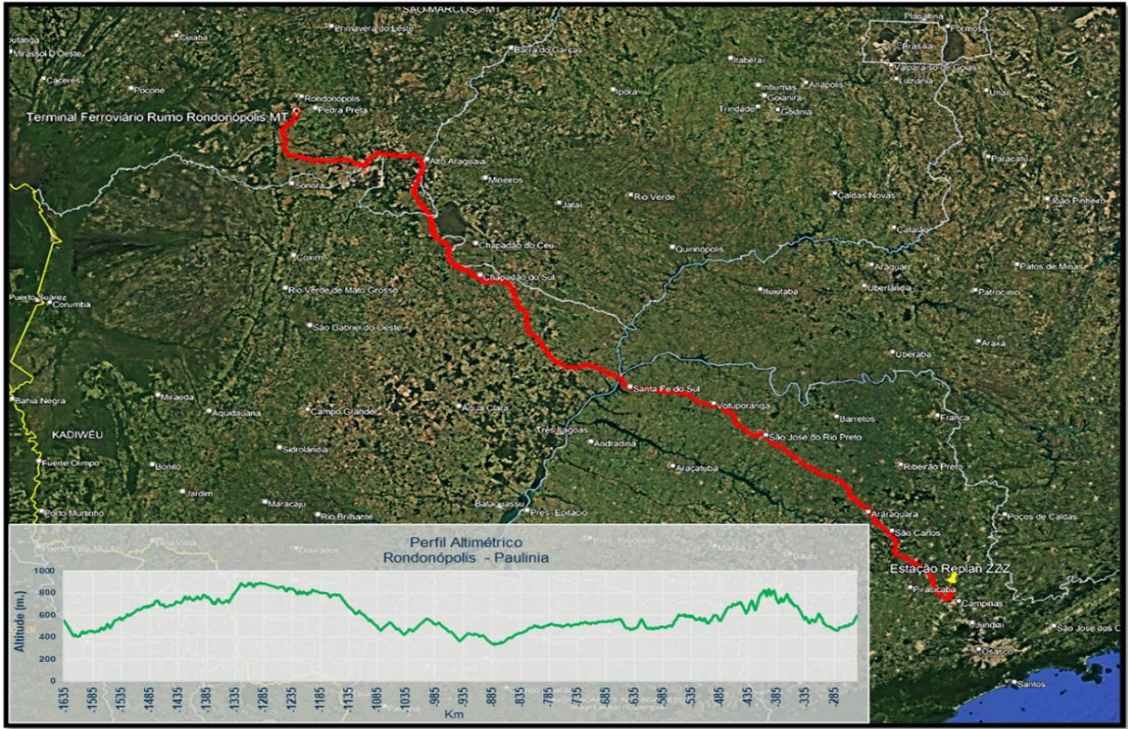
3.5 Principais características

- Baseada na locomotiva ES44ACi, com mesmo gabarito e mudanças concentradas na Cabine Auxiliar;
- A falta de energia das baterias não impacta no desempenho corrente da ES44ACi;
- A recarga da bateria é baseada apenas na energia do freio dinâmico, sem carregamento externo;
- A transição é totalmente automatizada entre os modos Diesel-elétrico e híbrido, sem atuação do operador;
- Até ~5.200 THP disponíveis para tração (800 HP de potência extra “*overboost*”) para utilização em seções críticas;
- Nenhuma ação do operador é necessária para maximizar a regeneração e para a utilização da energia das baterias;
- Possibilidade de gestão de energia através do “*Trip Optimizer*” (“piloto automático” ou otimizador de viagens da Wabtec) para otimizar os ciclos de carregamento e descarregamento das baterias.

3.6 Simulações

Para as simulações de eletrificação, foram coletados dados de registradores de eventos das locomotivas de um trecho ferroviário da RUMO de aproximadamente 1.300 km compreendido entre as estações de Paulínia e Rondonópolis, sendo o trem tipo formado por duas locomotivas modelo ES44ACi tracionando ~10.000 toneladas no sentido exportação e ~8.000 toneladas no sentido importação. O *download* dos registradores de eventos das locomotivas foi utilizado para a análise de energia.

Figura 4 - Trecho ferroviário analisado

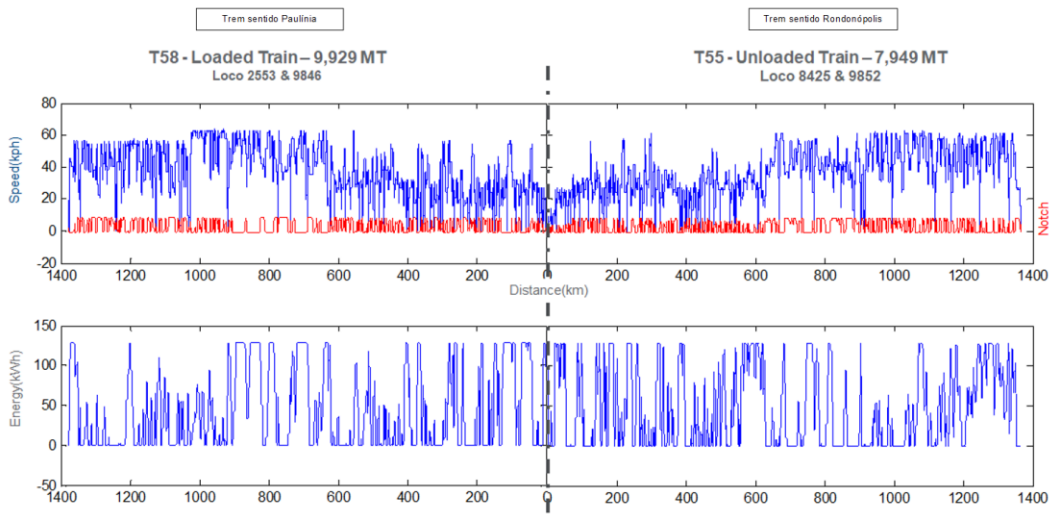


Fonte: Wabtec Corporation (2025)

3.7 Resultados teóricos de reduções em emissões e de eficiência energética

A seguir, é apresentado um gráfico contendo os resultados das simulações de energia para um trem de carga padrão com 80 vagões, entre Rondonópolis (MT) e Paulínia (SP).

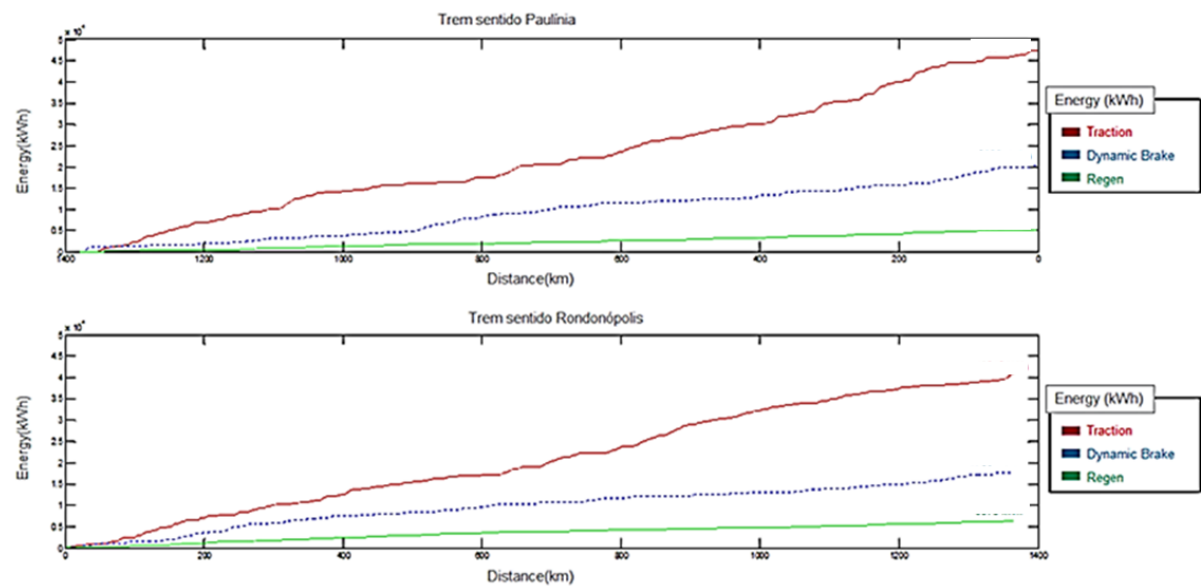
Gráfico 1 - Velocidade x Ponto de aceleração x Energia nas baterias



Fonte: Wabtec Corporation (2025)

O gráfico de energia nas baterias mostra múltiplos ciclos de carga e descarga em ambos os sentidos, comprovando a premissa de que a ondulação do terreno permitiria múltiplos ciclos.

Gráfico 2 - Totalizador de energia em função da origem



Fonte: Wabtec Corporation (2025)

O Gráfico 2 mostra o comportamento das energias ao longo do percurso, sendo que linha vermelha representa a energia total dispendida para tração, a linha azul representa a energia total produzida pela frenagem dinâmica e a linha verde representa a energia total de frenagem dinâmica que foi regenerada e utilizada para tração.

Uma análise do gráfico comparando a energia utilizada para tração com a energia regenerada mostra que é possível reaproveitar próximo de 15% da energia total na operação em todo o ciclo Paulínia- Rondonópolis -Paulínia.

Uma locomotiva em operação na RUMO neste ciclo consome em torno de um milhão de litros de combustível por ano, os 15% de economia representam uma redução de 150 mil litros no volume de combustível queimado ao ano por locomotiva. Este valor representa uma redução de emissões de aproximadamente 400 toneladas de CO2 por ano [2].

3.8 Status de desenvolvimento do projeto

O projeto de desenvolvimento de uma locomotiva híbrida foi uma jornada marcada por desafios técnicos e econômicos desafiadores para desenvolvimento de um produto projetado para a modernização sustentável da ferrovia.

O projeto teve início com a proposta de alongamento da plataforma original para acomodar os sistemas adicionais e bateria exigidos para uma configuração híbrida. No entanto, essa primeira abordagem esbarrou nas limitações de gabarito da ferrovia, onde a geometria da infraestrutura existente inviabilizava o aumento de dimensões das locomotivas.

Este revés, juntamente com o desejo da ferrovia para uma solução compatível com a “hibridização” da frota através do “*retrofit*” de locomotivas existentes, levou à busca de outros caminhos para a otimização dos componentes internos e revisão das tecnologias de armazenamento de energia, até a formatação da solução final, que incluiu a troca de química das baterias, com a adaptação a um *layout* muito similar ao da frota existente, atuando para a manutenção das dimensões originais da locomotiva.

Pelo lado econômico, o preço por kWh [BRL/kWh] de baterias para propulsão de alta performance ainda é elevado, principalmente quando associado a aplicações ferroviárias, que demandam resistência à vibrações, segurança térmica e longa vida útil. Além dos custos diretos de desenvolvimento, outro fator crítico é o retorno sobre o investimento (*return over investment* - ROI). Embora o sistema híbrido traga benefícios operacionais como redução de consumo de combustível e menores emissões, o tempo necessário para amortização do investimento ainda é um desafio, com ausência de mecanismos de fomento tais como créditos de carbono valorizados e políticas públicas voltadas à renovação tecnológica do setor ferroviário.

4 CONCLUSÕES

Diante dos desafios globais de sustentabilidade e transição energética, o setor ferroviário consolida-se como um aliado estratégico na redução das emissões de carbono no transporte de cargas. A combinação entre a eficiência energética intrínseca do modal e a adoção de tecnologias inovadoras — como automação operacional, uso de biocombustíveis, eletrificação e tração híbrida— fortalece a ferrovia como solução de baixo impacto ambiental e alta viabilidade técnica.

Nesse contexto, as locomotivas híbridas desempenham um papel de destaque, por representarem uma alternativa de rápida aplicação, especialmente em trechos não eletrificados, com ganhos relevantes em consumo de combustível, emissões e flexibilidade operacional. Elas simbolizam uma ponte entre a realidade atual e o futuro desejado, contribuindo de forma concreta para a evolução da matriz energética ferroviária rumo a um sistema mais limpo, eficiente e sustentável.

Adicionalmente, destaca-se o papel fundamental dessas inovações no fomento ao desenvolvimento do conhecimento tecnológico nacional, promovendo a capacitação de profissionais, o fortalecimento da cadeia produtiva local e a geração de soluções adaptadas à realidade ferroviária brasileira. A consolidação desse caminho exige esforços coordenados entre setor público, indústria e centros de pesquisa, com políticas que incentivem a inovação, valorizem as externalidades positivas do transporte ferroviário e viabilizem investimentos sustentáveis de longo prazo.

Portanto, iniciativas voltadas à descarbonização e à modernização tecnológica do setor ferroviário não apenas contribuem para a sustentabilidade ambiental, como também impulsionam o progresso industrial e a competitividade do Brasil no cenário global.

REFERÊNCIAS

- 1 **Common Lithium Ion Battery Type Characteristics.** CM Batteries, Portugal, 2023. Disponível em: <https://cmbatteries.com/pt/revelando-as-caracter%C3%ADsticas-%C3%BAnicas-de-diferentes-tipos-de-bateria-de-%C3%ADon-de-l%C3%ADtio/> . Acesso em 04 ago. 2025.
- 2 RIBEIRO DE CARVALHO, Carlos Henrique. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros.** Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf . IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011. Acesso em 04 de ago. 2025.