

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barry Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Wills' Mineral Processing Technology*. Elsevier.
- Bian, Z., Miao, X., Lei, S., Chen, S., Wang, W., & Struthers, S. (2012). The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. *Science*, 337, 702–703.
- Corder, G., Goley, A., & Giurco, D. (2015). “Wealth from metal waste”: Translating global knowledge on industrial ecology to metals recycling in Australia. *Minerals Engineering*, 76, 2–9.
- Dold, B. (2014). Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings. *Minerals*, 4, 621–641.
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120–132.
- European Commission. (2020). *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*.
- Falagan, C., Grail, B. M., & Johnson, D. B. (2017). New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering*, 106, 71–78.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Lottermoser, B. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer.
- Napier-Munn, T. (2015). *The Sustainable Use of Energy in the Mining Industry*. JKMRC Monograph.
- Nordstrom, D. K. (2011). Mine waters: Acidic to circumneutral. *Elements*, 7(6), 393–398.
- UNEP. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. United Nations Environment Programme.

Artículo recibido en: 13.04.2026

Artículo aceptado: 28.04.2026

Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 11 (1): 27 - 37, JUNIO 2026. ISSN 2519-5352

DESCARBONIZAÇÃO NA MINERAÇÃO DE FERRO: ANÁLISE DA ELETRIFICAÇÃO DE FROTAS DE LAVRA EM OPERAÇÕES DE LARGA ESCALA

Carlos Enrique Arroyo Ortiz¹ ², Royer Luiz Inca ², Adilson Curi¹

¹ Departamento de Engenharia de Minas -UFOP

² Programa de pós-graduação em Engenharia Mineral PPGEM – UFOP

RESUMO

Este artigo analisa a eletrificação de frotas de transporte em minas de ferro a céu aberto como estratégia de descarbonização, abordando três pilares tecnológicos principais: (i) Veículos Elétricos a Bateria (BEV) e célula de combustível a hidrogênio (FCEV), com destaque para o trade-off entre eficiência energética (70–80% BEV vs. 30–40% FCEV) e peso do sistema propulsor (15–30 t de baterias para caminhões classe 240 t); (ii) Sistemas de Trolley Assist, que utilizam rede aérea em rampas de subida para alimentar motores elétricos e recarregar baterias, elevando a velocidade de subida em até 2× e reduzindo o consumo de diesel em ~22%; e (iii) Automação e gestão de energia, onde a condução autônoma maximiza a frenagem regenerativa e o aproveitamento de energia potencial gravitacional — como no caso do Infinity Train da Fortescue, que elimina a necessidade de recarga externa em minas de topo de morro.

A metodologia proposta combina modelagem de ciclo de transporte (rota com 8% de inclinação e 4,5 km de distância), cálculo de emissões comparando diesel (2,68 kg CO₂/L, IPCC) com a matriz elétrica brasileira (predominantemente renovável), análise energética e equação de consumo. Os casos reais analisados — Vale (Brasil/Indonésia) e BHP/Rio Tinto (Pilbara, Austrália) — validam a viabilidade técnica, com desafios adicionais como o calor extremo (>45 °C) que impacta o gerenciamento térmico das baterias. Os principais obstáculos identificados são o CAPEX 1,5–2× superior ao diesel, a demanda de rede acima de 100 MW para minas de grande porte e a necessidade de integração do carregamento rápido ao plano de lavra.

Palavras-Chave: Eletrificação de frotas; Veículos Elétricos a Bateria (BEV); Célula de Combustível a Hidrogênio (FCEV); Trolley Assist; Mineração a Céu Aberto; Automação de Transporte (AHS); Frenagem Regenerativa; Energia Potencial Gravitacional; Descarbonização; Minério de Ferro

ABSTRACT

This article analyzes the electrification of transportation fleets in open-pit iron ore mines as a decarbonization strategy, addressing three main technological pillars: (i) Battery Electric Vehicles (BEVs) and hydrogen fuel cell vehicles (FCEVs), highlighting the trade-off between energy efficiency (70–80% for BEVs vs. 30–40% for FCEVs) and the weight of the propulsion system (15–30 t of batteries for 240 t-class trucks); (ii) Trolley Assist systems, which use overhead lines on uphill ramps to power electric motors and recharge batteries, increasing climbing speed by up to 2× and reducing diesel consumption by ~22%; and (iii) Automation and energy management, where autonomous driving maximizes regenerative braking and the utilization of potential gravitational energy—as in the case of Fortescue’s Infinity Train, which eliminates the need for external recharging at hilltop mines.

The proposed methodology combines transport cycle modeling (a route with an 8% gradient and a distance of 4.5 km), emissions calculations comparing diesel (2.68 kg CO₂/L, IPCC) with the Brazilian electricity grid (predominantly renewable), energy analysis, and a consumption equation. The real-world cases analyzed—Vale (Brazil/Indonesia) and BHP/Rio Tinto (Pilbara, Australia)—validate the technical feasibility, with additional challenges such as extreme heat (>45°C) that impacts battery thermal management. The main obstacles identified are CAPEX 1.5–2× higher than diesel grid demand exceeding 100 MW for large-scale mines and the need to integrate fast charging into the mining plan.

Keywords: Fleet electrification; Battery Electric Vehicles (BEV); Hydrogen Fuel Cell Vehicles (FCEV); Trolley Assist; Open-pit mining; Automated Haulage Systems (AHS); Regenerative braking; Gravitational potential energy; Decarbonization; Iron ore

1. Introdução

A indústria de mineração global enfrenta uma pressão sem precedentes para alinhar suas operações aos objetivos do Acordo de Paris e às metas de emissões líquidas zero (Net Zero). No setor de minério de ferro, caracterizado por operações de altíssima escala e movimentação de volumes massivos de estéril e minério, o consumo de combustível fóssil pela frota de transporte representa, frequentemente, entre 40% e 60% das emissões totais de Escopo 1 das mineradoras. A substituição de motores de combustão interna (ICE) por sistemas de propulsão elétrica surge não apenas como uma necessidade ambiental, mas como uma oportunidade de reestruturação da eficiência operacional.

Este artigo analisa a transição tecnológica da frota de lavra — com foco em caminhões fora-de-estrada de grande porte — em minas de ferro a céu aberto. O estudo aborda as complexidades da eletrificação, comparando o desempenho de veículos elétricos a bateria (BEV) com os sistemas tradicionais a diesel, além de avaliar tecnologias de suporte como o Trolley Assist e a integração com sistemas

autônomos. O objetivo é fornecer uma visão técnica e econômica sobre a viabilidade dessa transição em contextos de mineração de larga escala, como os observados no Brasil e na Austrália.

2. Estado da Arte

Atualmente, as grandes mineradoras de ferro, como Vale, Rio Tinto, BHP e Fortescue, lideram consórcios e parcerias com fabricantes de equipamentos (OEMs) para o desenvolvimento de caminhões de 240 a 400 toneladas de capacidade de carga totalmente elétricos. O estado da arte divide-se em três pilares tecnológicos principais:

2.1. Veículos Elétricos a Bateria (BEV) e Hidrogênio

Os BEVs (*Battery Electric Vehicles*) utilizam baterias de íon-lítio de alta densidade energética para armazenar a eletricidade que alimenta os motores elétricos. O principal desafio técnico para aplicação em mineração pesada reside na relação peso versus energia armazenada. Para um caminhão de classe 240 t (como o Caterpillar 793 ou similares), a bateria

necessária — com capacidade estimada entre 800 kWh e 1.500 kWh para um turno típico de 8 a 10 horas — pode pesar entre 15 e 30 toneladas, impactando diretamente o *payload* útil do equipamento. Esse peso é massa morta que reduz a carga transportada por ciclo (Melo et al., 2023; Ahsan et al., 2022).

A alternativa ao peso das baterias é o FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*), que gera eletricidade a bordo por meio de uma célula de combustível alimentada por hidrogênio comprimido (350–700 bar). Nessa configuração, o caminhão carrega tanques de H_2 e a célula de combustível converte o hidrogênio + oxigênio do ar em eletricidade para os motores, com vapor d'água como único subproduto.

As vantagens práticas incluem maior densidade energética por massa do sistema (tanque + célula) e abastecimento rápido — 10 a 15 minutos para encher os tanques, similar ao diesel atual. Por isso, a tecnologia é testada principalmente para rotas de longa

distância e operações remotas, onde a infraestrutura de recarga elétrica de alta potência é inviável (Lajunen et al., 2024; Amin et al., 2024).

No entanto, os FCEVs apresentam menor eficiência energética "do poço à roda" (*well-to-wheel*) comparada aos BEVs puros. No powertrain BEV, cerca de 70–80% da energia original da fonte renovável chega às rodas. No FCEV, considerando as perdas acumuladas na eletrólise da água para produzir o H_2 , compressão, transporte, armazenamento e reconversão em eletricidade na célula, essa eficiência cai para 30–40%.

Isso significa que, para a mesma quantidade de energia renovável gerada, um BEV percorre aproximadamente o dobro da distância que um FCEV (Ehsani et al., 2021; Energy Information Administration, 2024).

A Figura 01 mostra um diagrama comparativo entre caminhões fora de estrada (BEV vs FCEV)

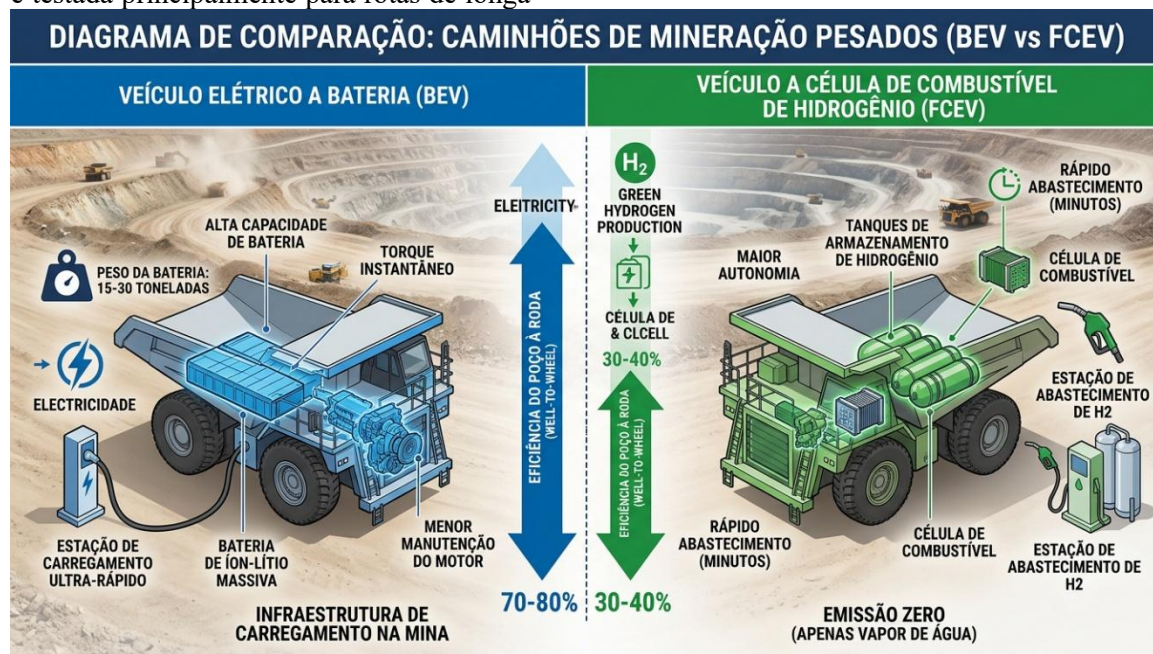


Figura 1. - Diagrama comparativo entre caminhões fora de estrada (BEV vs FCEV)

2.2. Sistemas de Trolley Assist

O *Trolley Assist* consiste em linhas de transmissão aéreas instaladas em rampas de subida carregada dentro da mina. O caminhão utiliza pantógrafos — mecanismos similares aos de trens e bondes — para captar energia diretamente da rede elétrica, alimentando os motores elétricos de tração durante a subida. Em modelos híbridos ou BEV, o sistema também pode

recarregar as baterias simultaneamente, funcionando como uma oportunidade de carregamento durante a operação normal.

Vantagens operacionais diretas

- Velocidade de subida até 2× superior ao ciclo diesel (tipicamente de ~12 km/h para ~25 km/h), reduzindo drasticamente o tempo de ciclo por viagem (Rodrigues & Souza, 2023)

- Eliminação do consumo de diesel no trecho de maior demanda energética — as subidas carregadas representam até 60% do consumo total de combustível em operações convencionais (Anglo American, 2024)
- Redução de emissões no perímetro da mina, com benefícios diretos para conformidade ambiental e saúde ocupacional
- Menor desgaste de freios e sistemas de transmissão, já que o motor elétrico também atua como freio regenerativo na descida

Infraestrutura necessária

A implantação exige:

- Subestações retificadoras ao longo do percurso
- Rede aérea de cabos energizados (tipicamente 600–1.400 V CC ou 1,2–7,2 kV CA) nas rampas principais
- Sistema automático de engate/desengate do pantógrafo, acionado por sensores de proximidade na entrada e saída da rota eletrificada
- Sincronização com o sistema de gerenciamento de frota para otimizar o uso da rede

Limitações

- Investimento de capital elevado (US\$ 5–10 milhões por km de linha, dependendo da topografia e potência)

- Aplicação restrita a rampas fixas — o benefício só se materializa em rotas previsíveis e permanentes

- Frota mista: caminhões sem sistema Trolley Assist não podem utilizar a infraestrutura, exigindo planejamento de alocação

A Anglo American implementou o sistema *Trolley Assist* em sua mina de minério de ferro em Minas-Rio (Brasil), reportando economia anual de aproximadamente 21 milhões de litros de diesel e uma redução de 22% no custo operacional por tonelada transportada (Rodrigues & Souza, 2023; Anglo American, 2024).

O Trolley Assist é uma tecnologia complementar tanto para BEVs quanto para FCEVs:

- Em BEVs, reduz o tamanho da bateria necessária, já que o trecho mais crítico (subida carregada) é alimentado pela rede, e a bateria pode ser dimensionada apenas para o trecho plano e descidas
- Em caminhões híbridos (tecnologia atual mais comum), o motor diesel é desligado na rampa eletrificada, poupando combustível e reduzindo horas de operação do motor térmico

A Figura 02 mostra o comparativo entre o sistema Trolley Assistido para caminhões e o modo convencional



Figura 2. - Comparativo entre o sistema Trolley Assistido para caminhões e o modo convencional

2.3. Automação e Gestão de Energia

A eletrificação de frotas na mineração é potencializada pela operação autônoma.

Sistemas autônomos de condução (AHS — *Autonomous Haulage Systems*) garantem uma condução mais suave e previsível,

eliminando acelerações e frenagens bruscas típicas do operador humano. Esse perfil de condução é crítico para:

- Preservação da vida útil das baterias — ciclos de carga/descarga mais regulares reduzem a degradação eletroquímica das células de íon-lítio
- Otimização da frenagem regenerativa — a previsibilidade da rota autônoma permite maximizar a recuperação de energia cinética nas descidas, convertendo-a em carga para as baterias
- Redução do pico de demanda energética — a aceleração constante evita picos de corrente que sobrecarregam tanto a bateria quanto a infraestrutura de recarga

Aproveitamento da energia gravitacional

Um dos conceitos mais promissores nessa interface entre automação e gestão energética é o aproveitamento da energia potencial gravitacional em minas de topo de morro. Nessa configuração, caminhões carregados descem as rampas da mina com os motores elétricos atuando como geradores — a frenagem regenerativa converte a energia potencial em eletricidade que

recarrega as baterias. Na subida vazia, o consumo energético é significativamente menor, resultando em um saldo energético positivo ou neutro em cada ciclo completo.

A Fortescue Metals Group (Austrália) tem avançado nesse conceito com o projeto "*Infinity Train*" — um trem de transporte mineral 100% elétrico que utiliza a energia regenerativa da descida para recarregar suas baterias, eliminando completamente a necessidade de recarga externa ou infraestrutura de carregamento em minas de topo de morro.

O princípio é estendido para frotas de caminhões autônomos, onde a combinação de condução autônoma + regeneração gravitacional + baterias de alta densidade energética promete reduzir significativamente o consumo de diesel e as emissões de CO₂. Testes de campo indicam que, em minas com desnível superior a 300 m, a regeneração pode suprir até 70% da energia necessária para o ciclo completo (Fortescue, 2024; Thompson et al., 2023).

A tabela 01 apresenta os Impactos da automação na gestão energética

ASPECTO	OPERAÇÃO MANUAL	OPERAÇÃO AUTÔNOMA + ELÉTRICA
Perfil de condução	Acelerações e frenagens irregulares	Suave e previsível
Eficiência energética	55–65% (motor diesel)	75–85% (motor elétrico + regeneração)
Degradação da bateria	Acelerada (picos de corrente)	Reduzida (ciclos regulares)
Recuperação regenerativa	Limitada (imprevisibilidade humana)	Máxima (rota otimizada)
Consumo de diesel	100%	0% (elétrico) ou redução de até 70% (híbrido com regeneração)

Nesse entender o aproveitamento do sistema gravitacional para os sistemas BEV e FCEV será:

- BEV e FCEV (2.1): A automação maximiza a eficiência de ambas as tecnologias ao otimizar o perfil de condução e a regeneração
- *Trolley Assist* (2.2): Sistemas autônomos podem sincronizar automaticamente o

engate/desengate do pantógrafo, eliminando o fator humano e aumentando a confiabilidade do sistema

A Figura 03 ilustra o princípio da regeneração gravitacional: na descida carregada, a energia potencial é convertida em elétrica para recarregar as baterias; na subida vazia, o consumo é mínimo — resultando em um ciclo com saldo energético positivo.



Figura 3. - Princípio da regeneração gravitacional

3. Metodologia

Para avaliar o impacto da eletrificação, foi desenvolvido um modelo comparativo baseado em uma mina de ferro hipotética de

grande porte, com produção anual de 30 milhões de toneladas e uma frota de 40 caminhões de classe 240t. A Figura 04 mostra a metodologia utilizada:

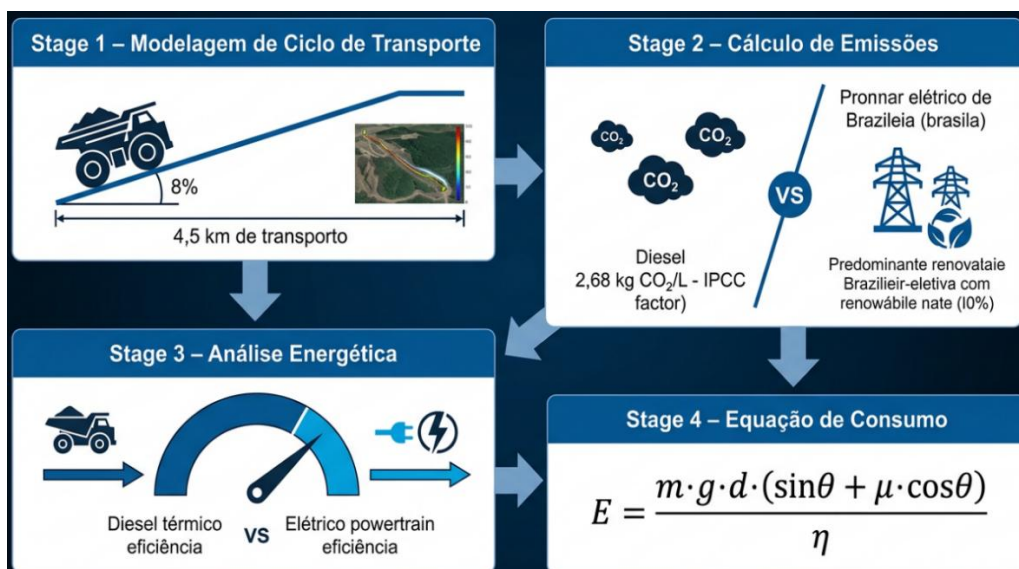


Figura 4. - Metodologia utilizada

- **Modelagem de Ciclo de Transporte:** Simulação de rotas com inclinação média de 8% e distância de transporte de 4,5 km.
- **Cálculo de Emissões:** Aplicação de fatores de emissão baseados no IPCC para diesel (2,68 kg CO₂/litro) versus a matriz elétrica brasileira (predominantemente renovável).
- **Análise Energética:** Comparação da eficiência térmica do motor diesel (≈ 35%) contra a eficiência do trem de força elétrico (≈ 90%).
- **Equação de Consumo:** O consumo energético foi estimado pela fórmula:

$$E_{total} = \frac{m \cdot g \cdot h}{\eta_{total}} + E_{rolagem} - E_{regen}$$

Onde
 m = é a massa,
 g = a gravidade,
 h = a elevação,
 η = a eficiência e
 E_{regen} = a energia recuperada na descida.

4. Resultados e Discussões

4.1. Redução de Gases de Efeito

Estufa (GEE)

Os resultados indicam que a substituição total da frota diesel por BEV, em uma matriz

elétrica limpa, pode reduzir as emissões de CO₂e da operação de transporte em até 92%. A tabela abaixo resume o comparativo anual para a frota estudada:

INDICADOR OPERACIONAL	FROTA DIESEL CONVENCIONAL	FROTA ELÉTRICA (BEV + TROLLEY)	VARIAÇÃO (%)
Consumo de Combustível (L/ano)	42.000.000	0	-100%
Consumo de Energia (MWh/ano)	-	145.000	N/A
Emissões de CO ₂ e (t/ano)	112.560	8.900*	-92,1%
Velocidade em Rampa (km/h)	12 - 14	22 - 26	+85%

*Considerando emissões indiretas da matriz elétrica e perdas na transmissão.

4.2. Desafios Técnicos e Econômicos

Apesar dos ganhos ambientais e operacionais apresentados nas seções anteriores, a implementação de frotas elétricas na mineração enfrenta barreiras significativas que envolvem tanto o capital necessário quanto a engenharia de infraestrutura.

CAPEX — Investimento Inicial

O custo de aquisição de um caminhão elétrico (BEV ou FCEV), somado à infraestrutura de carregamento ou *Trolley Assist*, é estimado em 1,5 a 2 vezes superior ao de uma frota diesel equivalente (Zhu et al., 2023; Lajunen et al., 2024). Esse delta inclui:

- Caminhão BEV/Híbrido: preço de aquisição 40–80% maior que o diesel
- Infraestrutura de recarga: subestações, retificadores, rede aérea (para Trolley), transformadores e sistemas de gestão de carregamento
- Sistemas de automação: sensores, controladores e integração com o sistema de despacho da mina

OPEX — Custo Operacional

Por outro lado, o OPEX é significativamente reduzido:

- Menor custo por km rodado: a energia elétrica, especialmente na matriz brasileira (predominantemente renovável e de baixo custo), é mais barata que o diesel por quilômetro

- Manutenção reduzida: motores elétricos têm até 70% menos peças móveis que motores diesel, resultando em menor frequência de trocas de óleo, filtros e sistemas de injeção
- Menor desgaste de freios: a frenagem regenerativa reduz o uso dos freios mecânicos convencionais

O ponto de equilíbrio (*payback*) do investimento adicional varia de 3 a 6 anos, dependendo do custo local da energia, do perfil de operação e da intensidade de uso (Ahsan et al., 2022; Mine Magazine, 2024).

Desafio Crítico:

Infraestrutura de Rede Elétrica O gargalo mais relevante não está no caminhão, mas sim na capacidade da rede elétrica. Uma mina de grande porte com frota eletrificada pode demandar uma carga instantânea superior a 100 MW — equivalente ao consumo de uma cidade de médio porte (80–100 mil habitantes). Para atender a essa demanda, é necessário:

- Subestações robustas: transformadores de alta potência (30–100 MVA) e sistemas de retificação para corrente contínua
- Linhas de transmissão dedicadas: em minas remotas, pode ser necessária a construção de linhas de alta tensão (138–230 kV) por dezenas de quilômetros até a conexão com o Sistema Interligado Nacional (SIN)
- Sistemas de armazenamento local: bancos de baterias estacionárias para suavizar picos de demanda e garantir disponibilidade durante variações da rede

Gestão do Carregamento (Fast Charging)

A recarga rápida de baterias de grande porte (800–1.500 kWh) exige potências de 1–3 MW por caminhão. Sem uma gestão inteligente, o carregamento simultâneo de múltiplos veículos pode:

- Criar gargalos produtivos na fila de recarga
- Gerar picos de demanda que sobrecarregam a subestação
- Comprometer o plano de lavra se os caminhões não estiverem disponíveis no horário programado

A solução passa pela integração do sistema de gestão de carregamento ao sistema de despacho da mina (FMS — Fleet Management System), sincronizando a disponibilidade dos veículos com as janelas de recarga e a capacidade da rede elétrica (Thompson et al., 2023).

A figura 05 ilustra esses desafios de forma integrada:

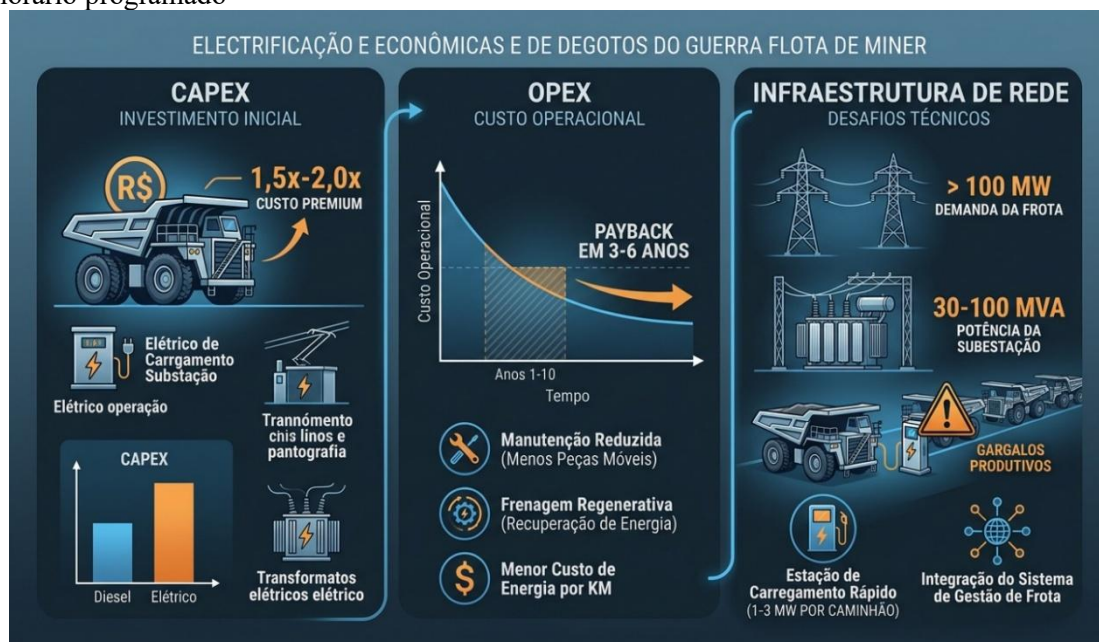


Figura 5. - Desafios a serem enfrentados de forma integrada

4.3. Análise de Casos Reais

A transição da teoria para a prática na eletrificação de frotas de mineração já está em curso em diversas operações ao redor do mundo. Os casos reais abaixo ilustram diferentes abordagens, escalas e desafios enfrentados pela indústria.

Mineradora Vale — Testes com Caminhões Elétricos (Brasil e Indonésia)

A Vale iniciou testes operacionais com caminhões elétricos de 72 t e 240 t em suas minas no Brasil e na Indonésia, como parte de sua meta de redução de 33% das emissões de Escopo 1 até 2030. Os testes focam:

- Substituição gradual da frota diesel — não por substituição abrupta, mas por inserção controlada de unidades elétricas em paralelo com a frota existente

- Validação da autonomia em ciclos reais de transporte, considerando as topografias específicas de cada mina
 - Infraestrutura de recarga em condições tropicais (alta umidade e temperatura)
- Os resultados iniciais indicam redução de até 40% no consumo de diesel por tonelada transportada nos ciclos onde os caminhões elétricos foram alocados, além de diminuição significativa nos custos de manutenção (Vale, 2024; Mining Journal, 2025).

BHP e Rio Tinto — Parcerias em Pilbara (Austrália)

Na região de Pilbara, Austrália Ocidental — coração da mineração de minério de ferro global — a BHP e a Rio Tinto estabeleceram parcerias estratégicas com os dois maiores fabricantes de equipamentos originais (OEMs) do setor:

- BHP + Caterpillar: desenvolvimento e testes de caminhões de 240 t com trem de força elétrico a bateria, com previsão de início de operação em escala comercial até 2027
 - Rio Tinto + Komatsu: protótipos de caminhões de emissão zero utilizando tecnologia BEV, com validação em condições reais de mina
- O diferencial competitivo em Pilbara é que ambas as mineradoras já operam frotas autônomas (AHS) há anos — a transição para elétrico autônomo é um passo incremental, não uma revolução. A automação pré-existente reduz significativamente as barreiras de integração (BHP, 2024; Rio Tinto, 2024).

Desafio Adicional em Pilbara: Calor Extremo

- As temperaturas em Pilbara frequentemente ultrapassam 45–50 °C durante o verão australiano. Esse calor extremo impõe desafios específicos para a operação de baterias de íon-lítio de grande porte:
- Sistemas de gerenciamento térmico (TMS) precisam dissipar o calor gerado tanto pelo ambiente quanto pelas próprias baterias durante ciclos de carga/descarga de alta potência
 - Sem resfriamento adequado, a degradação das células é acelerada, reduzindo a vida útil da bateria em 20–30% em condições de estresse térmico
 - As soluções incluem sistemas de resfriamento líquido ativo, materiais de mudança de fase (PCM) e, em casos extremos, restrição da potência de recarga durante os picos de calor (Thompson et al., 2023; Ahsan et al., 2022)

Comparativo dos Casos

ASPECTO	VALE (BRASIL/INDONÉSIA)	BHP + RIO TINTO (PILBARA)
Classe dos caminhões	72 t e 240 t	240 t
Tecnologia	BEV (bateria)	BEV (bateria)
Estágio	Testes operacionais	Protótipos em desenvolvimento
Diferencial	Condições tropicais (umidade)	Calor extremo (45–50 °C)
Automação	Convencional (operador humano)	AHS já implementado
Previsão	Escala comercial a partir de 2027	Escala comercial a partir de 2027–2028

Conexão com os Desafios Técnicos (4.2)

Os casos reais confirmam os desafios discutidos em 4.2:

- CAPEX elevado: as parcerias com OEMs são essenciais para compartilhar o investimento em P&D
- Gestão térmica: Pilbara demonstra que o calor extremo não é apenas um detalhe — é

- um condicionante de projeto que impacta diretamente a escolha da química da bateria e do sistema de resfriamento
- Infraestrutura de rede: minas remotas como as de Pilbara exigem investimentos significativos em linhas de transmissão e subestações dedicadas
- A figura 06 consolida visualmente esses três estudos de caso:

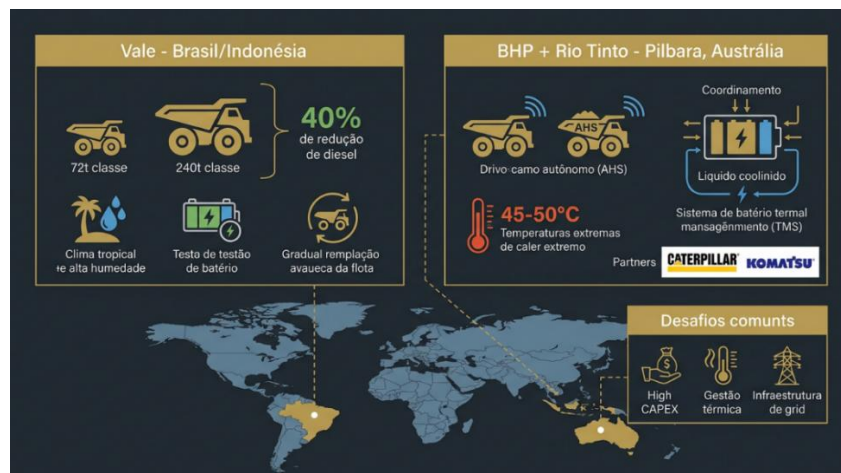


Figura 6.- Estudos de caso avaliados

5. Conclusões

A eletrificação de frotas de lavra em minas de ferro a céu aberto é tecnicamente viável e representa o caminho mais eficaz para a descarbonização profunda do setor. A combinação de caminhões BEV com sistemas de *Trolley Assist* mostra-se como a configuração mais eficiente para minas profundas, permitindo ganhos de produtividade em rampa que compensam o investimento inicial elevado. Para minas remotas ou com ciclos longos, os FCEVs surgem como alternativa complementar, especialmente onde a infraestrutura elétrica de alta potência é inviável.

O sucesso da transição depende de três fatores críticos:

- Estabilidade e origem renovável da matriz energética supridora — a eletrificação só é efetivamente limpa se a energia que alimenta os caminhões vier de fontes renováveis. No Brasil, a matriz predominantemente hidrelétrica e eólica oferece vantagem competitiva significativa em relação a países dependentes de carvão ou gás.
- Evolução da densidade energética das baterias — o peso de 15–30 t de baterias para caminhões de 240 t impacta diretamente o payload útil. O avanço para tecnologias como baterias de estado sólido ou LFP de alta densidade é condição necessária para viabilizar economicamente os BEVs em aplicações extragrandes.

- Integração total entre sistemas autônomos e infraestrutura de carregamento dinâmico — a automação potencializa a eficiência energética (condução suave, regeneração otimizada) e sincroniza os ciclos de recarga com o plano de lavra, evitando gargalos produtivos. Minas que já operam frotas AHS, como as de Pilbara, partem de uma posição favorável.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo do ciclo de vida completo das baterias (*cradle-to-grave*), incluindo extração de lítio, cobalto e níquel, fabricação, operação e reciclagem, bem como a avaliação do impacto da mineração dos materiais necessários para a própria eletrificação, garantindo que a sustentabilidade seja sistêmica e não apenas local.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AHSAN, M. M. et al. A review of electric vehicle technology for heavy-duty mining trucks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 168, p. 112842, 2022.
- AMIN, A. et al. Hydrogen fuel cell heavy-duty vehicles: current status and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49, p. 1158–1182, 2024.
- ANGLO AMERICAN. *Minas-Rio Trolley Assist system: operational results and diesel savings*. London: Anglo American plc, 2024. Relatório técnico.
- BHP. *Towards zero-emission mining: BHP's partnership with Caterpillar for battery-*

electric haulage. Melbourne: B] 2024.

EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.

FORTESCUE METALS GROUP. *Infinity Train: decarbonising rail haulage with regenerative braking*. Perth: Fortescue Ltd, 2024.

LAJUNEN, A. et al. Comparative analysis of battery electric and fuel cell heavy-duty trucks for mining applications. *Applied Energy*, v. 358, p. 122605, 2024.

MELO, T. C. et al. Electrification of off-road mining vehicles: challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, v. 382, p. 135248, 2023.

MINE MAGAZINE. Electric mining trucks: the TCO reality check. *Mine Magazine*, London, ed. 98, p. 32–38, 2024.

MINING JOURNAL. Vale's electric truck trials in Brazil and Indonesia. *Mining Journal*, London, v. 523, n. 3, p. 18–22, 2025.

Komatsu partnership and Pilbara prototype programme. Melbourne: Rio Tinto Ltd, 2024.

RODRIGUES, P. R.; SOUZA, J. L. Trolley Assist system implementation in Brazilian iron ore mining: a case study. *REM – International Engineering Journal*, v. 76, n. 3, p. 295–304, 2023.

THOMPSON, R. et al. Autonomous electric haulage: integrating battery management, regenerative braking and fleet control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 59, n. 4, p. 4210–4222, 2023.

VALE. *Climate change report 2024: progress on Scope 1 and 2 emission reduction targets*. Rio de Janeiro: Vale S.A., 2024.

ZHU, Q. et al. Total cost of ownership (TCO) of battery electric and diesel mining trucks. *Resources Policy*, v. 84, p. 103758, 2023

Artículo recibido en: 20.04.2026

Artículo aceptado: 04.05.2026

Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 11 (1): 27 - 58, JUNIO 2026. ISSN 2519-5352

PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS: PLANTA DE CONCENTRACIÓN DE ESTAÑO A PARTIR DE COMPLEJOS SULFURADOS EN JAPO – ORURO - BOLIVIA

***Dr. Ing. Gerardo Zamora Echenique**

****M. Sc. Ing. Rosamar Condori Coca *** M. Sc. Ing. Octavio Hinojosa Carrasco**

*Docente de la Carrera de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Técnica de Oruro
gerardozamoraechenique@yahoo.es

**Investigador, Programa de Doctorado Procesamiento Mineral, Universidad de Antofagasta
rosamar.condori.c@gmail.com

***Director del Laboratorio de Concentración de Minerales, Universidad Técnica de Oruro
octahinojosacarrasco@hotmail.com

RESUMEN

Dentro de las competencias de formación de los ingenieros metalurgistas, está la habilidad de preparar y evaluar proyectos metalúrgicos que le permitan transitar de un especialista técnico a un profesional integral capaz de diseñar, evaluar y liderar iniciativas productivas, considerando criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales.

En ese contexto, el objetivo del presente trabajo se circunscribe a mostrar los pasos a seguir en la preparación y evaluación de un proyecto metalúrgico, tomando como ejemplo en la pequeña minería, la implementación de una planta de concentración de estaño a partir de minerales complejos sulfurosos en la localidad de Japo, en el departamento de Oruro, Bolivia.

El contenido del presente artículo aborda por tanto, el estudio del mercado para el proyecto, establecimiento del tamaño y localización, desarrollo de los aspectos técnicos o ingeniería del proyecto adecuados para la implementación de la planta de concentración, consideración de los aspectos de organización administrativa, establecimiento de las inversiones y financiamiento