



A Energia de Tração Ferroviária no Brasil e a Transição Energética

***Luiz Carlos Gabriel**

A tração ferroviária de longo curso no Brasil é fortemente atrelada a sistemas diesel e diesel-elétricos. Apesar de sua versatilidade, esses sistemas apresentam desafios crescentes relacionados ao custo operacional, emissões de gases do efeito estufa e baixa eficiência energética em relação a motores elétricos. De outro lado, crescem as demandas por sistemas sustentáveis firmados nas Conferências/Acordos Climáticos da ONU e pelo comércio internacional. Consequentemente, crescem também os esforços para substituição de combustíveis fósseis por tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Nesse sentido, surge a necessidade de discutir caminhos viáveis para uma transição energética que combine eficiência operacional, redução de emissões e inovação tecnológica, como o por exemplo fonte primária de hidrogênio associado a células a combustível que geram eletricidade a bordo, armazenamento de energia elétrica em baterias de íon-lítio, sistema de catenárias aéreas auto compensadas, motores de tração com rotor de ímã permanente.

Vantagens de Ferrovias Eletrificadas



- **Eficiência energética superior:** locomotivas elétricas possuem rendimento muito superior a tração diesel, principalmente em regimes de carga constante. Em um sistema de catenária, por exemplo, a saída de rede pode entregar muito mais potência do que qualquer locomotiva precisaria, enquanto na tração diesel/diesel-elétrica, a potência no eixo mecânico é condicionada pelo tamanho e peso do motor a combustão.

- **Redução de emissões:** com mais de 83% da matriz elétrica brasileira proveniente de fontes renováveis, a substituição do diesel por eletricidade promove redução das emissões de CO₂.

- **Custo operacional reduzido:** os menores custos com manutenção e energia resultam em TCO (custo total de propriedade) inferior no longo prazo, sobretudo em corredores de grande movimentação.
- Menos poluição sonora: locomotivas elétricas operam com ruído significativamente inferior, o que beneficia áreas urbanas e comunidades próximas às linhas férreas.

Dentre outras, têm potencial para eletrificação, a Ferrovia Norte-Sul (muito extensa, grande fluxo e eixo tronca estruturante), a Ferrovia Ferrogrão (licitação prevista para 2026) com 933km, ligará Sinop (MT) ao Porto de Miritituba(PA) para o escoamento da produção de grãos da Região Centro-Oeste para Portos da Região Norte, e ainda, a Malha Paulista com alto fluxo para o Porto de Santos, a Transnordestina com fluxo médio (a depender da demanda futura) e outras como a Nova Ferroeste que tem como premissa ligar o Porto de Paranaguá a Maracaju(MS) com investimento de R\$ 35,8 bilhões.

A Implementação não é Tarefa Trivial

- **Alto custo de capital (Capex):** se a opção for pela instalação de sistemas de catenária, subestações e reforço da rede elétrica altos investimentos serão demandados.

- **Dispersão da demanda:** muitos trechos da malha ferroviária operam com baixos volumes e sazonalidade acentuada, o que dificulta a amortização dos investimentos.

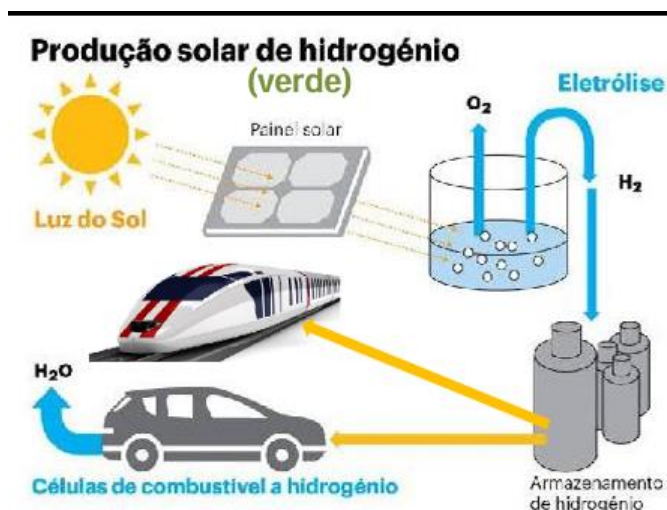
- **Complexidade de manutenção em regiões remotas:** trechos na Região NE, ou no Cerrado podem exigir soluções mais robustas/customizadas para garantir continuidade operacional.

- **Dependência de políticas públicas:** a viabilidade econômica da eletrificação depende de incentivos regulatórios, linhas de financiamento e estabilidade institucional.

Alternativas Tecnológicas: Hidrogênio

Além da eletrificação através de catenária, outras soluções têm crescido em relevância como alternativas, ou complementos viáveis para a tração ferroviária sustentável, especialmente em trechos onde a instalação da infraestrutura aérea e subestações de alta tensão é economicamente inviável, bem como em relevos geográficos desafiadores.

Locomotivas a Hidrogênio: Utilizam células a combustível para converter hidrogênio em eletricidade a bordo para alimentar os motores de tração elétrica. Esta tecnologia oferece operação com zero emissões diretas de carbono e baixo ruído. Já adotada em trens regionais na Alemanha (como o Coradia iLint fabricado pela Alstom), também no Reino Unido, Japão, França e Estados Unidos.



Coradia iLint. Movido a Hidrogênio (Imagem Alstom)

O processo, normalmente utilizado para produzir o hidrogênio (H_2) em escala, é através da eletrólise da água pela eletricidade. Uma vez produzido, o hidrogênio alimenta células a combustível que geram eletricidade que carrega a bateria, que aciona o motor elétrico que move as rodas. Para que este processo seja sustentável, a corrente elétrica necessária para execução da eletrólise, deve ser gerada por fonte primária renovável, como eólica ou solar fotovoltaica, conforme ilustração acima. Bem como, gerada por fonte limpa como a energia nuclear.

Locomotivas 100% Elétricas com Baterias:

Essa solução utiliza baterias de íons de lítio recarregáveis, que podem ser alimentadas em estações de carregamento e/ou por frenagem regenerativa e, eventualmente, pela catenária (rede aérea). São ideais para manobras em pátios ferroviários, rotas suburbanas e áreas com restrições ambientais. As limitações de autonomia ainda restringem seu uso a trajetos curtos, mas os avanços em densidade energética e modularidade abrem espaço para seu uso crescente. As Ferrovias EFC (Estrada de Ferro Carajás e EFVM (Vitória- Minas) operam locos de manobras 100% elétricas a bateria.

Integração de Tecnologias

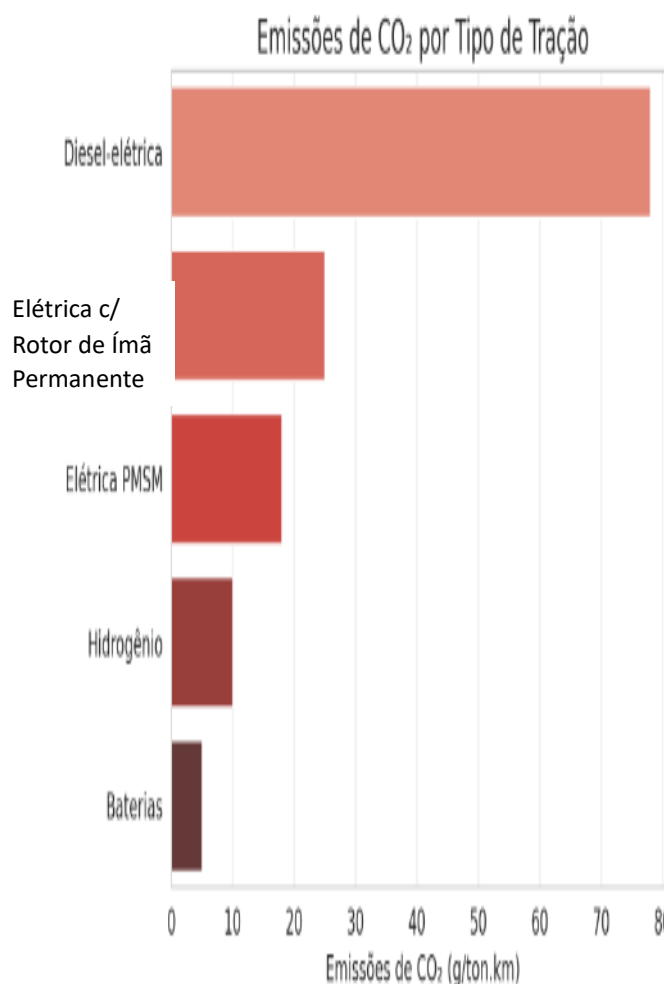
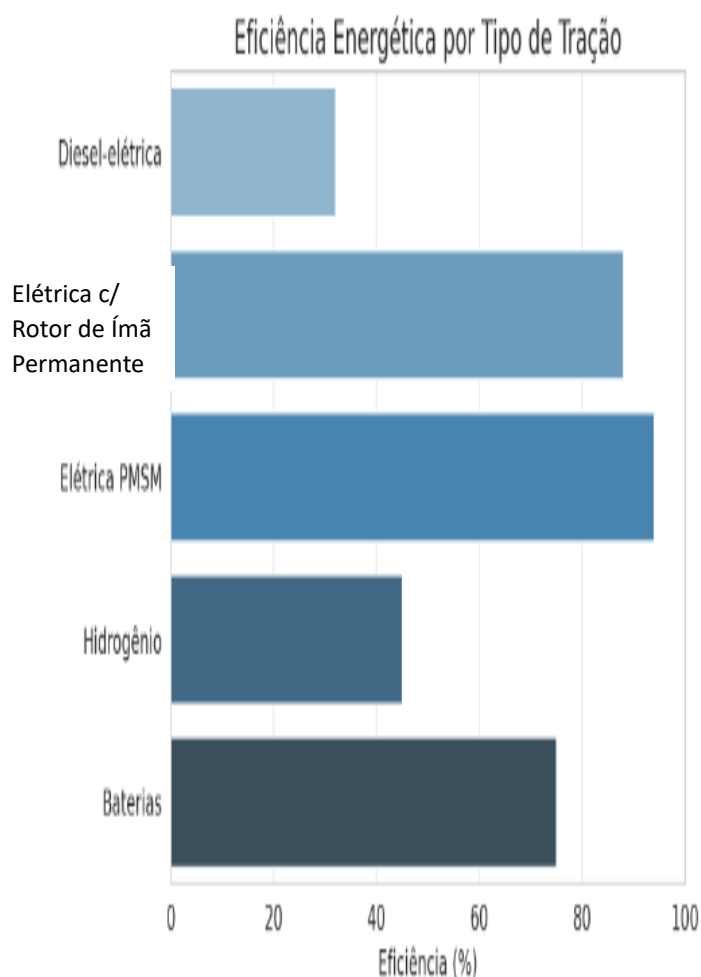
A eletrificação ferroviária brasileira pode ser pensada por exemplo como um sistema híbrido, onde linhas troncais de alto fluxo utilizam catenárias com motores síncronos de ímã permanente, enquanto ramais secundários e segmentos específicos podem adotar soluções com hidrogênio ou baterias, maximizando a eficiência energética e ambiental da malha ferroviária.

A Eficiência Superior dos Motores Síncronos com Rotor de Ímã Permanente

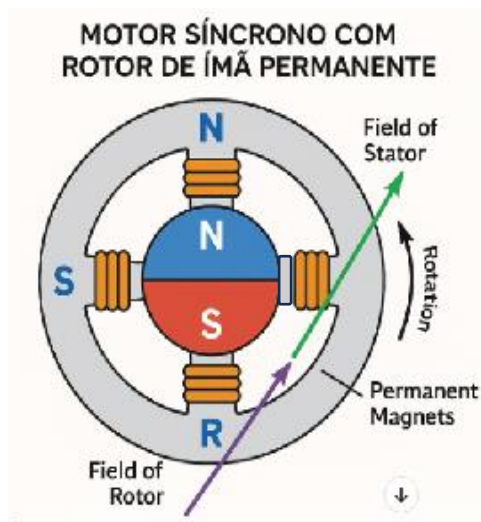
A substituição de motores de tração diesel-elétricos por motores síncronos de ímã permanente em locomotivas, representa um avanço significativo em eficiência energética, desempenho e controle. Como exemplos reais, pode ser citado o **Shinkansen** (Japão), cujos modelos mais novos já estão operando com motores síncronos de ímã permanente por sua leveza e eficiência. Igualmente, trens regionais e metrô (Siemens e Alstom) estão adotando este motor para substituição de motores de indução antigos.

Entre suas principais vantagens estão:

- Maior rendimento (acima de 96%) em faixas típicas de operação.
- Melhor resposta dinâmica e controle vetorial de alta precisão.
- Menor dissipação térmica e menor demanda de ventilação.
- Compactação e menor peso por potência.
- Sem perdas por efeito Joule, pois não tem bobinas de cobre para gerar campo magnético no rotor;



Funcionamento Básico do Motor



1- Componentes principais (na figura)

Estator (cinza): Parte externa fixa do motor. Contém os **enrolamentos** (bobinas laranja) onde passa corrente trifásica.

Rotor (centro azul/vermelho): Gira com o eixo. Contém **ímãs permanentes** com polos Norte (N) e Sul (S).

2. Campos magnéticos (setas)

Seta verde (Field of Stator): Representa o **campo magnético girante** criado pelas correntes trifásicas no estator.

Seta roxa (Field of Rotor): Representa o campo fixo dos ímãs no rotor magnético

Repare, prezado leitor, que ambos os vetores apontam para a **mesma direção**, indicando que o campo do rotor e do estator estão **sincronizados**.

Movimento e Sincronismo

- O campo girante do estator "puxa" o rotor, e como os ímãs permanentes não precisam de excitação elétrica, o rotor **gira exatamente à mesma velocidade do campo**.
- A rotação (indicada pela seta preta curva) é no **sentido anti-horário**, conforme o sentido do campo girante.
- Como o rotor acompanha perfeitamente o campo girante, dizemos que há **sincronismo**.
- Isso é diferente do motor de indução, em que o rotor "atrasaria" (escorregamento).

Conclusão

A eletrificação ferroviária no Brasil pode ser tecnicamente viável em trechos de alta densidade logística e distâncias longas, podendo ser ainda mais eficiente com a adoção de motores síncronos de ímã permanente. A eletrificação representa uma solução eficaz para descarbonização e ganhos formidáveis de eficiência energética e operacional. Como estratégia, por exemplo, a eletrificação pode ser combinada através de soluções modulares, isto é, com catenária, locomotivas híbridas, como também com bateria ou com hidrogênio em corredores de menor volume, garantindo flexibilidade operacional e ganhos ambientais em escala nacional. No entanto, é bom lembrar que o sucesso depende de planejamento de longo prazo, política setorial, articulação público-privada, análise de viabilidade técnico-econômica caso a caso e fontes de financiamento.

O Plano Nacional de Ferrovias prevê o aumento do transporte de carga ferroviária de 21% para 40% até 2035, embarcando nesta esteira é hora, então, de aprofundar estudos de viabilidades de eletrificação trecho a trecho, visando diminuir o "custo Brasil" e, assim, tornar o produto nacional mais competitivo no mercado internacional, notadamente em relação a commodities agro e minerais, responsáveis por parte significativa do PIB nacional. Finalmente, eletrificar ferrovias no Brasil não é simplesmente uma questão de opção, é missão mesmo. Eis o desafio.

* **M.Sc. Engenheiro Eletricista e Ferroviário**

Integrante da **Aenfer** – Associação de Engenheiros Ferroviários