

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Departamento de Engenharia de Minas**  
**Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais**

Arthur Felipe da Silva Ferreira

**OPÇÕES DE MATRIZES ENERGÉTICAS PARA O TRANSPORTE POR  
CAMINHÕES EM MINAS À CÉU ABERTO**

Belo Horizonte

2023

Arthur Felipe da Silva Ferreira

**OPÇÕES DE MATRIZES ENERGÉTICAS PARA O TRANSPORTE POR  
CAMINHÕES EM MINAS À CÉU ABERTO**

Monografia apresentada ao Curso de  
Especialização em Engenharia de Recursos  
Minerais da Universidade Federal de Minas  
Gerais, turma 2021-2022.

Orientador: Profa. Viviane da Silva Borges  
Barbosa

Belo Horizonte  
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS



## ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO ARTHUR FELIPE DA SILVA FERREIRA

Realizou-se, no dia 16 de outubro de 2023, às 15:00 horas, na Sala de Seminários 1010, Bloco de Ligação da Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de artigo intitulado "Opções de matrizes energéticas para o transporte por caminhões em minas à céu aberto", apresentado por ARTHUR FELIPE DA SILVA FERREIRA, número de registro 2021697465, graduado no curso de ENGENHARIA DE MINAS, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS. A Comissão Examinadora foi composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. Viviane da Silva Borges Barbosa - Orientadora, Prof. Dr. Pedro Henrique Alves Campos (Universidade Federal de Minas Gerais) e Prof. Dr. Leonardo Júnior Fernandes Campos (Universidade Federal de Minas Gerais).

A Comissão considerou a defesa do artigo:

Aprovado

Reprovado

Nota: 70,0

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 16 de outubro de 2023.

*Viviane S B Barbosa*  
Profa. Viviane da Silva Borges Barbosa (Doutora)

*Pedro Henrique Alves Campos*  
Prof. Pedro Henrique Alves Campos (Doutor)

*Leonardo Júnior Fernandes Campos*  
Prof. Leonardo Júnior Fernandes Campos (Doutor)

*Pedro Henrique Alves Campos*

*Aurea Domingos*  
Secretaria do Curso de Especialização  
em Engenharia de Recursos Minerais

## **DEDICATÓRIA**

Dedico a minha família e meus professores que me acompanharam nessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

- A professora Viviane da Silva Borges Barbosa, minha orientadora, pelo compartilhamento de seus conhecimentos, sempre de forma gentil e disponível.
- Aos Membros da banca examinadora, Pedro Henrique e Leonardo Júnior, pelo tempo disponibilizado para leitura e avaliação do trabalho.

## EPÍGRAFE

*O vento traz energias renováveis o tempo todo, o vento corrente junto a maresia, uma sensação única de sentir o cosmo vindo do universo, energias trazidas de longe, pelo vento, ele gira o mundo constantemente, sem parar, o vento, o tempo, é ele que decide a velocidade, quando para, quando vai devagar ou rápido. O tempo, o vento a maresia é a unificação perfeita para meditar frontal ao mar, em posição na areia, sozinho, sempre sozinho na mente para escrever sobre teorias vindo não sei de onde, mas, trazidas pelo vento, o tempo.*

Rafael Bernabé

## RESUMO

A eletrificação da frota é uma realidade para a mineração subterrânea e têm sido um tema recorrente para a mineração a céu aberto. Nos últimos anos, têm-se observado projetos pilotos envolvendo caminhões diesel-elétricos, 100% elétricos e sistemas do tipo *trolley assist*. Este artigo traz uma breve revisão sobre as tendências para força motriz de caminhões em minas a céu aberto brasileiras, referindo-se ao conjunto de fontes de energia utilizadas para atender à demanda de produção de transporte, ou seja, fonte necessária para colocar os caminhões em movimento. Os modelos encontrados baseiam-se, majoritadamente, por aqueles movidos a diesel. Também foi possível encontrar modelos híbridos (diesel-elétricos) economicamente competitivos e modelos 100% elétricos ou dependentes de catenárias em fase de testes. De maneira geral, conclui-se que as políticas ambientais pautadas na redução de gases de efeito estufa têm sido as principais propulsoras da substituição da matriz energética, mesmo em cenários que tal substituição não se justifica economicamente.

Palavras-chave: Matriz energética; Equipamentos Elétricos; Diesel; Caminhões; Trolley.

## **ABSTRACT**

Fleet electrification is a reality for underground mining and has been a recurring theme for open-pit mining. In recent years, proof-of-concept projects involving diesel-electric trucks, 100% electric trucks, and trolley assist systems have been observed. This paper provides a brief overview of trends for truck propulsion in Brazilian open-pit mines, referring to the set of energy sources used to meet the transportation production demand, in other words, the necessary source to set the trucks in motion. The models found are mostly based on those powered by diesel. It was also possible to find economically competitive hybrid models (diesel-electric) and 100% electric models or models dependent on suspended trolley lines in the testing phase. This paper reaches the conclusion that environmental policies focused on reducing greenhouse gas emissions have been the main drivers for replacing the energy matrix, even in scenarios where such replacement is not economically justified.

**Keywords:** Energy Matrix; Electric equipment; Diesel; Trucks; Trolley.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: exemplo de caminhão do fabricante Randon Perlini (RDP 470, de 65 t).....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Figura 2: trolley assist.....	19
Figura 3: Diagrama de Siemens para o sistema de carrinho.....	20
Figura 4: Caminhão elétrico de 72 toneladas da fabricante chinesa XCMG em teste no Brasil.....	21

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 O transporte por caminhões a partir do século XX .....	12
2 METODOLOGIA.....	15
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	15
3.1 Caminhões a diesel .....	16
3.2 Caminhões diesel-elétricos.....	17
3.3 <i>Trolley assist</i> .....	18
3.4 Caminhões 100% elétricos.....	21
4 CONCLUSÃO .....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	23

## 1 INTRODUÇÃO

Existem opções quando se considera matrizes energéticas disponíveis para caminhões no setor de mineração, embora nem todas sejam economicamente viáveis ou de fácil implementação. A matriz energética, ou força motriz, refere-se ao conjunto de fontes de energia utilizadas para atender à demanda de produção de transporte, ou seja, fonte necessária para colocar os caminhões em movimento. A busca por fontes alternativas de energias, principalmente por aquelas consideradas renováveis, tem se diversificado no mundo, seja para diminuir a dependência do petróleo, seja para atender políticas de redução de gases de efeito estufa.

A transição para um sistema de transporte menos oneroso caracteriza a busca das empresas de mineração que, secundariamente, buscam reduzir suas emissões a fim de alcançar os créditos de carbono. Em particular, empresas de grande porte tem buscado por energias renováveis, por um possível substituto para o diesel. As oportunidades de redução de emissões podem ser agrupadas em três conjuntos, a saber: (i) alteração da fonte energética utilizada, (ii) otimização energética e (iii) uso de novas tecnologias.

A alteração de fonte energética utilizada envolve, principalmente, a substituição de combustíveis não renováveis por combustíveis renováveis ou não renováveis menos carbono-intensivos. A transição da fonte de energia utilizada no setor energético está centrada na substituição do diesel por alternativas consideradas mais sustentáveis. Os combustíveis derivados do petróleo são amplamente utilizados para geração de energia, porém, sua queima libera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera, o que contribui para o aumento do efeito estufa. Para reduzir essa emissão de carbono, é essencial buscar opções menos dependentes dos combustíveis fósseis. A alteração de fonte energética é um processo complexo que envolve investimentos milionários por parte da iniciativa privada e incentivos governamentais. A substituição parcial ou total de uma frota de caminhões a diesel por uma frota de caminhões elétricos é um exemplo de alteração da fonte energética utilizada. Apesar de tal alteração não ser comum em minas a céu aberto, ela é uma opção interessante para minas subterrâneas, uma vez que a substituição por equipamentos elétricos reduz consideravelmente os custos de ventilação de mina [1].

A otimização energética refere-se a algum tipo de atualização nos equipamentos ou a uma melhor utilização deles; necessariamente, ela deve corresponder a uma redução no consumo de combustível ou eletricidade. Pode-se citar, por exemplo, o uso de acessórios como

recicladores internos, que possibilitam a captação de parte do CO<sub>2</sub> emitido; logo, há o consumo de combustível fóssil, mas uma menor emissão de CO<sub>2</sub>, se comparado com operações que não utilizam o reciclador. Treinamentos que visam a capacitação de operadores de mina também entram nessa classe, uma vez que o objetivo é otimizar a realização de rotinas – o que implica em redução efetivo de consumo. Medeiros [2] comenta que na Mina do Pico (de propriedade da Vale, em Minas Gerais) existia uma regra interna de desligamento de caminhões parados em fila por mais de 3 minutos para diminuir o consumo de diesel. Logo, ações que visam aproveitar ou evitar o desperdício de combustível, como treinamentos ou atualizações na tecnologia, incluem-se não somente na otimização energética, mas também na otimização de custos das empresas. O diesel consumido por caminhões, segundo Lages *et al.* [3], é a parcela mais significativa do custo de transporte, representando de 41 a 51% dos custos de movimentação de materiais em minas brasileiras. Por ser um componente importante dentro do orçamento, há um interesse genuíno na otimização dessa variável.

Por fim, o uso de novas tecnologias abrange alternativas que substituem os caminhões dedicados para a movimentação de materiais estéreis ou minério por outros modais. Um exemplo desse tipo de abordagem é o sistema *truckless* utilizado pela Vale no Projeto S11D (Pará), que substitui o uso de caminhões por correias transportadoras [4].

## **1.1 O transporte por caminhões a partir do século XX**

A partir do século XX, a indústria da mineração a céu aberto acompanhou o aumento contínuo da capacidade nominal de transporte por caminhões e desenvolvimento tecnológico associado. Até as primeiras décadas do século XX, as atividades de transporte eram comumente realizadas por carrinhos de mão ou pequenos veículos sobre trilhos, movidos por tração humana ou animal. Subsequente ao desenvolvimento e aprimoramento dos motores a combustão e da tecnologia para pneus, os caminhões tornaram-se mais possantes e acessíveis aos mercados consumidores.

O desenvolvimento de caminhões para mineração ao longo dos últimos 100 anos (1900 a 2000) acompanhou as demandas crescentes por commodities, ora representadas por conflitos entre países (como a 2ª Guerra Mundial ou a Guerra Fria), ora representada pela industrialização acelerada dos países asiáticos. Tais demandas impulsionaram o aumento do porte de caminhões, acelerando o ritmo de lavra [5]. Ao considerar o porte dos equipamentos

existentes à época, pode-se afirmar que o que se demandava 1 ano para ser transportado por caminhões em 1920, atualmente pode-se transportar com menos de 1 semana.

Segundo Lages [6], por volta da década de 1920, os caminhões eram fabricados com capacidades que variavam entre 1,5 e 7 toneladas, e operavam principalmente com motores movidos a querosene e gasolina; a partir da década de 30, as aplicações com motores a diesel, agora com dimensões reduzidas, começam a se expandir para equipamentos de mineração [7]. Cerca de uma década depois (meados da década de 40), algumas empresas como Caterpillar, Dart Truck Co. e Terex Trucks, ofereceram ao mercado caminhões com capacidades que variavam entre 18 e 37 toneladas. Desde então, a indústria de mineração passou a contar com fornecedores de caminhões com maiores capacidades para transportar minério ou estéril. A eficiência, flexibilidade e diversidade de fornecedores de caminhões a diesel fizeram com que eles se tornassem o modal de transporte mais usado nas minas a céu aberto em todo o mundo. Em 1998, a Caterpillar lançou o caminhão CAT797 com capacidade superior a 360 toneladas. Esse caminhão foi por cerca de 15 anos o maior caminhão do mundo e, ainda hoje, é amplamente utilizado em operações que movimentam mais de 1 milhão de toneladas por ano. As principais empresas que se destacam na produção de caminhões fora de estrada são basicamente as mesmas que produzem as principais escavadeiras, como: Caterpillar, Komatsu, Liebherr, Belaz, Terex e Hitachi. No Brasil, a única empresa nacional fabricante de caminhões fora de estrada é a Randon Perlini (Figura 1).



Figura 1: exemplo de caminhão do fabricante Randon Perlini (RDP 470, de 65 t)

Fonte: [8].

Desde os anos 1970, os caminhões fora de estrada com motorização híbrida (diesel-elétrica) são utilizados na mineração brasileira. Vale explicar que, a motorização híbrida diesel-elétrica combina um motor a diesel com um sistema de propulsão elétrica, reduzindo o consumo de combustível e as emissões de poluentes. O motor a diesel fornece potência ao veículo e carrega a bateria, enquanto o sistema elétrico auxilia na aceleração e recupera energia durante a desaceleração. Essa tecnologia promove maior eficiência energética e durabilidade nos veículos [9].

Atualmente, a grande dificuldade da implantação do caminhão 100% elétrico nas minas a céu aberto é de ordem técnica: a baixa autonomia das baterias não é capaz de manter o ritmo de lavra proporcionado pelos motores a diesel para veículos de maior porte. Modelos ainda em teste em minas a céu aberto, com baterias de lítio, possuem autonomia de aproximadamente 1 dia [10]. E, em especial no Brasil, a eletrificação de frotas apresenta custos proibitivos para a maioria das empresas. Segundo Mayrink [1], a autonomia de uma bateria do tipo Lítio-Ferro-Fosfato era da ordem de 4 horas para um caminhão de mina subterrânea (LHD) na Macassa Gold Mine (Canadá). Entretanto, na lavra subterrânea, a substituição de frota a diesel por frota elétrica corresponde à redução da demanda de ventilação: os elétricos emitiriam cerca de 20% do calor de um diesel, o que, por si só, justificaria o investimento em equipamentos elétricos [11]. Economicamente, não há incentivo econômico real para a substituição dos motores à diesel por elétricos quando se considera apenas o ritmo de lavra das minas a céu aberto e os investimentos milionários necessários.

Nos últimos anos, projetos relacionados ao transporte de caminhões autônomos, ou seja, sem operador convencional, e a eletrificação dos equipamentos de carregamento ou transporte tem se tornado assuntos recorrentes no setor. Algumas empresas têm buscado inovações desse tipo visando alcançar soluções de menor custo operacional, maior segurança, e alternativas para contornar a falta de mão de obra em países desenvolvidos [12]. Uma das empresas pioneiras que se destacou no ramo dos caminhões autônomos e veículos elétricos foi a Komatsu que, em 2008, iniciou a produção de escavadeiras híbridas e a operação de caminhões autônomos na Austrália, país em que a mão de obra apresenta-se como um dos maiores custos operacionais da lavra [13].

O levantamento realizado por Paraszczak *et al.* [14] menciona operações de caminhões elétricos e híbridos nas minas na Suécia, Canadá, Austrália, Espanha, EUA e Cazaquistão, apresentando diferentes níveis de sucesso. Ressaltam-se, nesse trabalho, apenas quatro

operações que utilizaram com sucesso e em escala operacional caminhões elétricos em ambiente subterrâneo: as minas Coleman-McCreedy (Canadá), Creighton (Canadá) e Stillwater (EUA) que operaram caminhões elétricos do modelo Kiruna; enquanto a mina Kidd Creek (Canadá) que operou caminhão elétrico modelo trolley INCO. Entretanto, pode-se dizer que a partir de meados de 2010, a temática de adoção de frota elétrica em larga escala nas operações à céu aberto voltou a ganhar destaque em publicações, estudos técnicos e corporativos.

## **2 METODOLOGIA**

A metodologia utilizada para a produção deste artigo baseia-se em pesquisas bibliográficas, tratando-se, portanto, de uma revisão de literatura. Os autores buscaram artigos e trabalhos acadêmicos que tratavam sobre questões energéticas envolvendo a força motriz de caminhões, assim como consideraram alguns sites de empresas mineradoras e fornecedores de equipamentos.

A partir da definição do tema “opções de matrizes energéticas para o transporte por caminhões em minas à céu aberto” foram estudados trabalhos produzidos por Universidades (em especial, da Universidade Federal de Minas Gerais e Universidade Federal de Ouro Preto), sites de fornecedores de equipamentos e de empresas de mineração. Para a realização de consultas nos buscadores foram utilizadas palavras-chave, como: caminhões híbridos; caminhão elétrico; caminhão na mineração; matriz energética; força motriz; equipamentos elétricos; caminhões a diesel; *trolley*; e seus respectivos termos em inglês.

A leitura dos 21 trabalhos selecionados e listados nas Referências Bibliográficas aconteceu entre os meses de janeiro e agosto de 2023. Destaca-se que as conclusões, portanto, depreendidas neste artigo estão embasadas nos 21 trabalhos consultados.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A revisão bibliográfica sugeriu que as opções mais comuns para o transporte por caminhões nas minas a céu aberto são os caminhões movidos a diesel ou híbridos (diesel-elétricos); e, mais recentemente, modelos dependentes de fontes elétricas, como o sistema *trolley assist* e os caminhões 100% elétricos.

### 3.1 Caminhões a diesel

Os caminhões a diesel são amplamente utilizados na indústria de transporte devido à sua eficiência energética que resulta em um menor custo operacional. O diesel é o combustível predominante no mercado, ainda que a tecnologia disponível para caminhões elétricos esteja bem avançada. Os motores a diesel são conhecidos por sua alta eficiência térmica, convertendo uma maior quantidade de energia do combustível em trabalho mecânico, o que reduz os custos de operação.

Além disso, os caminhões a diesel oferecem potência significativa para transportar cargas pesadas e operar em terrenos desafiadores, como é o caso das mineradoras. Os motores a diesel são conhecidos por seu alto torque, proporcionando uma capacidade de tração robusta e permitindo que os caminhões enfrentem subidas íngremes, terrenos acidentados e condições de estrada adversas.

No mercado de caminhões a diesel, há uma variedade de fornecedores, especialmente no setor rodoviário. Marcas como Mercedes-Benz, Volvo, Scania, IVECO, Volkswagen e fabricantes chineses têm uma presença significativa na indústria de caminhões. Esses fornecedores oferecem uma ampla gama de modelos e configurações para atender às necessidades específicas dos clientes, desde caminhões leves para entregas urbanas até veículos pesados de longa distância.

No Brasil, as grandes mineradoras utilizam caminhões a diesel como principal meio de transporte. Os caminhões a diesel no ambiente de mineração, conhecidos como fora de estrada (ou *off road*) destoam-se dos rodoviários. As diferenças entre um caminhão comum e um caminhão fora de estrada vão além das características físicas como as dimensões exageradas. Essas diferenças são notáveis também ao se examinar o conjunto mecânico, em especial, o trem de força.

Os caminhões fora de estrada são assim denominados porque, comumente, apresentam uma distribuição de massa por eixo superior àquelas permitidas no transporte rodoviário; e por não poderem transitar nas vias comuns, seja pela sua dimensão não-compatível com as estradas, seja pela maior massa distribuída em cada eixo, são exclusivos para aplicações “fora de estrada”, como é o caso das minas. Tais equipamentos são amplamente utilizados para a movimentação de grandes quantidades de materiais, podendo transportar até 450 t por batelada



[15]. De maneira geral, o aumento do porte dos equipamentos de transporte diminui o custo da tonelada transportada, seja ela de minério ou estéril. Na indústria da mineração, espera-se que “quanto maior for o caminhão, menor será o custo da tonelada transportada” – e, atualmente, apenas os grandes caminhões movidos a diesel atendem à essa expectativa econômica.

Segundo Ricardo e Catalani [16], os caminhões fora de estrada são equipamentos famosos pela sua grande capacidade, força e tamanho que fogem do comum, não sendo possível a sua utilização nas rodovias ou em ruas de nosso cotidiano, e que possuem características mecânicas de fabricação especiais para o trabalho pesado.

As mineradoras de pequeno porte que utilizam caminhões rodoviários reforçados e desejam incorporar caminhões fora de estrada em sua frota, devem antes fazer adaptações nos acessos de mina. As pistas, em geral, passam por maior manutenção e apresentam curvas de menor curvatura, para que o caminhão fora de estrada seja operado de maneira segura e eficiente. O investimento em uma frota de caminhões fora de estrada apenas é justificável se também houver investimentos para a manutenção de acessos.

Considerando as mineradoras do Brasil, a utilização do caminhão a diesel é comum devido aos custos operacionais e à diversidade de fornecedores no mercado. Pode-se correlacionar a implantação do caminhão a diesel a um custo menos oneroso para as mineradoras.

### **3.2 Caminhões diesel-elétricos**

O uso de caminhões híbridos na frota, que utilizam o diesel e a eletricidade para dar partida no motor, permite a redução do consumo de combustível justamente por utilizar eletricidade em alguns momentos específicos e por acumular energia nos momentos em que o caminhão está em declive. No entanto, o investimento necessário para essa iniciativa é considerado significativamente maior que o necessário para o uso de um caminhão normal, podendo até acarretar o dobro do investimento.

É válido esclarecer que um motor diesel-elétrico é um sistema de propulsão que combina um motor diesel e um gerador elétrico para mover um equipamento. O motor diesel é responsável por acionar o gerador, que por sua vez produz eletricidade para alimentar os motores elétricos que movem o equipamento. Deve-se ressaltar que o diesel é crucial na partida do equipamento devido às características do motor diesel. Os motores diesel possuem alta

compressão, o que permite a ignição do combustível sem a necessidade de uma vela de ignição. Isso os torna mais adequados para aplicações de partida confiável e rápida em comparação com outros combustíveis, como a gasolina. Além disso, o diesel tem alta densidade energética, o que significa que uma quantidade relativamente pequena de combustível pode produzir uma grande quantidade de energia, tornando-o eficiente para a partida e operação de equipamentos pesados.

A empresa Caterpillar desenvolveu um caminhão fora de estrada diesel-elétrico de 320 toneladas. Os caminhões diesel-elétricos são reconhecidos pela robustez e simplicidade de manutenção, refletindo em uma maior disponibilidade física. As empresas que optam por esse tipo de fora de estrada, o escolhem pelo fato de apresentar um custo por tonelada competitivo e uma produtividade maior se comparado com os mesmos modelos a diesel [9].

A Caterpillar, visando aumentar seu portfólio de veículos diesel-elétricos, apresentou ao mercado dois novos modelos, o 796 AC e o 798 AC. Os dois caminhões têm novos motores de acionamento elétrico. O modelo 798 AC tem capacidade de carga de 372 toneladas e peso bruto total de 410 toneladas. Já o 796 AC tem capacidade de carga de 326 toneladas e peso bruto total de 360 toneladas. Esses modelos são ofertados como solução para atender as normas de emissões mais rígidas para mineração de vários países do mundo.

### **3.3 *Trolley assist***

O *trolley assist* é um sistema no qual caminhões de transporte em minas a céu aberto são movidos por energia elétrica ao longo de um segmento de estrada de transporte designado. Isso pode levar a grandes economias nos custos de combustível, produtividade, redução na emissão de CO<sub>2</sub> e vida útil do motor, mas está associado à existência de um acesso permanente ou de longa duração. Para a adoção do *trolley assist* há requisitos mínimos ligados ao planejamento de lavra.

Os avanços na tecnologia de caminhões de transporte elétricos nos últimos 20 anos foram notáveis. Os sistemas de acionamento desses caminhões consistem em dois motores elétricos integrados por engrenagens nas rodas traseiras dos caminhões, um gerador elétrico e um potente motor a diesel. As características do sistema de acionamento permitem que ele aproveite a energia elétrica diretamente. Em algumas partes do mundo, a energia elétrica pode ser gerada de forma barata e com menos emissões, dependendo da fonte de combustível. Os

sistemas de carrinhos de caminhões, que simplesmente substituem o diesel por eletricidade, podem oferecer outro caminho para avanços adicionais. Em vez de gerar eletricidade a partir do motor a diesel e do gerador elétrico do caminhão, ela é proveniente de uma subestação dedicada e transmitida por meio de uma catenária suspensa para os motores de acionamento do caminhão. A Figura 2 mostra o *trolley assist* implantado na mineradora Copper Mountain, em British Columbia.



Figura 1: trolley assist.

Fonte: [17].

O transporte de caminhões com auxílio de *trolley* é um sistema de transporte que utiliza caminhões de transporte diesel-elétricos e, em seguida, direciona a energia elétrica baseada na rede diretamente para o caminhão por meio de uma catenária suspensa ou “linha de bonde” da mesma forma que um bonde urbano. O sistema de carrinho de caminhão é mais econômico nas rampas, onde é necessária mais energia. Conforme ilustrado na Figura 3, o sistema de carrinho de caminhão tem os maiores benefícios ao subir uma rampa de 6 a 10 graus. O restante da rota de transporte, ou seja, áreas planas e rampas de declive, o caminhão é movido por um motor a diesel convencional. É benéfico colocar linhas de *trolley* em subidas e descidas para recuperar a energia de frenagem. Algumas minas estão considerando a assistência de *trolley* para transportes planos apenas para reduzir o consumo de diesel, prolongando a vida útil dos motores.

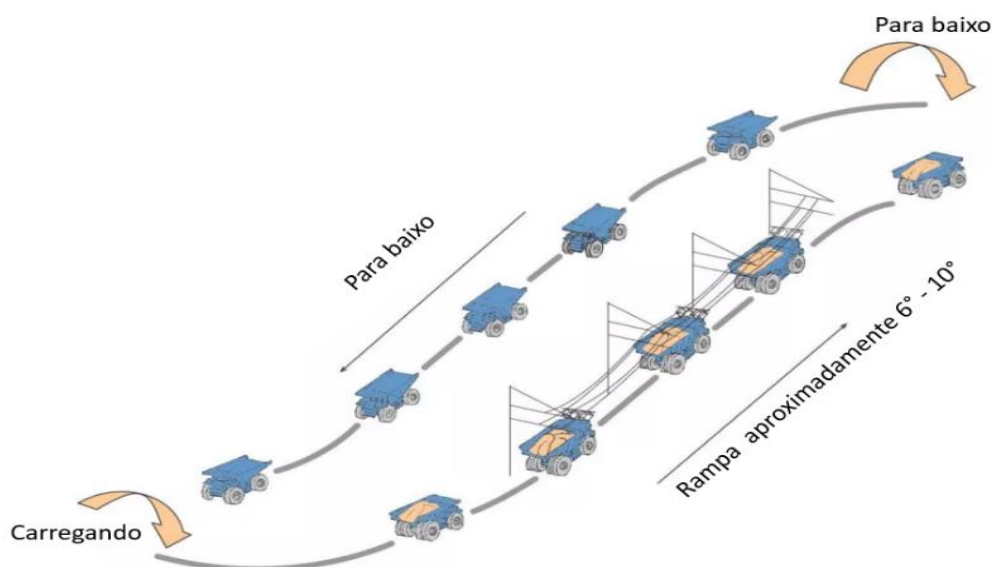


Figura 2: Diagrama de Siemens para o sistema de carrinho.

Fonte: [18].

Em vez de fornecer energia ao caminhão a partir do motor a diesel, a energia é extraída de linhas aéreas de bondes. As linhas aéreas são conectadas diretamente ao link DC. Na velocidade máxima do motor, a taxa de combustível é de 450 l/h; mas, com a assistência do carrinho, o motor fica em marcha lenta e a taxa de combustível cai para 40 l/h. Essa redução leva a uma economia considerável de combustível e é um passo significativo para que as minas se tornem mais eficientes para obter créditos de carbono. Os sistemas de *trolley* são vantajosos para minas onde há uma grande diferença entre os custos de diesel e eletricidade. Se houver um consórcio ou um contrato de fornecimento exclusivo de energia, as minas podem optar pelo esquema de “caminhões em carrinhos”, sendo a energia elétrica mais barata que o consumo de diesel.

A mineradora Copper Mountain, perto de Princeton, British Columbia, incrementou em sua operação o sistema de *trolley assist*. A mineradora tem como estrutura uma operação convencional a céu aberto, com caminhão e escavadeira, que produz aproximadamente 45.000 toneladas de cobre equivalente por ano. A empresa comissionou seu projeto de assistência ao carrinho com a ajuda da Komatsu, SMS, ABB, BC Hydro e CleanBC, sendo o primeiro de seu tipo na América do Norte e um elemento-chave da meta da Copper Mountain de alcançar zero emissões líquidas de Gases de Efeito Estufa até 2035. Trata-se, portanto, de quatro caminhões Komatsu 830E-5 de capacidade nominal igual a 227 t em esquema de carrinhos, para transporte

de minério em uma rampa de 1 km da cava principal ao seu britador primário. Desde o comissionamento do projeto, a empresa alterou seu plano de converter os 4 para 7 caminhões em esquema de carrinhos; e, atualmente, há um total de 11 caminhões disponíveis para usar o *trolley assist* na seção planejada.

O *trolley assist* já foi testado no Brasil pela empresa Vale. Os testes tiveram início em agosto de 2022 nas operações de ferro no estado do Pará, entretanto, os resultados não foram amplamente divulgados. Sabe-se, apenas, que o sistema não foi implantado [19].

### 3.4 Caminhões 100% elétricos

Seguindo a tendência de eletrificação do setor de mineração, várias empresas como Cartepillar, Scania e XCMG Mining Machinery vem divulgando modelos elétricos. A empresa XCMG apresentou equipamentos movidos à bateria de lítio, como o caminhão fora de estrada 100% elétrico que está sendo lançado no mercado brasileiro (Figura 4). Segundo a Vale (2022), o caminhão 100% elétrico, além de não gerar CO<sub>2</sub>, não precisa de parar para recarregar, reduz o uso de freio mecânico, manutenção e vibração, além de proporcionar mais conforto operacional ao motorista.



Figura 3: Caminhão elétrico de 72 toneladas da fabricante chinesa XCMG em teste no Brasil.

Fonte: [10].

Os testes com o caminhão elétrico de 72 toneladas da fabricante XCMGA aconteceram nas minas de Água Limpa, em Minas Gerais, e de Sorowako, na Indonésia. Uma das estratégias da Vale na eletrificação é a inclusão de uma parceria com seus pares BHP e Rio Tinto, sendo que as três empresas juntamente com outros mineradores, lançaram o *Charge On Innovation Challenge* [20], um desafio global de inovação aberta, tendo como objetivo a busca de soluções inovadoras para acelerar o carregamento seguro das baterias para os futuros caminhões elétricos.

Outro desenvolvimento de protótipo do caminhão elétrico de mineração pela Cartepillar foi concluído com o apoio dos principais clientes de mineração que participam do programa *Early Learner*, que inclui diversos acordos estabelecidos de eletrificação entre a Caterpillar e as companhias BHP, Freeport-McMoRan, Newmont Corporation, Rio Tinto e Teck Resources [21].

Outra empresa a realizar a implantação de caminhões elétricos em sua operação foi a CSN Mineração, localizada em Congonhas (Mina Casa de Pedra): a mineradora começou a testar dois caminhões elétricos da SANY de 60 t. Os veículos estão sendo testados na remoção de estéreis; o teste-piloto observará a autonomia da bateria, a redução de emissão de poluentes, se há maior disponibilidade física dos equipamentos e, portanto, se a aplicação dos mesmo implica em menores custos de operação e manutenção se comparados aos convencionais.

#### 4 CONCLUSÃO

Aplicação de equipamentos híbridos e elétricos nas operações de mineração já se apresenta como uma realidade em alguns países, como Estados Unidos, Canadá e Suécia. No Brasil, os caminhões híbridos apresentam-se como uma alternativa economicamente viável para empresas de grande porte, enquanto os elétricos ainda estão restritos a poucos projetos-piloto localizados em minas a céu aberto. O alto risco de investimento inerente ao setor mineral, a pressão por resultados financeiros, a falta de modelos acessíveis no mercado e a redução no ritmo de lavra são os principais entraves para a aplicação imediata de caminhões elétricos nas minas a céu aberto.

A utilização dos *trolleys* têm-se mostrado promissora em projetos estrangeiros, mas não foi encontrado um exemplo de aplicação efetiva no Brasil. O diesel utilizado pelos caminhões é um dos principais custos da operação, logo, o sistema de carrinhos é uma possibilidade

econômica real de redução desses gastos e, conseqüentemente, de obtenção de créditos de carbono.

A tendência é que com o avanço da tecnologia e com a crescente diversificação da matriz energética na mineração, equipamentos parcial ou totalmente elétricos comecem a ser utilizados com maior frequência; principalmente, quando seus custos de aquisição começarem a diminuir. As políticas ambientais pautadas na redução de gases de efeito estufa têm sido as principais propulsoras da substituição da matriz energética, mesmo em cenários que tal substituição não se justifica economicamente.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] Mayrink, AGS. Avaliação do impacto na demanda de ventilação em mina subterrânea com a adoção de frota elétrica. [trabalho de conclusão de curso de graduação]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2019.

[2] Medeiros, AB. Solução de problemas operacionais em mineração: um estudo de caso. [trabalho de conclusão de curso de graduação]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2013.

[3] Lages AR, Barbosa VSB, Campos PHA, Barbosa RC, Silva GR, Casagrande PB, Magalhães LF. Distribution of the main operational costs due to the size of the loading and haulage fleet: Brazilian reality. In: Proceedings of the 28th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2019. Switzerland: Springer Nature; 2020. p. 304-311.

[4] Mendonça EO, Pinheiro KA, Mesquita AL. Sistema truckless e dimensionamento de transportadores de correia. In: Universidade Federal Rural da Amazônia. Anais do 2º Congresso Amazônico de Meio Ambiente & Energias Renováveis; 2016; Belém, Brasil. Belém: UFRA; 2016. 10 p.

[5] Furtado J, Urias E. Recursos naturais e desenvolvimento: estudos sobre o potencial dinamizador da mineração na economia brasileira. São Paulo: IBRAM; 2013.

[6] Lages AR. Estudo preliminar da influência do porte de veículos de carregamento e transporte nos custos operacionais de minas a céu aberto. [trabalho de conclusão de curso de graduação]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2018.

[7] Stinnette JD. Establishing total airflow requirements for underground metal/nonmetal mines based on the diesel equipment fleet. [thesis]. Kingston: Queen's University; 2013.

[8] Moreira ALM, Campos BIS, Cruz LRV, Maia LMP, Fonseca SRO. Sistemas de carga e transporte: Mineração Usiminas S/A. [apresentação realizada para a disciplina “EMN037 Operações II - Carregamento e Transporte” do curso de graduação em Engenharia de Minas da UFMG]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2018. Documento de acesso restrito.

[9] Santos ACFR. Análise da viabilidade técnica e econômica de um veículo elétrico versus veículo a combustão. [especialização]. Santana do Livramento: Universidade Federal de Santa Maria; 2017.

[10] Vale [página da internet]. Vale é a primeira mineradora, entre as grandes do setor, a testar caminhões de 72 toneladas 100% elétricos. [atualizada em 18 ago. 2022; acesso em 02 ago. 2023]. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/w/vale-is-the-first-mining-company-to-test-100-electric-72-ton-trucks>

[11] Costa, LV. Análise das opções de vias de produção e acesso em minas subterrâneas. [mestrado]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2015.

[12] Bellamy D, Pravica L. Assessing the impact of driverless haul trucks in Australian surface mining. Resources Policy. 2011; 36(2): 149-158.

[13] Barbosa VSB. Análise de cobertura e capacidade da comunicação móvel para automação em minas inteligentes a céu aberto. [mestrado]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2017.

[14] Paraszczak J, Svedlund E, Fytas K, Laflamme M. Electrification of loaders and trucks—a step towards more sustainable underground mining. Renewable Energy and Power Quality Journal. 2014; 12(12): 81-86.

[15] Revista Caminhoneiro [página da internet]. Belaz 75710: conheça o maior caminhão do mundo. [atualizada em 09 mai. 2022; acesso em 1º ago. 2023]. Disponível em: <https://www.revistacaminhoneiro.com.br/post/belaz-75710-conheca-o-maior-caminhao-do-mundo>

[16] Ricardo HS, Catalani G. Manual prático de escavação: terraplanagem e escavação de rocha. 3 ed. São Paulo: Pini; 2007.

[17] Internacional Mining [página da internet]. Vale’s huge Carajas iron ore mining complex set to start commissioning Brazil’s first trolley assist line in 2023. [atualizada em 09 jun. 2022; acesso em 24 ago. 2023]. Disponível em: <https://im-mining.com/2022/06/09/vales-huge->



[carajas-iron-ore-mining-complex-set-to-start-commissioning-brazils-first-trolley-assist-line-in-2023/](#)

[18] Global Road Technology [página da internet]. An introduction to trolley-assist haulage systems. [atualizada em 2022; acesso em 02 ago. 2023]. Disponível em: <https://globalroadtechnology.com/trolley-assist-haulage-systems/>

[19] Internacional Mining [página da internet]. Vale's huge Carajas iron ore mining complex set to start commissioning Brazil's first trolley assist line in 2023. [atualizada em 09 jun. 2022; acesso em 24 ago. 2023]. Disponível em: <https://im-mining.com/2022/06/09/vales-huge-carajas-iron-ore-mining-complex-set-to-start-commissioning-brazils-first-trolley-assist-line-in-2023/>

[20] Revista Mineração e Sustentabilidade [página da internet]. Vale testa caminhões de 72 toneladas 100% elétricos no Brasil e na Indonésia. [atualizada em 18 ago. 2022; acesso em 12 mar. 2023]. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br/2022/08/18/vale-testa-caminhoes-de-72-toneladas-100-eletricos-no-brasil-e-na-indonesia/>

[21] Petronotícias [página da internet]. Caterpillar aprova seu primeiro caminhão de mineração elétrico com bateria de grande porte. [atualizada em 27 nov. 2022; acesso em 12 mar. 2023] Disponível em: <https://petronoticias.com.br/caterpillar-aprova-seu-primeiro-caminhao-de-mineracao-eletrico-com-bateria-de-grande-porte/>