



Descarbonização dos Trilhos : Eletrificação Ferroviária e a Transição Energética no Brasil

*Luiz Carlos Gabriel

A tração ferroviária de longo curso no Brasil, é amplamente atrelada a sistemas de tração 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. Adicionalmente, crescem as demandas por sistemas sustentáveis firmados nos Acordos Climáticos da ONU (COPs) e pelo comércio internacional. Consequentemente, crescem também os esforços para substituição de combustíveis fósseis por tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Surge, então, a necessidade de discutir caminhos viáveis para uma transição energética que una eficiência operacional, redução de emissões e inovação tecnológica, como por exemplo fonte primária de energia a hidrogênio associada a células a combustível, armazenamento de energia elétrica em baterias de íon-lítio, sistema de catenárias auto tensionáveis, motores de tração síncronos com rotor de ímã permanente.

Por que Eletrificar Ferrovias?



- **Eficiência energética superior:** locomotivas elétricas possuem rendimento muito superior às diesel-elétricas, principalmente em regimes de carga constante.
 - **Redução de emissões:** com mais de 80% 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.
- Menor poluição sonora: locomotivas elétricas operam com ruído significativamente inferior, o que beneficia áreas urbanas e comunidades próximas às linhas férreas.

Podemos citar como potencial para eletrificação, por exemplo, a Ferrovia Norte-Sul (muito extensa, grande fluxo e eixo troncal estruturante), assim como a Ferrovia Ferrogrão (em discussão) com 933Km, ligará Sinop (MT) ao Porto de Miritituba(PA) para o escoamento da grande 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 bilhões.

A Implementação não é Tarefa Trivial

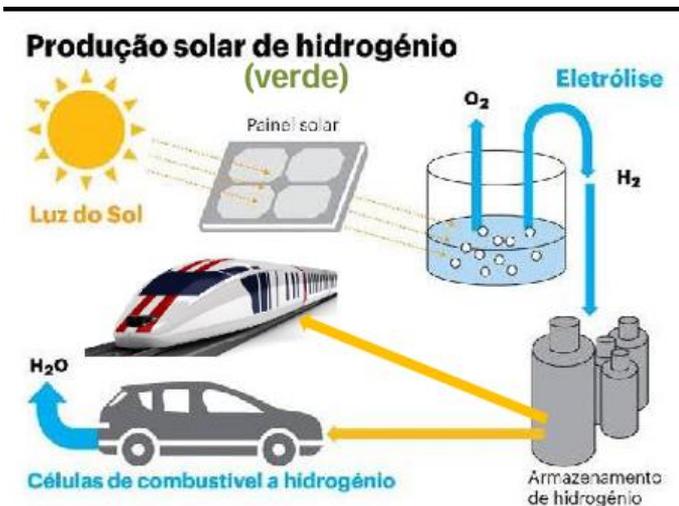
- **Alto custo de capital (CAPEX):** se a opção for pela instalação de sistemas de catenária, subestações e reforço da rede elétrica altos investimentos serão demandados.
- **Dispersão da demanda:** muitos trechos da malha ferroviária operam com baixos volumes e sazonalidade acentuada, o que dificulta a amortização dos investimentos.
- **Complexidade de manutenção em regiões remotas:** trechos na Amazônia ou no Cerrado exigem soluções robustas 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 é economicamente inviável, bem como em relevos geográficos desafiadores.

Locomotivas a Hidrogênio: Utilizam células a combustível para converter hidrogênio em eletricidade a bordo, alimentando 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 (Alstom com o Coradia iLint), também no Reino Unido, França e Estados Unidos.

O processo, normalmente utilizado para produzir o hidrogênio (H₂) em escala, é através da eletrólise da água através de eletricidade. Uma vez produzido, o Hidrogênio alimenta células a combustível que geram eletricidade e alimentam 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 a baixo. Ou gerada por fonte limpa, como energia nuclear.



Coradia iLint. Movido a Hidrogênio

Locomotivas 100% Elétricas com Baterias:

Essa solução utiliza baterias de íons de lítio recarregáveis, que podem ser alimentadas em estações de carregamento 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. A Cia Vale já opera com locos de manobras 100% elétricas a bateria na EFC (Estrada de Ferro Carajás) e EFVM (Vitória-Minas)

Integração de Tecnologias:

A eletrificação ferroviária brasileira poderia ser pensada 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.

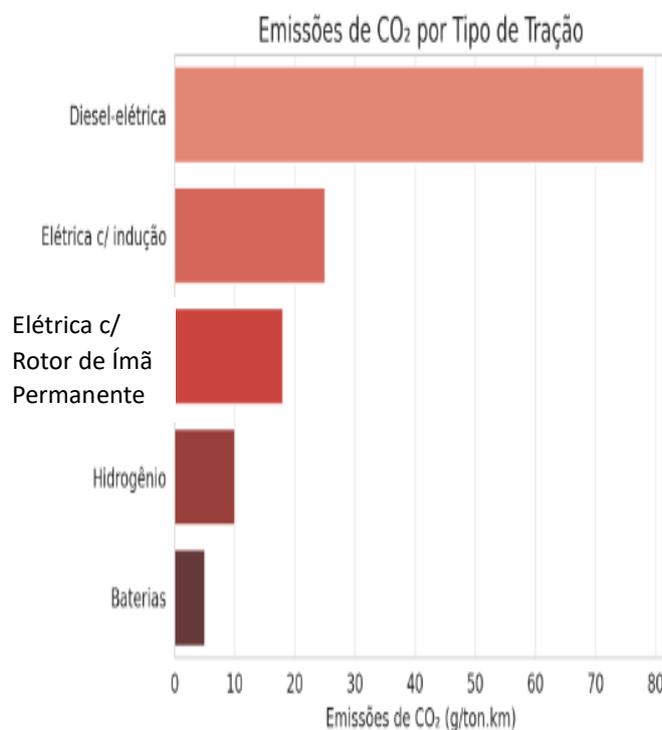
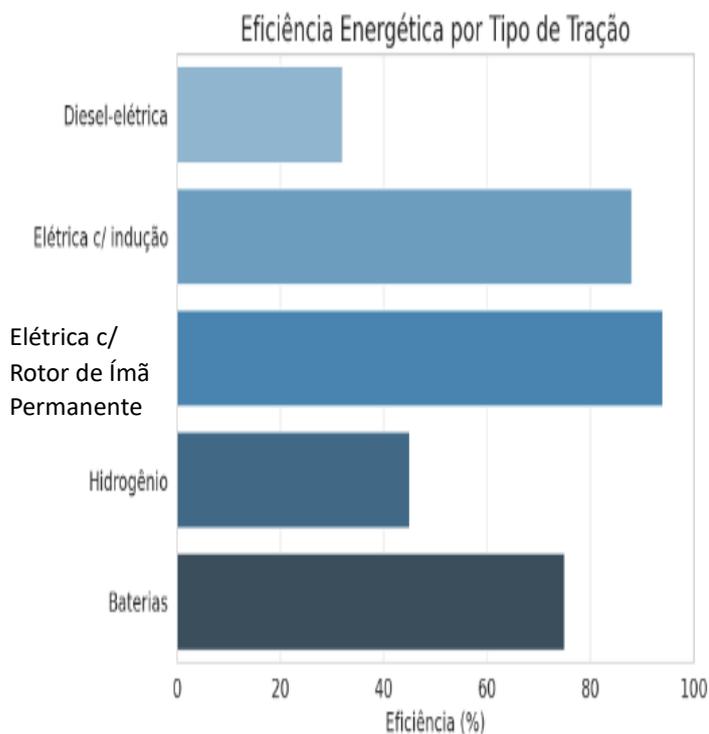
A Eficiência Superior dos Motores Síncronos com Rotor de Ímã Permanente

A substituição de motores de tração diesel-elétricos (e também os de indução magnética) 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 (ex: Siemens e Alstom) estão adotando este motor para substituição de motores de indução antigos.

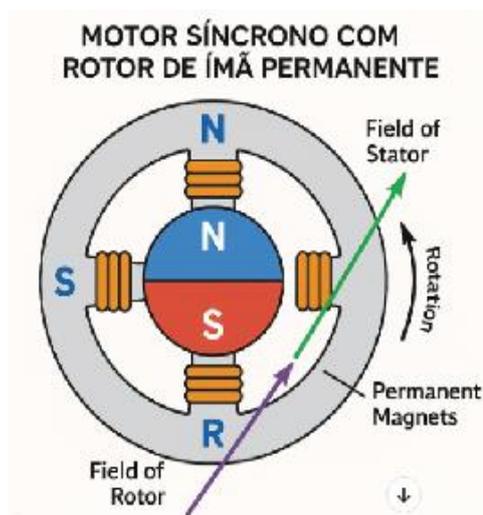
Entre suas principais vantagens estão:

- Maior rendimento (> 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 : não tem bobinas de cobre para gerar campo magnético no rotor;

Os modelos mais novos do trem japonês Shinkansen, já estão operando com o motor síncrono de ímã permanente por sua eficiência, leveza e preservação ambiental. Igualmente, em trens regionais e de metrô na Europa (ex: Siemens, Alstom) estes motores síncronos estão sendo adotados para substituição de motores de indução (assíncronos) antigos.



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 é tecnicamente viável em trechos de alta densidade logística, e pode ser ainda mais eficiente com a adoção de **motores síncronos de ímã permanente**. A eletrificação já representa uma estratégia eficaz de descarbonização e ganho de eficiência operacional nos principais corredores logísticos do sistema ferroviário brasileiro. Como uma estratégia, a eletrificação poderia ser combinada a soluções modulares com catenária, com locomotivas híbridas, com bateria ou com hidrogênio em corredores de menor volume, garantindo flexibilidade operacional e ganhos ambientais em escala nacional. No entanto o sucesso depende de planejamento de longo prazo, política setorial, articulação público-privada e análise de viabilidade técnico-econômica caso a caso. Por outro lado, estes condicionamentos, tal qual as prorrogações antecipadas de concessões e o modelo de autorizações, pouco têm atendido às expectativas, daí a demanda por reformas no setor. Como está para ser lançado o Plano Nacional de Ferrovias, que prevê o aumento do transporte de carga ferroviária de 24% para 40% até 2035, bem como também modernização do sistema ferroviário, é hora 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 (e interno), notadamente em relação a commodities agro e minerais que compõem importante parte do PIB nacional. Eis o desafio.

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