



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



GIOVANA MARA DOS SANTOS LANA

**ANÁLISE TÉCNICO, ECONÔMICA E AMBIENTAL DA TRANSIÇÃO DE
FROTAS DE CAMINHÕES A DIESEL PARA ELÉTRICOS EM ATIVIDADES
DE MINERAÇÃO**

OURO PRETO - MG
2026

Giovana Mara dos Santos Lana

**ANÁLISE TÉCNICO, ECONÔMICA E AMBIENTAL DA TRANSIÇÃO DE
FROTAS DE CAMINHÕES A DIESEL PARA ELÉTRICOS EM ATIVIDADES
DE MINERAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Ouro Preto como
requisito parcial para a obtenção do título de
Engenheiro de Produção.

Dr. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura

**OURO PRETO – MG
2026**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,
ADMINISTRAÇÃO E ECON



FOLHA DE APROVAÇÃO

Giovana Mara dos Santos Lana

ANÁLISE TÉCNICO, ECONÔMICA E AMBIENTAL DA TRANSIÇÃO DE FROTAS DE CAMINHÕES A DIESEL PARA ELÉTRICOS EM ATIVIDADES DE MINERAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de produção

Aprovada em 29 de Julho de 2026

Membros da banca

D.Sc. - Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc. - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc. - Vanessa Criscuolo Parreiras de Oliveira - Universidade Federal de Ouro Preto

Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/08/2026



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/08/2026, às 18:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1173802** e o código CRC **22881AF7**.

Porque D'ele, por meio D'ele e para Ele
são todas as coisas.

RESUMO

As atividades de mineração contribuem significativamente para as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo o carregamento e transporte de minério os principais responsáveis por essas emissões no setor. Diante da necessidade de descarbonização estabelecida por acordos internacionais e metas corporativas, este trabalho teve como objetivo elaborar cenários de transição para a frota de caminhões fora de estrada de uma empresa de mineração, avaliando os impactos técnicos, econômicos e ambientais da eletrificação. A pesquisa, de natureza aplicada e abordagem mista, foi conduzida por meio de um estudo de caso estruturado a partir do Planejamento Energético Integrado (PEI), utilizando o software HOMER Pro para a modelagem técnico-econômica e simulação de três cenários: um Cenário de Referência (operação a diesel) e dois cenários alternativos de eletrificação (gradual e forte), combinados com geração fotovoltaica. Os resultados mostraram que a eletrificação da frota, associada à geração fotovoltaica, proporciona redução expressiva nos custos operacionais e nas emissões de CO₂ em relação à operação tradicional a diesel. O Cenário Alternativo Forte apresentou os melhores resultados ambientais, com redução no custo operacional, menor *payback* do sistema fotovoltaico e redução nas emissões de CO₂, sendo indicado como cenário-meta para a estratégia de longo prazo. Já o Cenário Alternativo Gradual mostrou-se o caminho mais acessível para iniciar a transição, com ganhos imediatos em custos e emissões. Conclui-se que a eletrificação da frota, quando implementada de forma progressiva e associada a fontes renováveis, é capaz de reduzir significativamente as emissões e os custos operacionais, contribuindo para a conciliação entre produtividade minerária e metas de descarbonização.

Palavras chaves: Eletrificação de frotas. Planejamento Energético Integrado. Descarbonização. Mineração. HOMER Pro.

ABSTRACT

Mining activities contribute significantly to Greenhouse Gas (GHG) emissions, with the loading and transportation of ore being the main responsible for these emissions in the sector. In view of the need for decarbonization established by international agreements and corporate goals, this work aimed to develop transition scenarios for the off-highway truck fleet of a mining company, evaluating the technical, economic and environmental impacts of electrification. The research, of an applied nature and mixed approach, was conducted through a structured case study from the Integrated Energy Planning (IEP), using the HOMER Pro software for the technical-economic modeling and simulation of three scenarios: a Reference Scenario (diesel operation) and two alternative electrification scenarios (gradual and strong), combined with photovoltaic generation. The results showed that the electrification of the fleet, associated with photovoltaic generation, provides a significant reduction in operating costs and CO₂ emissions compared to the traditional diesel operation. The Strong Alternative Scenario presented the best environmental results, with a reduction in operating costs, lower payback of the photovoltaic system and a reduction in CO₂ emissions, being indicated as a target scenario for the long-term strategy. The Gradual Alternative Scenario, on the other hand, proved to be the most accessible way to start the transition, with immediate gains in costs and emissions. It is concluded that the electrification of the fleet, when implemented progressively and associated with renewable sources, is capable of significantly reducing emissions and operating costs, contributing to the reconciliation between mining productivity and decarbonization goals.

Keywords: Fleet electrification. Integrated Energy Planning. Decarbonization. Mining. HOMER Pro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quadrilátero Ferrífero	15
Figura 2 - "Pit" Final de uma Cava	16
Figura 3 - Fluxograma do Processo Produtivo de uma Mineradora.....	18
Figura 4 - Matriz Energética Brasileira	19
Figura 5 - Processos e Fontes de Energia Utilizadas.....	20
Figura 6 - Matriz energética do setor de mineração e pelletização no Brasil.....	20
Figura 7 - Principais Mineradoras Consumidoras de Energia no Mundo	21
Figura 8 - Licenciamento Anual de Novos Caminhões Elétricos e a Gás Natural no Brasil.....	26
Figura 9 - Caminhão Fora de estrada - SANY SKTe-110T	30
Figura 10 – Carregador convencional para caminhões elétricos	31
Figura 11 – Configuração para simulação dos cenários	31
Figura 12 - Caminhão fora de estrada CAT 775G	32
Figura 13 - Curva de Carga: Cenário Gradual.....	34
Figura 14 – Configuração do Perfil de Carga Elétrica HOMER Pro	36
Figura 15 – Resultados Econômicos a partir da Simulação	37
Figura 16 - Curva de Carga: Cenário Alternativo Forte.....	38
Figura 17 - Resultados Econômicos a partir da Simulação do Cenário Forte.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados Sobre a Frota de Caminhões.....	28
Tabela 2 - Cenário de Referência	33
Tabela 3 - Comparativo de custos de aquisição: diesel x elétrico	33
Tabela 4 - Equivalência energética: custo por km.....	34
Tabela 5 – Informações sobre o Sistema Fotovoltaico para o Cenário de Transição Gradual	36
Tabela 6 - Informações sobre o sistema fotovoltaico para o Cenário Alternativo Forte.....	39
Tabela 7 – Comparação entre os Cenários	41
Tabela 8 - <i>Payback</i> real dos cenários de eletrificação.....	43

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	Objetivo Geral	9
1.2	Objetivos Específicos	9
1.3	Justificativa	10
1.4	Estrutura do Trabalho	11
2.	METODOLOGIA.....	11
2.1	Planejamento Energético Integrado	11
2.2	Modelagem Técnico-Econômica do HOMER Pro	12
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Setor de Mineração no Brasil	14
3.2	Demanda Energética	17
3.3	Transição Energética do Setor de Mineração do Brasil.....	22
3.4	Estratégias de Descarbonização.....	23
4.	ESTUDO DE CASO	28
4.1	Mineradora em Nova Lima.....	28
4.2	Premissas para execução da Simulação	29
4.3	Cenários Simulados	32
4.3.1	Cenário de Referência.....	32
4.3.2	Cenário Alternativo Gradual.....	34
4.3.3	Cenário Alternativo Forte	38
4.4	Comparação entre os Cenários	40
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

O aumento da emissão de gases poluentes tem gerado alerta devido às graves consequências para o planeta. A emissão de dióxido de carbono na atmosfera é responsável por cerca de 66% do efeito estufa, sendo proveniente da queima de combustíveis fósseis. As emissões de dióxido de carbono (CO₂) são consideradas uma das principais causas do aquecimento global, que atualmente atinge a marca de 1,5 °C (WMO, 2024). Diante deste cenário, surge a necessidade de se estabelecer medidas para a mitigação dessas emissões, em 2015, ocorreu o Acordo de Paris, e a partir disto países iniciaram a implementação de metas para a eliminação gradual e a produção controlada de combustíveis fósseis.

A UNFCCC faz uma solicitação para que os países “façam a transição para longe dos combustíveis fósseis nos sistemas energéticos, de forma justa, ordenada e equitativa” (UNFCCC, 2023). Logo, para cumprir tais compromissos, é necessário que os governos implementem políticas de mitigação para a descarbonização. Foram acordados entre os países alguns compromissos; entre eles, limitar o aquecimento global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, conforme determinado no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015). Consequentemente, muitos países estabeleceram a meta de alcançar a neutralidade de carbono (emissões líquidas zero) até 2050, conforme recomenda o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2018).

As atividades de mineração contribuem significativamente para as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Estima-se que o setor gere entre 1,9 e 5,1 gigatoneladas de CO₂ anualmente (DELEVINGNE et al., 2020). Além disso, o carregamento e o transporte são apontados como os principais responsáveis pelas emissões totais de GEE na mineração e no processamento de minério de ferro (NORGATE; HAQUE, 2010). Diante disso, o setor mineral tem buscado soluções mais sustentáveis; a mineradora BHP, por exemplo, assumiu o compromisso de reduzir em pelo menos 30% suas emissões operacionais (BHP, 2025). A Vale, maior mineradora do país, também estabeleceu estratégias de descarbonização: reduzir em 33% as emissões absolutas de Escopos 1 e 2 até 2030 que compreendem emissões diretas de fontes próprias e indiretas provenientes do consumo de energia e reduzir em 15% as emissões líquidas de Escopo 3 até 2035, relacionadas às emissões indiretas (VALE, 2025).

Nesse cenário, o Planejamento Energético Integrado (PEI) surge como uma ferramenta essencial para estudar o impacto da implantação de novas fontes de energia. O PEI propõe cenários alternativos que visam à substituição de caminhões fora de estrada movidos a diesel por modelos elétricos, além de avaliar opções de suprimento sustentável para a recarga desses veículos, mantendo a eficiência operacional. Como citam Moeen et al. (2025), o planejamento e as estratégias climáticas exigem uma abordagem integrada para a implementação de medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

1.1 Objetivo Geral

Elaborar cenários de transição para a frota de caminhões de uma empresa de mineração, focado em veículos fora de estrada, analisando impactos técnicos, econômicos e ambientais envolvidos no processo de transição energética.

1.2 Objetivos Específicos

- Coletar dados de consumo energético na atividade minerária;
- Coletar dados de consumo de combustíveis fósseis por caminhões fora de estrada;
- Apresentar conceitos de modelagem energética e planejamento energético integrado;
- Estudar características técnicas de caminhões fora de estrada elétricos;
- Estudar estratégias para redução de emissão de CO₂ na atmosfera por atividades de carga e transporte;
- Simular cenários de PEI, através do modelo HOMER Pro para substituição de caminhões a diesel por elétricos;
- Estimar a redução potencial das emissões de CO₂;
- Analisar os resultados dos cenários apresentados, considerando os aspectos técnicos e econômicos;
- Discutir sobre os cenários apresentados e identificar a melhor solução, considerando o cenário atual.

1.3 Justificativa

Existe uma urgência em desenvolver estratégias que compatibilizem a atividade minerária com as metas globais de descarbonização. Se, por um lado, o setor responde por 47% do saldo comercial nacional (IBRAM, 2024), por outro, enfrenta crescentes pressões para a redução de emissões e uma maior eficiência energética. O Brasil, como um dos signatários do Acordo de Paris, comprometeu-se a reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025 (BRASIL, 2015).

A partir de então, o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) criou diretrizes para que o setor se adapte aos impactos gerados pelas mudanças climáticas, aderindo às metas estabelecidas. Segundo o instituto, cerca de 62% das emissões de GEE do setor estão relacionadas à combustão móvel, o que representa 1.502.616,99 toneladas de CO₂e (IBRAM, 2024). Por esse motivo, torna-se fundamental estudar alternativas que forneçam uma contribuição efetiva para a descarbonização do setor mineral. Nesse sentido, eletrificar as frotas de caminhões fora de estrada configura-se como uma estratégia essencial para mitigar as emissões diretas.

Por outro lado, adotar uma nova tecnologia envolve mudanças além da substituição e do impacto energético. Toda a lógica operacional é afetada, sendo necessário um bom embasamento técnico. A simulação de diferentes cenários permite que todas as esferas sejam avaliadas antecipadamente: os efeitos da transição sobre o consumo de energia, a demanda elétrica, os custos operacionais e investimentos necessários para essa substituição. O PEI surge como um importante aliado para a tomada de decisões estratégicas para as mineradoras.

Além disso, sabe-se que novas tecnologias como os caminhões elétricos, apresentam custos elevados para aquisição comparados aos modelos à diesel, no entanto é esperado que os custos de operação sejam reduzidos. Por isso, é necessário realizar análises econômicas. O modelo HOMER Pro disponibiliza indicadores fundamentais para essas análises, como o *NPC (Net Present Cost)*, custos de operação e o *payback*.

1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1 foi apresentada a introdução deste trabalho, no Capítulo 2 a metodologia adotada com a utilização do HOMER Pro, no Capítulo 3 a revisão bibliográfica como fundamentação do estudo. O Capítulo 4 trata sobre o estudo de caso, apresentando as simulações e resultados do estudo. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações do presente trabalho.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho foi classificado conforme sua natureza, objetivos e procedimentos técnicos. A pesquisa enquadra-se como aplicada, abrangendo as vertentes descritiva e exploratória. Adota uma abordagem mista: a vertente quantitativa compreende o levantamento de dados operacionais da frota de caminhões a diesel em uma mineradora, bem como os parâmetros técnicos dos caminhões elétricos; já a vertente qualitativa reside na análise dos aspectos técnicos e econômicos envolvidos na substituição desses veículos.

O trabalho é constituído por um estudo de caso voltado à elaboração de um Planejamento Energético Integrado (PEI). O modelo permite a análise de cenários a partir dos dados de consumo coletados, visando orientar a tomada de decisão e verificar a viabilidade econômica da implementação da tecnologia de caminhões elétricos.

2.1 Planejamento Energético Integrado

O PEI emprega metodologias estruturadas e participativas que permitem analisar cenários, definir metas de longo prazo e formular políticas que integram diferentes subsetores energéticos e objetivos de desenvolvimento sustentável. Além disso, Bajay (1990) cita que:

“O planejamento energético objetiva, para um dado sistema energético, promover uma utilização racional das diversas formas energéticas e otimizar o suprimento dessas formas, dentro das políticas econômicas, social e ambiental vigentes, e em sintonia com a realidade dos outros sistemas energéticos que interagem com o sistema em questão.”

Para obter resultados satisfatórios, é necessário cumprir alguns passos para realizar o Planejamento Energético, como a coleta de dados, consolidação e análise de dados, análise de funcionamento, ficha técnica do caminhão elétrico e construir uma curva de carga para a frota.

- Coleta de dados: Compreende a coleta de informações como a quantidade de caminhões, o consumo de diesel, preço por litro de diesel e horas trabalhadas;
- Consolidação e análise dos dados coletados: Compreende a consolidação dos dados como realizar o cálculo de consumo mensal, o custo mensal de diesel e análise desses dados;
- Coletar informações sobre o caminhão elétrico a ser utilizado na simulação e construir uma curva de carga compatível com as horas de trabalho na mina;
- Inserir todas as informações coletadas pertinentes no modelo de análise HOMER Pro que será melhor explicado a seguir.

2.2 Modelagem Técnico-Econômica do HOMER Pro

O *software* HOMER Pro foi utilizado para realizar a modelagem técnico-econômica e a análise dos cenários avaliados neste estudo. O nome HOMER é a abreviação de *Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*, que é traduzido como Otimização Híbrida de Múltiplos Recursos Energéticos. A ferramenta é utilizada amplamente para a análise e o dimensionamento de sistemas energéticos, navegando nas complexidades de construir sistemas híbridos de microrredes e sistemas conectados à rede que sejam econômicos e confiáveis, combinando geração de energia tradicional e renovável, armazenamento e gerenciamento de carga.

O HOMER Pro torna possível realizar simulações e comparações de diferentes cenários energéticos, pois considera, de forma simultânea, critérios técnicos e econômicos. O *software* mostra-se compatível com o objetivo do trabalho, permitindo avaliar a viabilidade de diferentes configurações de geração e consumo de energia, auxiliando na tomada de decisões.

A abordagem *bottom-up* é adotada no presente trabalho, onde para realizar a modelagem é caracterizado detalhadamente os consumos individuais de energia. A partir desta análise inicial, os resultados são agregados de forma progressiva a fim de permitir

uma precisão e assertividade das demandas energéticas do sistema. Esta abordagem permite que as simulações de cenários sejam mais assertivas e confiáveis.

A ferramenta utilizada está disponível em diferentes versões, incluindo uma versão exclusiva para estudantes, que permite o uso de forma gratuita durante um período limitado. Após o período de gratuidade é necessário obter uma licença para possibilitar o uso contínuo da ferramenta. Para o desenvolvimento deste trabalho, a versão específica para fins acadêmicos, disponibilizada gratuitamente, foi suficiente para realizar as simulações e análises pertinentes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Setor de Mineração no Brasil

Segundo o IBRAM, em 1940 a contribuição da mineração para o PIB do país era de 0,4%, e em 1980 esse número correspondia a 1% (IBRAM, 2021). No período de 1930 a 1940, o país acelerou seu desenvolvimento no que diz respeito à industrialização, com forte apelo à indústria mineral para fomentar o crescimento econômico nacional. A partir daí, houve uma grande expansão no setor mineral, na qual se duplicou a produção de aço, manganês, carvão e ferro (BARROS, 2013). Neste mesmo período, foram criadas novas empresas, como a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), fundada em 9 de abril de 1941, bem como a grande mineradora estatal de ferro, Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), atualmente nomeada como Vale e privatizada, fundada em 1 de junho de 1942.

Nesta época, o minério era extraído por meio de picaretas e carregado manualmente em lombo de burros, que saíam do alto do Pico do Cauê e se deslocavam com a carga por quase dois quilômetros até a Estação de Itabira. O minério era, então, jogado manualmente com o uso de pás sobre os vagões e transportado até Vitória nos comboios puxados pelas locomotivas (OLIVEIRA, 2017). A partir daí, o setor mineral foi se consolidando e crescendo em números e relevância.

O setor mineral também foi marcado pelo período da ditadura militar, iniciado em 1964. O chamado “Milagre Econômico” incentivou o setor a exportar *commodities* e a se expandir mundialmente (DOMINGUES, 2020). Nesse contexto, a CVRD consolidou-se no cenário mundial como uma grande produtora e exportadora de minério de ferro (VILLAS-BÔAS, 1995). O setor continuou se desenvolvendo após o término do regime militar até os dias atuais, com investimentos cada vez mais significativos.

É inegável a importância da indústria mineral para a economia brasileira. Segundo o IBRAM, o setor atingiu em 2024 cerca de R\$ 34,95 bilhões, valor equivalente a 47% do saldo comercial do Brasil (IBRAM, 2025). Além disso, o setor possui um faturamento de R\$ 270,8 bilhões e representa 4% do PIB do país, gerando mais de 2 milhões de empregos diretos e indiretos (BATISTA et al., 2025). As substâncias metálicas compreendem cerca de 82% do valor total da produção mineral brasileira: entretanto, o minério de ferro é o principal produto, representando 72,1% do valor total. Ademais, os

estados do Pará e Minas Gerais são os mais produtivos, concentrando 87,8% do valor da produção mineral nacional (BRASIL, 2015).

Minas Gerais lidera o *ranking* de produção do país. Existe uma região do estado, situada entre Ouro Preto e Belo Horizonte, conhecida como Quadrilátero Ferrífero. Em sua área de aproximadamente 7.000 km², estão alocadas as grandes empresas mineradoras e diversos empreendimentos com foco no setor (REZENDE, 2016). A Figura 1 representa a área correspondente ao Quadrilátero Ferrífero, as formações ferríferas, a localização das minas pertencentes à Vale e também de outras empresas de mineração.



Figura 1 - Quadrilátero Ferrífero
Fonte: IHU (2019)

Uma grande parte dessa área é dominada pela lavra a céu aberto. Este método é utilizado na mineração com o objetivo de extrair minerais próximos à superfície, sem a necessidade de perfurações subterrâneas. Esta operação visa aproveitar uma jazida desde a extração até o beneficiamento. Existem alguns tipos de lavra a céu aberto, sendo os mais comuns: em bancadas, por tiras e o tipo aluvionar. O método mais comum nas minas do estado é o de bancadas, no qual são formadas camadas horizontais com taludes (LENOIR, 2019). Por possuir grande potencial e importância econômica, Minas Gerais está em foco

nas agendas de sustentabilidade. O estado, em conjunto com as empresas, atende a uma crescente demanda por conformidade e adoção de estratégias de descarbonização.

A lavra a céu aberto demanda o uso intensivo de caminhões fora de estrada para o transporte de carga, sendo esta uma das principais etapas da atividade. Além disso, essas minas possuem uma característica que eleva o consumo de combustível: com o passar do tempo, a profundidade das cavas aumenta devido à extração, o que torna os trajetos mais íngremes e longos. Consequentemente, o consumo de combustível cresce à medida que as características físicas da mina se alteram (WANG et al., 2021).

Existe um planejamento conhecido como Plano de Lavra, que permite estudar como serão realizadas as extrações e definir os limites da cava. A Figura 2 exemplifica o que seria o “*pit*” final de uma cava, ou seja, o seu limite máximo de extração (LENOIR, 2019).



Figura 2 - "*Pit*" Final de uma Cava
Fonte: Galeria de Fotos Câmara dos Deputados (2011)

O modelo de produção mineral brasileiro é intensivo na operação com caminhões, devido ao grande potencial mineral do estado de Minas Gerais. Ocupando uma posição de destaque no país, a mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero envolve o transporte de grandes volumes de estéril e minério das cavas para as pilhas ou plantas de beneficiamento. Dessa forma, o uso de caminhões elétricos pode representar uma alternativa viável para a redução do consumo de diesel e, conseqüentemente, para a diminuição das emissões de GEE.

3.2 Demanda Energética

Um dos pontos desafiadores para as atividades dentro da mineração é a demanda Energética. Martinez et al. (2019) define a demanda energética da seguinte forma:

“A demanda por eletricidade representa toda a energia elétrica necessária, desde a geração até a distribuição, para satisfazer as diversas necessidades e desejos dos principais setores de consumo final. Em termos de unidades mensuráveis, a demanda por eletricidade é equivalente ao total de watts (W) gerados pelas usinas e enviados à rede para uso pelos consumidores, a fim de atender às suas necessidades energéticas ao longo do dia, é normalmente medido em incrementos de 1000 Wh, ou quilowatts-hora (kWh).”

A demanda energética representa, portanto, a energia utilizada pelos sistemas energéticos, na qual são consideradas a eficiência energética e o comportamento necessário para suprir as necessidades de um sistema. Outro conceito importante é o consumo energético, que representa basicamente a soma da demanda energética suprida ao longo de um período (FRAYSSINET, 2018). A demanda energética para as atividades de mineração pode ser compreendida como a quantidade de energia necessária para atender a todos os processos produtivos envolvidos ao longo da cadeia de produção, desde as operações de extração e transporte até o beneficiamento.

Devido ao escopo de atividades dentro da mineração, é possível considerar que o setor se enquadra como um sistema intensivo em energia. Algumas causas para isso residem nas características de uma mineradora, que produz em alta escala, havendo uma grande necessidade de movimentar altos volumes de materiais, processar minérios e manter a operação contínua de equipamentos. O setor de mineração consome 1,7% do total de energia no mundo e estima-se que esse valor possa aumentar em até oito vezes

até o ano de 2060, devido ao provável crescimento da demanda por esses minerais (ARAMENDIA et al., 2023).

O processo produtivo de uma mineradora contempla várias etapas, e cada uma delas consome energia de maneiras diferentes. A seguir, na Figura 3, as etapas cruciais para o processo estão representadas através de um fluxograma.



Figura 3 - Fluxograma do Processo Produtivo de uma Mineradora
Fonte: Iramina et al. (2009, p. 506)

Como exemplificado na Figura 3, cada etapa do processo produtivo demanda um tipo de consumo energético específico. A etapa de lavra compreende a perfuração, o desmonte, o carregamento e o transporte dos materiais. Nesta fase, é necessário utilizar diversos equipamentos movidos a diesel, como escavadeiras, carregadeiras e caminhões fora de estrada. A etapa seguinte refere-se ao transporte de minério e estéril, representando uma parcela expressiva da demanda energética do setor, isso ocorre porque as condições da mina e a distância entre a lavra e o beneficiamento implicam diretamente o consumo de combustível dos caminhões (FIGUEIREDO et al., 2023), além de estarem diretamente associadas às emissões de GEE.

As outras etapas das fases de beneficiamento e concentração possuem um consumo elevado de energia elétrica, devido à utilização de diversos equipamentos necessários para o processamento do minério, como bombas, compressores e sistemas de controle presentes na planta. Outras fontes consumidoras de energia em uma mineração

são as infraestruturas que servem de apoio às demais atividades, como, por exemplo, iluminação, sistemas de drenagem, escritórios e restaurantes.

Cada etapa e processo contribui para a formação de uma matriz energética. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética — EPE, uma matriz energética é representada pelo conjunto de fontes utilizadas para suprir a demanda de energia. A Figura 4 representa a matriz energética brasileira, atualizada com dados de 2025 (EPE, 2026).

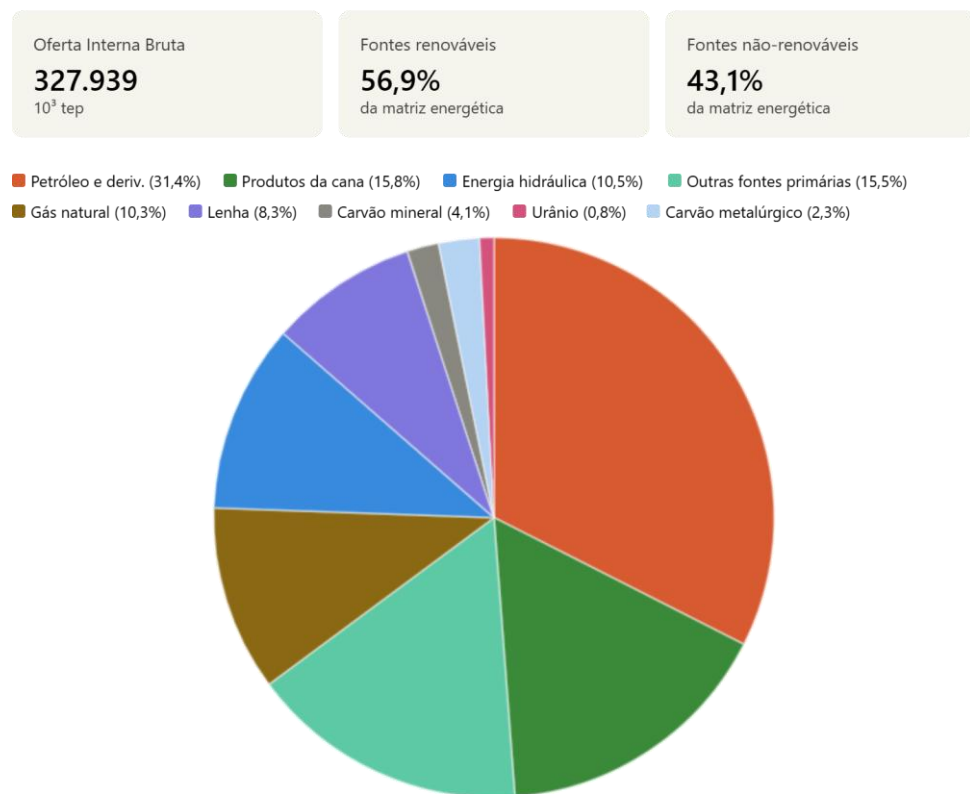


Figura 4 - Matriz Energética Brasileira
Fonte: EPE (2026)

A matriz energética de uma mineração também possui diferentes fontes de energia. Como citado anteriormente, as diferentes etapas do processo produtivo demandam diferentes fontes de energia. O fluxograma abaixo apresenta os processos presentes na mineração e as fontes de energia utilizadas em cada etapa.

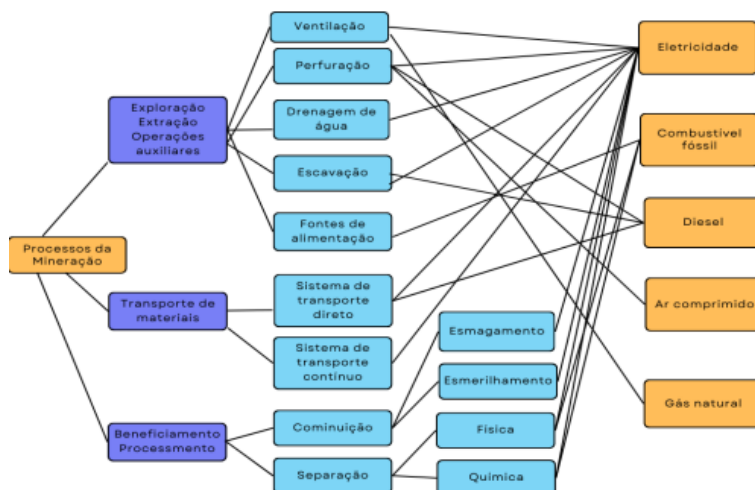


Figura 5 - Processos e Fontes de Energia Utilizadas
Fonte: FERREIRA (2024)

Conforme a Figura 5, a matriz energética de uma mineração é composta por diferentes tipos de fontes de energia, as duas mais utilizadas são a eletricidade, crucial em grande parte do processo, e o diesel, utilizado como combustível para as locomotivas e também caminhões fora de estrada, que são fundamentais para as operações. Essa relevância é confirmada pelos dados oficiais do setor: segundo o Balanço Energético Nacional do ano de 2025, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2026), a eletricidade responde por 44,2% do consumo energético do setor de mineração e pelletização no Brasil, seguida pelo óleo diesel, com 19,0%, conforme apresentado na Figura 6.

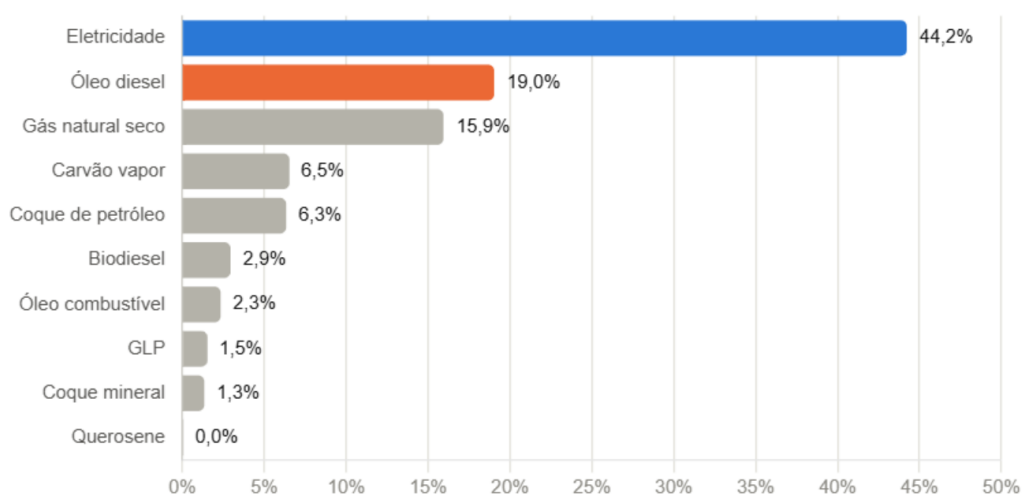


Figura 6 - Matriz energética do setor de mineração e pelletização no Brasil
Fonte: elaborado pelo autor com base em EPE (2026)

No que tange ao consumo, sabe-se que o setor industrial é um dos maiores consumidores de energia, e a mineração está incluída nessa estatística. A Figura 7 apresenta as principais mineradoras consumidoras de energia do mundo. Nota-se que a mineradora brasileira Vale figura entre as maiores consumidoras globais; no entanto, a empresa afirma suprir cerca de 80% de sua demanda por meio de geração própria, utilizando fontes renováveis, como energia solar, eólica e hidrelétricas (VALE, 2025).

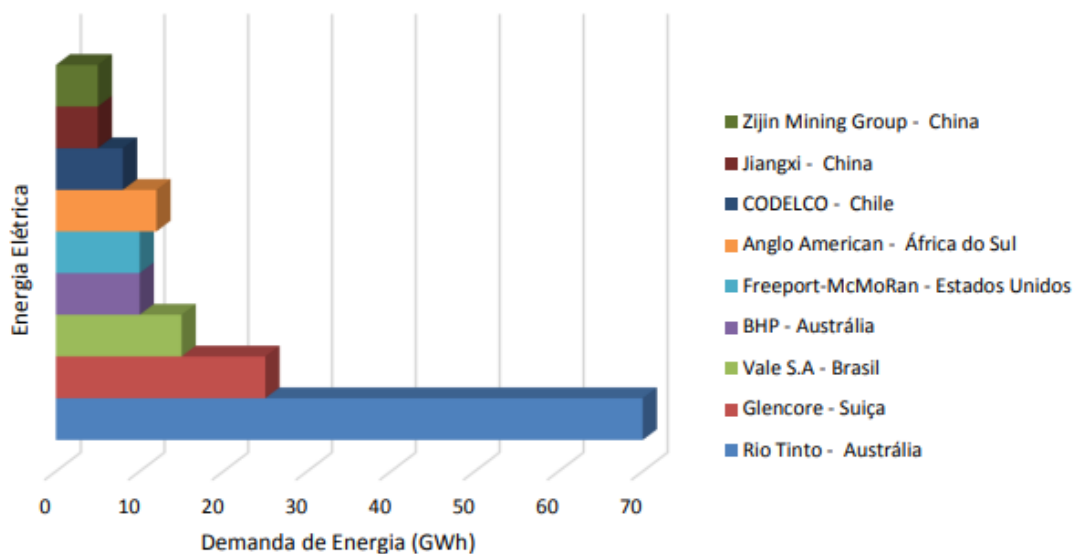


Figura 7 - Principais Mineradoras Consumidoras de Energia no Mundo
Fonte: ARAÚJO (2022)

A Vale obtém sua energia por meio de consórcios em empresas de geração e usinas hidrelétricas. As hidrelétricas associadas à companhia somam uma potência instalada de 2.227 MW, distribuída pelos estados do Maranhão, Tocantins, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Já as empresas de geração parceiras operam com fontes eólica, solar e hidrelétrica, totalizando cerca de 4.500 MW de capacidade instalada (VALE, 2025). É essencial conhecer o panorama de consumo e geração para viabilizar o planejamento energético e a implementação de novas estratégias de desenvolvimento sustentável, incluindo medidas como a eletrificação de frotas e máquinas, além da substituição de fontes convencionais de energia.

3.3 Transição Energética do Setor de Mineração do Brasil

A transição energética configura-se como um dos principais desafios contemporâneos da sociedade global, diante do avanço das mudanças climáticas, do aumento da concentração de GEE na atmosfera e da necessidade de reestruturação dos modelos produtivos intensivos em energia e recursos naturais. No Brasil, esse debate adquire contornos específicos em razão da relevância econômica do setor de mineração, que desempenha papel estratégico tanto no fornecimento de matérias-primas essenciais quanto na dinâmica energética nacional. Nesse cenário, a atividade minerária ocupa uma posição de destaque na economia, ao mesmo tempo em que apresenta elevado consumo energético e significativa dependência de combustíveis fósseis, especialmente do óleo diesel, amplamente utilizado em equipamentos de lavra e transporte mineral (IBRAM, 2024).

O setor mineral brasileiro é caracterizado por operações de grande escala, elevado consumo energético e forte dependência de combustíveis fósseis, especialmente óleo diesel, nas etapas de lavra, transporte e beneficiamento. Ao mesmo tempo, a mineração assume protagonismo na transição energética ao fornecer minerais críticos indispensáveis para tecnologias de baixo carbono, como baterias, painéis solares, turbinas eólicas e veículos elétricos. Dessa forma, o setor encontra-se em posição paradoxal: ao mesmo tempo em que é intensivo em emissões, é fundamental para a descarbonização de outros segmentos da economia (IBRAM, 2025). Nesse contexto, torna-se imprescindível analisar a transição energética do setor de mineração no Brasil à luz das políticas públicas, dos desafios tecnológicos, das oportunidades econômicas e dos impactos socioambientais associados.

A expansão da mineração voltada à transição energética também gera desafios socioambientais significativos. A abertura de novas áreas de exploração pode intensificar conflitos territoriais, especialmente em regiões ocupadas por comunidades tradicionais e povos indígenas, além de impactar ecossistemas sensíveis (IBRAM, 2025). Relatórios apontam que, sem uma governança adequada, a chamada "transição verde" pode reproduzir desigualdades históricas, transferindo impactos ambientais e sociais para regiões periféricas enquanto os benefícios econômicos se concentram em setores específicos (CEBDS, 2025). Embora a crescente demanda global por esses insumos impulsione investimentos em pesquisa mineral, inovação tecnológica e ampliação da capacidade produtiva, a exploração desses recursos exige planejamento de longo prazo,

fortalecimento da governança regulatória e adoção de práticas sustentáveis. Tais medidas são fundamentais para mitigar impactos socioambientais negativos e garantir a viabilidade econômica e a licença social dos projetos.

As emissões de GEE no setor mineral brasileiro estão associadas, majoritariamente, ao consumo de combustíveis fósseis em equipamentos móveis e ao uso de energia elétrica nos processos industriais. Embora a participação relativa da mineração nas emissões nacionais seja considerada moderada, a intensidade energética da atividade torna a redução desses índices um desafio prioritário. Estratégias de mitigação têm sido incorporadas gradualmente ao setor, incluindo a eletrificação de frotas, o uso de biocombustíveis, a autoprodução de energia renovável e a melhoria da eficiência operacional. Adicionalmente, iniciativas voltadas à digitalização e automação de processos têm contribuído para a otimização do consumo energético. Tais ações são impulsionadas por exigências regulatórias e por compromissos voluntários no âmbito de agendas ESG, sigla que integra critérios ambientais (*Environmental*), sociais (*Social*) e de governança (*Governance*) na gestão corporativa, além da crescente demanda de investidores e mercados consumidores por práticas sustentáveis.

O Governo Federal instituiu, em 29 de dezembro de 2009, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). A Lei nº 12.187 foi estabelecida como um marco legal brasileiro para compatibilizar o desenvolvimento econômico e social com a proteção do sistema climático (BRASIL, 2009). Nesse cenário, o setor da mineração é considerado prioritário no que tange ao engajamento em questões de sustentabilidade, devido às elevadas emissões de gases de efeito estufa provenientes do consumo de energia e de combustíveis nas etapas produtivas (CARVALHO et al., 2016).

3.4 Estratégias de Descarbonização

A descarbonização pode ser definida como o processo de redução da intensidade de carbono emitida pelas atividades humanas. Tais estratégias visam mitigar as emissões de GEE por meio da implantação de tecnologias que substituem o uso de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis. Esse movimento consolidou-se como uma tarefa imprescindível para o enfrentamento das mudanças climáticas. Embora seja um percurso de alta complexidade e desafiador, a descarbonização é essencial para mitigar os impactos ambientais. Mediante a implementação de ações focadas na redução das emissões de

dióxido de carbono (CO₂), como a adoção de energias limpas, a melhoria da eficiência energética, a eletrificação de processos industriais e a captura e armazenamento de carbono (CAC, do inglês *Carbon Capture and Storage* — CCS), torna-se possível alcançar avanços significativos na transição para uma economia de baixo carbono (IEE USP, 2024).

No contexto brasileiro, o setor mineral é um componente estratégico nesse processo. O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), principal entidade que representa empresas do setor mineral e possui sua sede em Belo Horizonte, aponta que a mineração brasileira pode ter papel decisivo na descarbonização e na transição energética global, contribuindo para reduzir emissões e impulsionar cadeias produtivas mais sustentáveis (IBRAM, 2025). Nesse sentido, foram estabelecidos compromissos setoriais que incluem a redução das emissões diretas de carbono (Escopo 1) e o aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética das operações mineiras.

Algumas empresas do setor já adotaram e alcançaram metas expressivas. A Vale, por exemplo, estabeleceu em 2020 os seguintes marcos estratégicos: redução de 33% das emissões absolutas de Escopos 1 e 2 até 2030 (tendo 2017 como ano-base); redução de 15% das emissões líquidas de Escopo 3 até 2035 (em relação a 2018); e a neutralização (net zero) das emissões líquidas de Escopos 1 e 2 até 2050. No que tange ao consumo de eletricidade, a companhia estipulou a meta de atingir 100% de energia renovável em suas operações no Brasil até 2025, objetivo este alcançado em 2023, com dois anos de antecedência, e 100% de energia renovável em suas operações globais até 2030 (VALE, 2020). Em termos absolutos, a intensidade de emissões da companhia era de 21,1 kg de CO₂ equivalente por tonelada de minério de ferro equivalente em 2017 (ano-base) e já caiu para 18,3 kg CO₂e por tonelada em 2024, avançando rumo à meta de 2030 e, no limite, à neutralização total (zero) prevista para 2050 (VALE, 2024).

No entanto, é necessário adotar estratégias para alcançar as metas estabelecidas. A descarbonização ocorre, principalmente, por meio da transição energética. Algumas etapas são fundamentais para se obter êxito no processo de transição energética e descarbonização. A primeira é adotar fontes de energia limpas e renováveis. Exemplos dessas energias são a energia solar, eólica, hidrelétrica e biomassa. Outro passo importante é estudar e implementar tecnologias de eficiência energética. O último passo, estudo neste presente trabalho, é a eletrificação dos processos. Embora não exista uma única solução, o setor de mineração pode adotar várias medidas, adaptadas às suas

características específicas, com o intuito de diminuir o consumo de energia de alta pegada de carbono. Essas ações envolvem melhorias nos processos de mineração, aumento da eficiência energética de plantas e equipamentos, inovações para integrar fontes de energia de baixo carbono e otimizações no transporte (BNDES, 2025).

Algumas estratégias têm sido aplicadas para impulsionar a transição energética. A primeira delas, já utilizada em diversas localidades, é a substituição do carvão mineral pelo gás natural, especialmente em usinas termelétricas. Segundo a Agência de Informação de Energia dos Estados Unidos (EIA, 2021), enquanto apenas 40% da energia contida no carvão é transformada em eletricidade, o uso do gás natural alcança uma eficiência de cerca de 60%. Essa transição representa um avanço significativo, visto que o gás apresenta um rendimento superior e menor intensidade de emissões em comparação ao carvão mineral.

Outra alternativa relevante, apresentada na COP30, é a utilização de biocombustíveis em caminhões. Segundo a Associação Nacional das Empresas de Agenciadores de Transporte de Cargas (ANATC, 2025), o uso do biodiesel pode reduzir as emissões de CO₂ em até 99,65%. Paralelamente, a mineradora Vale tem realizado testes de campo com as misturas B30 e B50 (contendo 30% e 50% de biodiesel, respectivamente) em sua frota. A companhia afirma que a utilização de biodiesel em caminhões fora de estrada tem o potencial de reduzir em até 35% as emissões de gases de efeito estufa em comparação ao diesel convencional (VALE, 2025). A alternativa central deste trabalho é a eletrificação. Segundo a Enel (s.d.):

“a eletrificação é o processo de substituição das fontes de energias fósseis – como carvão, petróleo e gás – pela eletricidade gerada por fontes de energia limpa, como a solar, a eólica, hidrelétrica e geotérmica.”

A eletrificação pode ocorrer de forma direta ou indireta: a via indireta está associada ao uso de vetores energéticos, como o hidrogênio verde utilizado como combustível. Por outro lado, a eletrificação direta relaciona-se à adoção imediata de sistemas e veículos elétricos, eliminando a queima de combustíveis no ponto de consumo (ALÉM DA ENERGIA, 2023).

Diversos benefícios estão relacionados a eletrificação de frotas a diesel. O principal deles é a descarbonização, reduzindo as emissões de GEE no uso final de energia. Além disso, esta estratégia está diretamente ligada à inovação, criando

tecnologias a fim de, melhorar a eficiência energética (ENEL, s.d.). Segundo a EPE (2023, p.15):

“A cada ano, novos modelos de veículos pesados elétricos e a gás natural têm sido disponibilizados ao consumidor pela indústria automotiva, inclusive no Brasil. Essas tecnologias têm superado barreiras e têm diminuído as diferenças técnicas e econômicas, como em termos de autonomia veicular e de preço de aquisição, para a alternativa tradicional dos motores de combustão interna a diesel.”

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), observa-se um crescimento progressivo no número de licenciamentos anuais para novos modelos de caminhões elétricos no Brasil. A Figura 8 ilustra a evolução desses registros, abrangendo veículos elétricos e movidos a gás natural no período de 2018 a 2022.

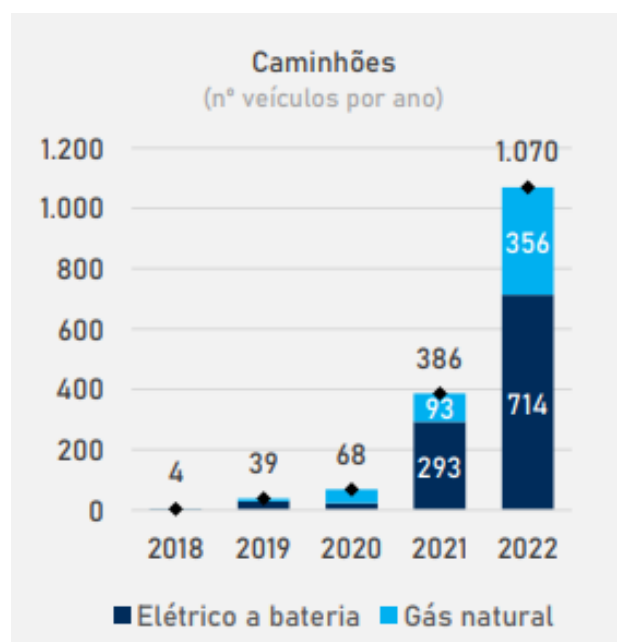


Figura 8 - Licenciamento Anual de Novos Caminhões Elétricos e a Gás Natural no Brasil
Fonte: ANFAVEA (2023)

Diante desses dados, evidencia-se uma tendência de transição do setor de transporte para tecnologias de baixa emissão. Esse crescimento reflete não apenas o avanço tecnológico e a maturidade da indústria, mas também uma adesão estratégica a

alternativas mais sustentáveis e alinhadas às metas globais de descarbonização. Segundo a EPE (2023, p.15):

“Diante dessas características, a promoção dessas motorizações alternativas tem se intensificado devido à maior mobilização de empresas em estratégias de sustentabilidade e em compromissos de redução de emissões, assim como pela reorientação de formuladores de políticas públicas e de governos locais em prol de políticas de mobilidade urbana sustentável.”

Essa convergência de interesses entre o setor produtivo e as esferas governamentais é o que sustenta a viabilidade de longo prazo para a eletrificação de frotas pesadas. Sabe-se que a implantação completa deste tipo de veículo ainda está em fase inicial, e possui algumas restrições quanto a adoção em massa dessa alternativa, são elas:

- Custos elevados de aquisição;
- Autonomia limitada em comparação aos caminhões movidos à combustão;
- Peso e dimensão das baterias;
- Baixa disponibilidade no quesito infraestrutura para carregamento dos veículos;
- Duração do carregamento;
- Mercado limitado.

No entanto, essas restrições podem ser mudadas a depender do progresso tecnológico, condições econômicas, e a preocupação com as questões ambientais, melhorando então a viabilidade de implantação dessa tecnologia (EPE; MME, 2023).

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Mineradora em Nova Lima

O estudo foi realizado utilizando dados de uma mineradora de ferro localizada na cidade de Nova Lima, em Minas Gerais, a partir da ideia de analisar a diferença de consumo decorrente do uso da tecnologia de caminhões totalmente elétricos. Para realizar a simulação, foi construída uma curva de carga baseada nos horários de funcionamento da mina e também na quantidade de caminhões operando em cada turno.

O conceito de curva de carga é definido pela representação detalhada que relaciona a demanda ou o consumo real de energia ao longo de um período específico (SOYSTER; EYNON, 1982). Utilizando a curva de carga, é possível identificar padrões de consumo energético, possibilitando a tomada de decisão mediante um dimensionamento ótimo para suprir a demanda, bem como prever as necessidades futuras do sistema e avaliar medidas de eficiência energética.

Deste modo, a curva de carga para este trabalho foi construída a partir dos padrões de consumo de um caminhão elétrico do modelo SKTe-110T da montadora chinesa Sany, por conter aspectos técnicos similares à frota dos CAT 775 e também por a mina já possuir um caminhão desse modelo em operação. A partir desse perfil, foi realizada a projeção para a frota total, considerando a quantidade real de caminhões e os horários de operação definidos.

A frota possui 26 caminhões que operam em dois turnos de 12 horas. A Tabela 1 apresenta a média de horas trabalhadas por dia e a média de quilômetros percorridos pela frota de caminhões. Os dados individuais referentes a cada caminhão foram fornecidos pela equipe de engenharia e encontram-se detalhados no Anexo 1.

Tabela 1 – Dados Sobre a Frota de Caminhões

Horas Trabalhadas (Mês)	Média de Horas Trabalhadas (Dia)	Km rodados (Mês)	Média de km (Dia)
265	8,83	7950	265

Fonte: Elaboração própria

A partir da definição da curva de carga, é realizada a modelagem de cenários. Foram elaborados dois cenários a partir do cenário de referência, que compreende uma frota 100% a diesel.

No **Cenário Alternativo Gradual**, foi considerada a substituição de metade da frota de caminhões a diesel por caminhões 100% elétricos, buscando reduzir as emissões de GEE de forma gradual, tendo em vista o valor de aquisição de um caminhão 100% elétrico novo e a infraestrutura de carregamento necessária para essa frota.

O **Cenário Alternativo Forte** compreende a substituição de 100% da frota por caminhões 100% elétricos. Nos dois cenários, foi considerada a recarga sendo realizada a partir de usinas solares com painéis fotovoltaicos, buscando eliminar as emissões de GEE.

4.2 Premissas para execução da Simulação

O documento com as especificações técnicas do caminhão Sany SKTe-110T, com capacidade para carregar até 70 toneladas, fornece as informações necessárias para a construção da curva de carga, modelo utilizado conforme a Figura 9. A autonomia de um equipamento como este é de até 160 km e a capacidade da bateria é de 466 kWh (IRMEN, 2024). Sabe-se que as condições de mina podem reduzir a autonomia, por isso é importante considerar um valor abaixo do limite especificado; para este estudo, foi considerada uma autonomia de 135 km. Com esses valores, define-se o consumo energético de 3,45 kWh/km. Tendo como base a média de km/dia da frota a diesel, obtém-se a energia necessária por dia: 914,74 kWh/dia para cada caminhão. Com o valor da energia necessária, é possível estimar que cada caminhão requer 1,96 cargas completas por dia, ou seja, 2 cargas diárias por caminhão.

O custo de aquisição, incluindo impostos e transporte do caminhão Sany de 110 toneladas na versão a diesel, é de US\$ 9.350.000 por unidade, conforme dados fornecidos pela engenharia responsável pela gestão da frota. O custo de aquisição unitário do caminhão elétrico Sany SKT110E não é divulgado publicamente pelo fabricante, uma vez que a Sany comercializa o equipamento mediante cotação direta com o cliente. Estudos de mercado indicam que caminhões elétricos de mineração custam em média até 33% mais do que seus equivalentes a diesel (MINING MONTHLY, 2023), o que resultaria em um valor estimado de US\$ 12.435.500 por unidade para o SKT110E.



Figura 9 - Caminhão Fora de estrada - SANY SKTe-110T
Fonte: Sany Índia (2026)

Em termos de energia total necessária por dia, serão necessários 7.172 kWh/dia para que todos os caminhões sejam carregados. Este número considera a indisponibilidade de 2 equipamentos por manutenção, sendo adotada como premissa conservadora, representando aproximadamente 7,7% da frota total de 26 caminhões. Esse percentual foi calculado baseado nos benchmarks da indústria de mineração, que apontam disponibilidade física entre 85% e 92% para caminhões de transporte em operações de porte médio, equivalente a uma indisponibilidade de 8% a 15% da frota a qualquer momento (HEAVY VEHICLE INSPECTION, 2024). Para uma frota de 26 caminhões, isso representa entre 2 e 4 equipamentos indisponíveis simultaneamente, sendo 2 unidades a premissa adotada neste estudo.

A energia total define a melhor estação de carregamento a ser utilizada. O método de carregamento utilizado na simulação corresponde a estações de carregamento rápido convencional. O carregador DC utilizado é o HiCi, fabricado pela HICI Digital Power Technology Co, Ltd., conforme mostra a Figura 10. Fornecido pela própria Sany junto aos caminhões SKT110E, com potência de saída de 350 kW, tensão de entrada de 400 V AC e tensão de saída de 150 a 1.000 VDC (HICI, 2026).



Figura 10 – Carregador convencional para caminhões elétricos
Fonte: Elaboração própria

Nesses casos é utilizada a técnica de recarga efetiva, usando 70% da bateria (SOC 25% a 95%), e o tempo necessário para carregá-la até 95% é de 1 hora (SANY, 2026). O diagrama da Figura 11 mostra a configuração utilizada para a simulação dos cenários alternativos ao suprimento a diesel.

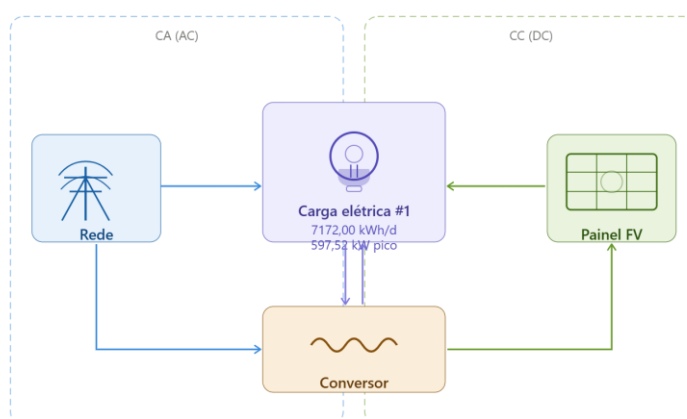


Figura 11 – Configuração para simulação dos cenários
Fonte: Elaboração própria

É necessário inserir parâmetros econômicos iniciais para iniciar as simulações no modelo energético HOMER PRO. Foi considerado a Taxa de Desconto de 14,00% e a Taxa de inflação em 5,30%. Os parâmetros econômicos apresentados foram retirados do Boletim Focus (BACEN, 2026).

4.3 Cenários Simulados

4.3.1 Cenário de Referência

O Cenário de Referência compreende uma frota de 26 caminhões fora de estrada Caterpillar modelo 775G, conforme mostra a Figura 12, com capacidade para carregar até 70,5 toneladas. Neste cenário, foram consideradas as emissões de CO₂, o custo de aquisição e os gastos com diesel, a fim de comparar os resultados com os da frota eletrificada.



Figura 12 - Caminhão fora de estrada CAT 775G
Fonte: Tractafric Equipment (2026)

O custo de aquisição unitário do CAT 775G, já considerando impostos e transporte, é de aproximadamente US\$1.300.000,00, conforme dados fornecidos pela engenharia responsável pela gestão da frota. O preço de referência adotado para o diesel foi de US\$ 0,80 por litro, valor obtido diretamente junto à equipe de engenharia, com base nas informações operacionais do empreendimento. Esse valor é compatível com o custo de aquisição praticado por grandes consumidores industriais, que compram diesel diretamente de produtores, fora da cadeia de distribuição varejista, sem a incidência plena dos tributos e margens presentes no preço de bomba ao consumidor final. Para referência, o preço médio de bomba no Brasil em 2025 foi de US\$ 1,08 por litro (ANP, 2025).

Para o cálculo das emissões de GEE, foram utilizados os fatores do ciclo 2026 da Ferramenta de Cálculo do Programa Brasileiro GHG Protocol, que adota os fatores de emissão ajustados para o Óleo Diesel Comercial (Diesel B) no mercado nacional. O fator de emissão para equipamentos movidos a óleo diesel é de 2,47 kg CO₂/L (FGV EAESP, 2026). A Tabela 2 apresenta as informações pertinentes para a frota de caminhões a diesel.

Tabela 2 - Cenário de Referência

Investimento (US\$)	Consumo mensal médio de combustível (L)	Custo mensal Diesel (US\$)	Emissões de CO₂ mensais (kg)
1.300.000	28.287	22.629,60	69.868,89

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 3 apresenta o comparativo entre os custos de aquisição dos caminhões a diesel e elétrico, evidenciando o diferencial de investimento entre as tecnologias. O caminhão elétrico SKT110E apresenta custo de aquisição unitário estimado de US\$ 12.435.500,00, valor 9,6 vezes superior ao do CAT 775G a diesel (US\$ 1.300.000,00). Para uma frota completa de 26 unidades, o investimento total estimado no Cenário Alternativo Forte seria de US\$ 323.323.000,00, contra US\$ 33.800.000,00 no Cenário de Referência.

Tabela 3 - Comparativo de custos de aquisição: diesel x elétrico

Item	CAT 775G (Diesel)	SKT110E (Elétrico)
Preço unitário (US\$)	1.300.000,00	12.435.500,00
Frota completa – 26 unidades (US\$)	33.800.000,00	323.323.000,00

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 4 apresenta o comparativo do custo operacional por quilômetro percorrido entre as tecnologias diesel e elétrica, com base nos dados operacionais da frota. Para os caminhões a diesel, o consumo médio apurado foi de 3,56 litros por quilômetro, obtido pela razão entre o consumo mensal de 28.287 litros e a quilometragem média mensal de 7.950 km por caminhão. Para os caminhões elétricos, cada recarga efetiva fornece 326 kWh de energia, proporcionando uma autonomia de 130 km por ciclo de carga. O consumo específico resultante é de 2,51 kWh/km. À tarifa de energia elétrica de US\$ 0,10/kWh, o custo por quilômetro elétrico é de US\$ 0,25/km, 11,4 vezes inferior ao do diesel (US\$ 2,85/km).

Tabela 4 - Equivalência energética: custo por km

Parâmetro	Diesel (CAT 775G)	Elétrico (SKT110E)
Consumo específico	3,56 L/km	2,51 kWh/km
Preço do insumo energético	US\$ 0,80/L	US\$ 0,10/kWh
Custo por km (US\$)	2,85	0,25

Fonte: Elaboração Própria

4.3.2 Cenário Alternativo Gradual

Tendo em vista uma transição gradual para a frota, a fim de viabilizar a transição em termos de custos e adequações de área, a curva de carga foi construída considerando a substituição de 13 veículos elétricos, que funcionam em turnos de 12 horas. A troca de turno e o carregamento dos caminhões foram considerados de forma a não impactar o funcionamento da mina. Para construir a curva de carga, considerou-se a necessidade de duas recargas diárias por caminhão, o que resulta em 22 recargas/dia, descontados 2 caminhões parados por manutenção. Por se tratar de uma demanda relacionada a um processo de produção contínua, evitando paradas simultâneas em excesso, a demanda foi distribuída ao longo do dia, evitando picos e gerando uma curva linear, com intervalos de 07:00 as 08:00 e 19:00 as 20:00 como representado na Figura 13.

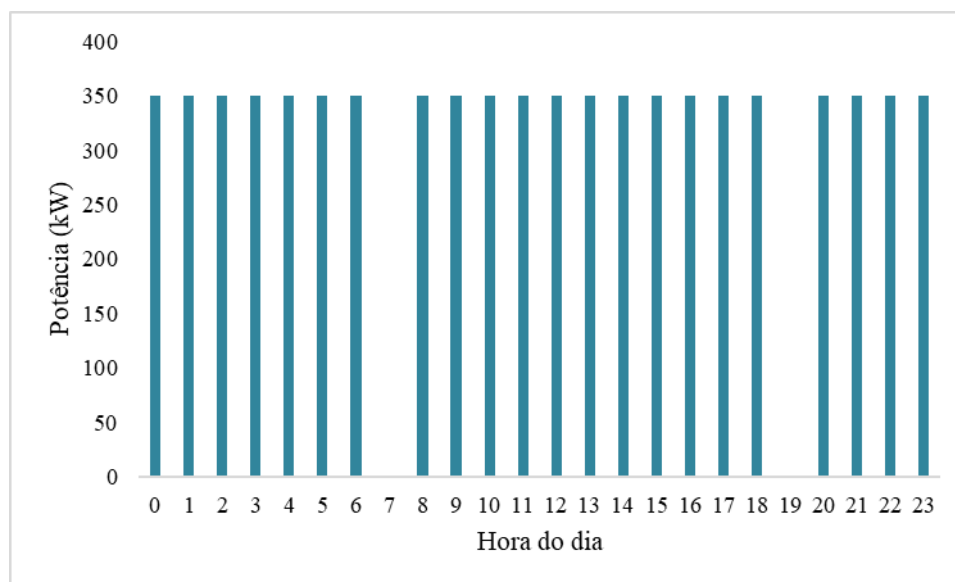


Figura 13 - Curva de Carga: Cenário Gradual

Fonte: Elaboração própria

A simulação compreenderá duas possibilidades: uma delas é utilizando 100% a rede elétrica para as recargas, e outra utilizando usinas solares de painéis fotovoltaicos como fonte de energia. O *software* utilizado para a simulação foi o HOMER Pro, considerando a localização do projeto em Nova Lima/MG.

O painel escolhido foi o Luxen LNET-710ND, com potência nominal de 710 W, tecnologia N-type TOPCon bifacial e certificação INMETRO (LUXEN, 2025). Para suprir a demanda energética da frota, seria necessária a instalação de 4.186 painéis, totalizando uma potência instalada de 2.972 kWp e capacidade de geração de aproximadamente 11.760 kWh/dia, com área ocupada de aproximadamente 1,79 hectares em campo aberto. O custo de aquisição dos painéis corresponde a US\$ 145,00 por unidade, resultando em um total de US\$ 606.970,00 para os 4.186 módulos (NEOSOLAR, 2025).

Para a conversão da energia gerada pelos painéis de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), é necessário um inversor. O modelo adotado foi o Sungrow SG250HX-20, com potência nominal de 250 kW e eficiência de 99%, sendo necessárias 12 unidades para atender à capacidade instalada do sistema (SUNGROW, 2020). O custo de aquisição de cada inversor é de US\$ 13.500,00, totalizando US\$ 162.000,00 para as 12 unidades (ELETROTRAFO, 2026). O inversor possui garantia de 10 anos pelo fabricante, com vida útil estimada entre 10 e 15 anos (ENERGY SUSTAINABILITY DIRECTORY, 2025).

O carregador HiCi possui custo de aquisição de US\$ 70.000,00 por unidade, sendo necessária 1 unidade para o Cenário Alternativo Gradual, totalizando US\$ 70.000,00 (HICI, 2026). O custo total de aquisição do sistema, considerando os painéis e inversores, é de US\$ 768.970,00. O custo de manutenção anual estimado para o sistema completo é de US\$ 60.494,20, sendo US\$ 53.162,20 referentes aos painéis e US\$ 7.332,00 referentes aos inversores. Esse valor foi calculado com base no benchmark de US\$ 24,00/kW/ano estabelecido pelo National Renewable Energy Laboratory para sistemas fotovoltaicos de grande escala instalados em solo (NREL, 2024).

A Tabela 5 apresenta as informações técnicas e os valores de aquisição e manutenção para implantação do sistema de painéis fotovoltaicos.

Tabela 5 – Informações sobre o Sistema Fotovoltaico para o Cenário de Transição Gradual

Equipamento	Preço unitário (US\$)	Manutenção por unidade/ano (US\$)	Vida útil
Placa Fotovoltaica	145	12,70	25 anos
Inversor	13.500	611	15 anos
Total (4.186 painéis + 12 inversores)	768.970,00	60.494,20	-

Fonte: Elaboração própria com base em Solartechonline (2025), Eletrotrafo (2026), NREL (2024), Luxen Solar (2025) e Energy Sustainability Directory (2025).

O esquema construído para a simulação possui uma configuração de fontes com alimentação pela rede elétrica e com painéis fotovoltaicos. A Figura 14 aponta a configuração do perfil de carga elétrica na tela do HOMER Pro.

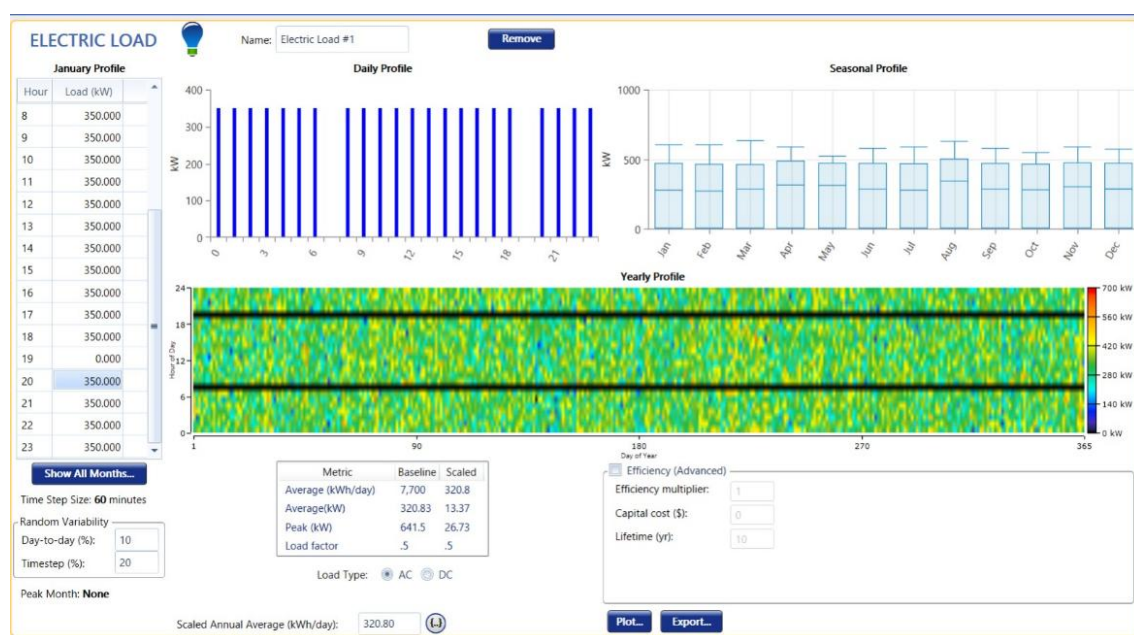


Figura 14 – Configuração do Perfil de Carga Elétrica HOMER Pro
Fonte: Elaboração própria a partir de HOMER PRO, 2026

Após a simulação foi obtido o seguinte resultado, conforme mostra a Figura 15, considerando a utilização somente por suprimento da rede da concessionária distribuidora de energia elétrica e uma outra considerando a utilização dos painéis combinados com a rede. Além disso, o resultado fornecido pela simulação para as emissões de dióxido de

carbono no Cenário Alternativo Gradual, foi de 43.828 quilos por ano de emissões de Dióxido de Carbono.

Architecture						Cost	
			PV (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)	NPC (\$)	Initial capital (\$)
						\$ 2,52M	\$ 0,00
			2.972	9.999.999	785	\$ 844.749	\$ 473.323

Metric	Value
Present worth (\$)	\$ 1.676.059
Annual worth (\$/yr)	\$ 174.053
Return on investment (%)	42,7
Internal rate of return (%)	46,9
Simple payback (yr)	2,13
Discounted payback (yr)	2,45

Figura 15 – Resultados Econômicos a partir da Simulação
Fonte: Elaboração própria a partir do HOMER Pro

Os resultados da Figura 15 mostram que o sistema combinando painéis fotovoltaicos (2.972 kW) e rede da concessionária reduziu o Custo Presente Líquido (NPC) de US\$ 2,52 milhões, no cenário de suprimento exclusivo pela rede, para \$844.749, uma queda de cerca de 66,5%, mesmo com investimento inicial de US\$ 473.323. O *payback* simples de 2,13 anos e a TIR de 46,9% confirmam a viabilidade econômica da solução híbrida frente à vida útil do sistema.

Do ponto de vista ambiental, o sistema combinado de rede e painéis no Cenário Alternativo Gradual apresentou 43.828 kg de emissões de CO₂ por ano, uma redução em relação ao uso exclusivo da rede. Esse resultado reforça o potencial da geração fotovoltaica própria como complemento para reduzir ainda mais as emissões da operação.

4.3.3 Cenário Alternativo Forte

Neste cenário, foi considerada a substituição total da frota de caminhões a diesel. Para construir a curva de carga, considerou-se a necessidade de duas recargas diárias por caminhão, o que resulta em 48 recargas/dia, descontados 2 caminhões parados por manutenção, totalizando 48 recargas efetivas por dia, com 2 caminhões carregando a cada hora, como no gráfico apresentado na Figura 16.

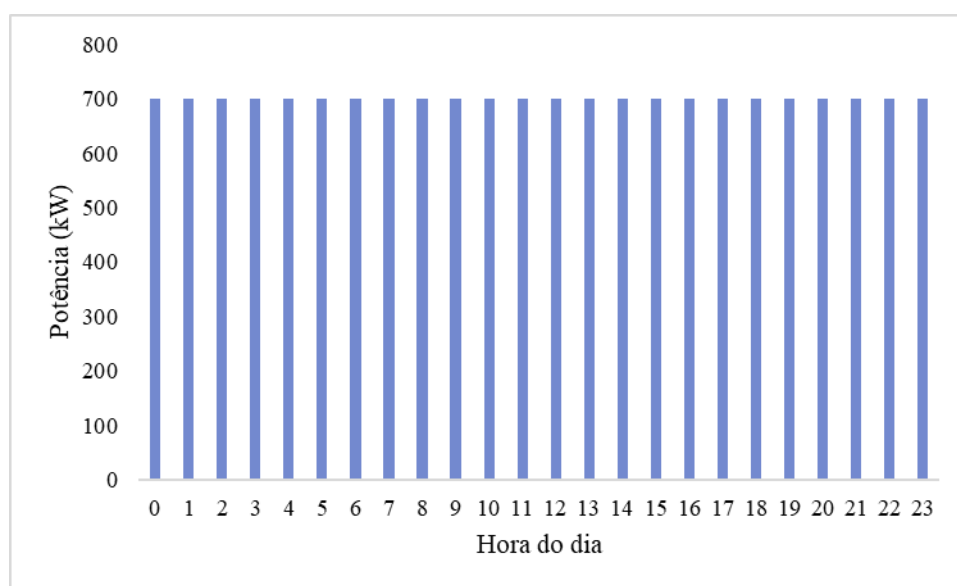


Figura 16 - Curva de Carga: Cenário Alternativo Forte

Fonte: Elaboração própria

A simulação para o cenário com 100% da frota eletrificada, considera as mesmas premissas do cenário anterior. Para suprir a demanda energética da frota, seria necessária a instalação de 5.542 painéis, totalizando uma potência instalada de 3.935 kW e capacidade de geração de aproximadamente 15.648 kWh/dia, com área ocupada de aproximadamente 2,37 hectares em campo aberto, resultando em um total de US\$ 803.590,00 para os 5.542 módulos. Foram necessárias 16 unidades para atender à capacidade instalada do sistema de inversores, totalizando US\$ 216.000,00 para o sistema. Para o Cenário Alternativo Forte, foram previstas 2 unidades do carregador HiCi, ao custo de US\$ 70.000,00 cada, totalizando US\$ 140.000,00 (HICI, 2026).

Tabela 6 - Informações sobre o sistema fotovoltaico para o Cenário Alternativo Forte

Equipamento	Preço unitário (US\$)	Manutenção por unidade/ano (US\$)	Vida útil
Placa Fotovoltaica (710 W)	145,00	12,70	25 anos
Inversor (250 kW)	13.500,00	611	15 anos
Total (5.542 painéis + 16 inversores)	1.019.590,00	79.438,40	-

Fonte: elaborado pelo autor com base em NeoSolar (2025), Eletrotrafo (2026), NREL (2024), Luxen Solar (2025) e Energy Sustainability Directory (2025).

Após a simulação foi obtido o seguinte resultado, conforme mostra a Figura 17, considerando a utilização somente por suprimento da rede da concessionária distribuidora de energia elétrica e uma outra considerando a utilização dos painéis combinados com a rede. Além disso, o resultado fornecido pela simulação para as emissões de dióxido de carbono no Cenário Alternativo Forte foi de 99.815 quilos por ano de emissões de Dióxido de Carbono.

Architecture					Cost	
			PV (kW)	Grid (kW)	Converter (kW)	NPC (\$)
						Initial capital (\$)
				9,999,999		\$5.50M
			3,935	9,999,999	3,935	\$5.40M
						\$594,526

Metric	Value
Present worth (\$)	\$101,962
Annual worth (\$/yr)	\$10,588
Return on investment (%)	7.7
Internal rate of return (%)	10.4
Simple payback (yr)	8.45
Discounted payback (yr)	15.48

Figura 17 - Resultados Econômicos a partir da Simulação do Cenário Forte

Fonte: Elaboração própria a partir do HOMER Pro

Os resultados da Figura 17 mostram que o sistema combinando painéis fotovoltaicos (3.935 kW) e rede da concessionária reduziu o Custo Presente Líquido

(NPC) de US\$ 5,50 milhões, no cenário de suprimento exclusivo pela rede, para US\$ 5,40 milhões, com investimento inicial de US\$ 594.526. O *payback* simples de 8,45 anos, o ROI de 7,7% e a TIR de 10,4% indicam retorno financeiro positivo ao longo da vida útil do sistema, com valor presente líquido positivo de US\$ 101.962 e retorno anual de US\$ 10.588.

Do ponto de vista ambiental, o sistema combinado de rede e painéis no Cenário Alternativo Forte apresentou 99.815 kg de emissões de CO₂ por ano, uma redução expressiva em relação ao uso exclusivo da rede elétrica, que resultaria em emissões significativamente maiores.

4.4 Comparação entre os Cenários

Com o objetivo de avaliar os impactos da eletrificação da frota de caminhões da mina, foram comparados três cenários: o Cenário de Referência (100% diesel), o Cenário Alternativo Gradual (Substituição de 11 caminhões com utilização do sistema fotovoltaico) e o Cenário Alternativo Forte (substituição total da frota por 26 caminhões elétricos com sistema fotovoltaico). Os principais indicadores serão discutidos a seguir.

A simulação apresenta alguns parâmetros importantes para realizar esta comparação. Foram utilizados 4 parâmetros para analisar os resultados:

- Custo Líquido Presente (NPC): Representa o custo total ao longo da vida útil do projeto;
- Custo de Operação (*Operating Cost*): Aponta o custo total por ano para que o sistema opere;
- *Simple Payback*: Demonstra o tempo (em anos) que o sistema se pagaria a partir do seu investimento inicial;
- Emissões de CO₂: Aponta a quantidade em quilos por ano de CO₂ emitido pelo sistema.

A Tabela 7 representa as informações obtidas na simulação de forma a possibilitar uma melhor análise dos cenários, as comparações entre os cenários graduais foram realizadas considerando a rede combinada com o sistema de painéis fotovoltaicos.

Tabela 7 – Comparação entre os Cenários

Parâmetros	Cenário Referência (100% Diesel)	Cenário Alternativo Gradual (50% diesel + 50% elétricos + PV)	Cenário Alternativo Forte (100% elétrico + PV)
Investimento de aquisição dos caminhões	\$33.800.000,00	\$179.330.470,00	\$324.342.590,00
Aquisição da estação de recarga	-	\$70.000,00	\$140.000,00
NPC	-	\$844.749,00	\$5.400.000,00
Custo de Operação	\$7.060.435,20	\$3.568.788,60	\$498.824,00
<i>Payback</i>	-	2,13	8,45
Emissões de CO ₂ (kg)	21.799.093,68	10.943.374,84	99.815

Fonte: Elaboração própria

O Cenário de Referência apresenta um investimento de aquisição de frota de US\$ 33.800.000,00 para 26 unidades do CAT 775G, considerando impostos e transporte, conforme dados fornecidos pela engenharia responsável pela gestão da frota. Contudo, é importante ressaltar que os caminhões a diesel já se encontram em operação na mina, sendo o valor utilizado apenas para fins comparativos. O Cenário Alternativo Gradual exige um investimento total de US\$ 179.400.470,00, composto pela aquisição de 13 caminhões elétricos SKT110E, aquisição dos 13 caminhões diesel e implantação do sistema fotovoltaico. O Cenário Alternativo Forte demanda US\$ 324.482.590,00, referentes à aquisição de 26 caminhões elétricos e ao sistema fotovoltaico.

A análise econômica do sistema fotovoltaico realizada com base no NPC apresentado na simulação indica que a utilização desse sistema demonstra atratividade financeira. No Cenário Alternativo Gradual, o NPC do sistema proposto foi de US\$ 844.749,00, com *payback* simples de 2,13 anos. No Cenário Alternativo Forte, o NPC foi de US\$ 5.400.000,00, com *payback* simples de 8,45 anos. Em relação ao custo operacional anual, o Cenário de Referência apresenta custo de US\$ 7.060.435,20, calculado com base no consumo médio de 28.287 litros de diesel mensais por caminhão ao preço de referência de US\$ 0,80/litro para a frota de 26 veículos. O Cenário Gradual reduziu esse custo para US\$ 3.568.788,60 ao ano, representando uma redução de 49,4% em relação ao Cenário de Referência. O Cenário Forte apresentou custo operacional de US\$ 498.824,00 por ano, uma redução de 92,9% em relação ao Cenário de Referência, representando uma economia anual de US\$ 6.561.611,20.

Do ponto de vista ambiental, o Cenário de Referência gerou emissões anuais de 21.799,09 toneladas de CO₂, provenientes exclusivamente da queima de diesel pela frota

de caminhões. Em 15 anos de operação, a frota a diesel emitiria mais de 326.986 toneladas de CO₂ lançadas na atmosfera.

O Cenário Alternativo Gradual reduz esse volume para 10.943,37 toneladas/ano, que representa menos -49,8% de emissões, resultado da combinação entre as emissões dos 13 caminhões a diesel ainda em operação e as emissões residuais associadas à energia elétrica consumida pelos 13 caminhões elétricos suprida por energia solar fotovoltaica. Trata-se de uma redução expressiva, mas que ainda mantém mais de 10.943 toneladas anuais de CO₂ associadas à operação da frota.

O Cenário Alternativo Forte, por sua vez, representa uma ruptura de outra magnitude: as emissões caem para apenas 99,82 toneladas por ano, o que representa uma redução de 99,5% em relação ao Cenário de Referência. Em termos práticos, isso significa eliminar anualmente mais de 21.699 toneladas de CO₂, transformando a frota de uma das maiores fontes de emissões da mina em uma operação praticamente neutra em carbono. Esse resultado alinha-se diretamente às metas climáticas estabelecidas pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris e às crescentes exigências de ESG impostas por investidores, reguladores e mercados internacionais ao setor de mineração (BRASIL, 2017).

Os resultados da simulação no HOMER Pro evidenciam que o sistema fotovoltaico apresenta excelente viabilidade econômica isoladamente, com *payback* simples de 2,13 anos no Cenário Alternativo Gradual e 8,45 anos no Cenário Alternativo Forte. No entanto, essa análise considera apenas o investimento no sistema de geração de energia, sem incorporar o custo de aquisição da frota elétrica. Para uma avaliação mais abrangente da decisão de eletrificação, é necessário considerar o *payback* real, que compara o investimento adicional necessário para migrar da frota a diesel para a frota elétrica com a economia operacional anual gerada pela substituição do combustível.

O investimento adicional corresponde à diferença entre o custo total de cada cenário elétrico e o custo de aquisição da frota diesel de referência (US\$ 33.800.000,00 para 26 unidades do CAT 775G). A economia operacional anual é obtida pela diferença entre o custo operacional do Cenário de Referência (US\$ 7.060.435,20/ano) e o custo operacional de cada cenário alternativo, resultando em US\$ 3.491.646,60/ano no Cenário Gradual e US\$ 6.561.611,20/ano no Cenário Forte. O *payback* real é então calculado dividindo-se o investimento adicional pela economia operacional anual. A Tabela 6 apresenta os resultados consolidados.

Tabela 8 - *Payback* real dos cenários de eletrificação

Parâmetro	Cenário Gradual	Cenário Forte
Investimento adicional em relação à frota diesel (US\$)	145.530.470,00	290.542.590,00
<i>Payback</i> real	41,7	44,3

Fonte: elaboração própria.

Os *paybacks* reais apurados, 41,7 anos no Cenário Gradual e 44,3 anos no Cenário Forte, evidenciam que a eletrificação da frota, no contexto atual de preços dos caminhões elétricos, não se justifica exclusivamente sob a perspectiva do retorno financeiro no curto e médio prazo.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise integrada dos três cenários mostra que a eletrificação da frota de caminhões de mineração, combinada com geração fotovoltaica, apresenta expressiva redução nos custos operacionais e nas emissões de CO₂ em comparação à operação tradicional a diesel. Embora o investimento inicial de aquisição da frota elétrica seja significativamente superior ao do Cenário de Referência, a redução nos custos operacionais e os ganhos ambientais obtidos justificam a análise da transição como uma estratégia de longo prazo para a operação da mina. O Cenário Alternativo Forte concentrou os melhores resultados do ponto de vista ambiental, com o menor custo operacional (-92,9% em relação ao Cenário de Referência), *payback* do sistema fotovoltaico de 8,45 anos e menor emissão de CO₂ (-99,5%), devendo ser considerado como o cenário-meta para a estratégia de longo prazo da operação da mina. O Cenário Alternativo Gradual, por sua vez, representa o caminho mais acessível para iniciar essa transição, com menor comprometimento de capital inicial, *payback* do sistema fotovoltaico de apenas 2,13 anos e ganhos imediatos e substanciais tanto nos custos operacionais quanto nas emissões de carbono, servindo como etapa intermediária natural rumo à eletrificação total da frota.

A análise do *payback* real complementa os resultados obtidos na simulação e revela uma dimensão importante da viabilidade econômica da eletrificação da frota. Ao incorporar o diferencial de investimento necessário para substituir toda a frota a diesel por caminhões elétricos, os horizontes de retorno se ampliam significativamente e resultam em *paybacks* reais de 41,7 e 44,3 anos sem a consideração de créditos de carbono. Esses resultados evidenciam que a eletrificação da frota de mineração, no contexto atual de preços dos caminhões elétricos, não se justifica exclusivamente sob a perspectiva do retorno financeiro no curto e médio prazo. A decisão de eletrificar deve, portanto, ser avaliada sob uma ótica estratégica de longo prazo, na qual os ganhos ambientais, redução de 49,8% das emissões no Cenário Gradual e de 99,5% no Cenário Forte em relação ao Cenário de Referência, a crescente pressão regulatória sobre o setor mineral e o potencial de monetização de emissões evitadas constituem os principais vetores que sustentam a transição energética da frota.

A partir das análises realizadas, e limitações identificadas ao longo do estudo e das perspectivas abertas pelos resultados obtidos, é sugerida pesquisas futuras para

garantir o sucesso da implantação desta tecnologia. É importante testar o desempenho do caminhão elétrico de forma prática, para verificar o desempenho em produtividade e performance comparada à frota atual de caminhões a diesel. A comparação entre os resultados simulados e os dados reais de operação representaria uma contribuição relevante para a literatura sobre eletrificação de frotas de mineração no Brasil.

A simulação realizada considerou a utilização da rede elétrica convencional como fonte complementar à geração fotovoltaica. Trabalhos futuros poderiam avaliar a viabilidade econômica e técnica para a utilização de baterias estacionárias, reduzindo a dependência da rede elétrica e as emissões associadas. A análise poderia ser conduzida no próprio HOMER Pro, com a adição do componente de bateria estacionária à simulação.

O modelo de recarga adotado neste trabalho é o convencional, que demanda parada do caminhão por aproximadamente 1 hora. Trabalhos futuros poderiam investigar a viabilidade técnica e econômica para a utilização de sistemas de troca rápida de baterias, que permitem a substituição completa das baterias em até 6 minutos, reduzindo drasticamente o tempo de parada para recarga e aumentando a disponibilidade operacional da frota, modelo já adotado comercialmente pela Sany, fabricante dos caminhões analisados neste estudo, por meio da estação de troca de baterias SY312 (SANY, 2024).

O mercado brasileiro de carbono encontra-se em fase de estruturação regulatória. A Lei nº 15.042/2024 instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), com operacionalização plena prevista para 2030. Segundo estimativas do governo federal, o preço da tonelada de CO₂ no SBCE pode iniciar em torno de US\$ 30,00 e atingir patamares próximos de US\$ 60,00 em fases posteriores (AGÊNCIA BRASIL, 2025). A redução de emissões de CO₂ obtida como resultado da eletrificação pode ser quantificada e convertida em créditos de carbono para mercados regulados. A Lei nº 15.042, sancionada em 12 de dezembro de 2024, institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e estabelece as bases para um mercado regulado de carbono no Brasil, no qual as emissões de gases poluentes podem se reverter em ativos financeiros negociáveis (BRASIL, 2024; XPI, 2024). Projetos voltados para a eletrificação de frotas e outras iniciativas de mitigação de carbono podem atrair recursos com condições diferenciadas, como juros mais baixos e prazos de pagamento alongados,

além de melhorar as condições de captação no mercado de capitais (CERQUEIRA, 2025). Trabalhos futuros poderiam avaliar o potencial de monetização dessas reduções de emissões no âmbito do SBCE, adicionando uma nova dimensão econômica à análise de viabilidade da eletrificação da frota de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Erro! Autoreferência de indicador não válida.. Caminhão 100% a biodiesel cruza o Brasil rumo à COP30 e comprova viabilidade da descarbonização no transporte. Brasília: ANATC, 15 mar. 2025. Disponível em: <https://anatc.com.br/caminhao-100-a-biodiesel-cruza-o-brasil-rumo-a-cop30-e-comprova-viabilidade-da-descarbonizacao-no-transporte002F>. Acesso em: 7 fev. 2026.

Erro! Autoreferência de indicador não válida. – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2023. São Paulo: ANFAVEA, 2023. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/anuarios/>. Acesso em: 28 jan. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Levantamento de preços de combustíveis: série histórica 2025.** Rio de Janeiro: ANP, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos>. Acesso em: 15 jul. 2026.

AGÊNCIA BRASIL. **Governo quer regulamentar mercado de carbono até fim de 2026.** Brasília: EBC, 2025. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2025-11/governo-quer-regulamentar-mercado-de-carbono-ate-fim-de-2026>. Acesso em: jun. 2026.

ALÉM DA ENERGIA. **Eletrificação pode contribuir para queda de 60% das emissões entre 2020 e 2050.** [S. l.], 18 maio 2023. Disponível em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/eletrificacao-pode-contribuir-para-queda-de-60-das-emissoes-entre-2020-e-2050/>. Acesso em: 7 fev. 2026.

ARAÚJO, Alice Fabiane de Almeida. **Uma revisão sobre a aplicabilidade da energia eólica e solar nas operações de processamento mineral.** 2022. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Catalão, Catalão, 2022.

ARAMENDIA, Emmanuel et al. Global energy consumption of the mineral mining industry: exploring the historical perspective and future pathways to 2060. **Global Environmental Change**, [s. l.], v. 83, art. 102745, nov. 2023. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2023.102745. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745>. Acesso em: 7 jan. 2026.

BACEN — BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Boletim Focus — Relatório de Mercado: 03 de julho de 2026.** Brasília: Banco Central do Brasil, 2026. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus/03072026>. Acesso em: jul. 2026.

BAJAY, S. V. Planejamento energético: necessidade, objetivo e metodologia. **Revista Brasileira de Energia**, [s. l.], v. 1, n. 1, 1990.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Descarbonização da indústria de base.** Rio de Janeiro: BNDES, 2024. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/publicacoes/livros/descarbonizacao-da-industria-de-base>. Acesso em: 7 fev. 2026.

BARROS, Gustavo. O desenvolvimento do setor siderúrgico brasileiro entre 1900 e 1940: criação de empresas e evolução da capacidade produtiva. **Heera – Revista de História Econômica & Economia Regional Aplicada**, v. 8, n. 14, p. 9–32, jun. 2013.

BATISTA, E. D. et al. Challenges to sustainability in the Brazilian mining sector. **AppliedMath**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 179, 2025. DOI: 10.3390/appliedmath5040179. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/appliedmath5040179>. Acesso em: 7 jan. 2026.

BHP. **Social value**. Melbourne: BHP, 2025. Disponível em: <https://www.bhp.com/about/operating-ethically/social-value>. Acesso em: 7 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm. Acesso em: 28 jan. 2026.

BRASIL. **Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil ao Acordo de Paris**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/clima/ndc>. Acesso em: 3 jan. 2026.

BRASIL. Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 5 jun. 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9073.htm. Acesso em: 20 jun. 2026.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 dez. 2024. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/115042.htm. Acesso em: 20 jun. 2026.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Degradação ambiental em Itabira**. [Fotografia]. Brasília: Câmara dos Deputados, 12 ago. 2019. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/a-camara/documentos-e-pesquisa/arquivo/sites-tematicos/mineracao/galeria-de-fotos/foto10.jpg/view>. Acesso em: 27 jan. 2026.

CARVALHO, P. S. L. et al. Panoramas setoriais: mudanças climáticas. Mineração. In: BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Panoramas setoriais 2030: mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: BNDES, 2016. p. 41–45.

CERQUEIRA, Adriana Rocha de. **Mercado de carbono: impactos da Lei 15.042/24 no SBCE em 2026**. [S. l.]: Rocha Cerqueira, 14 fev. 2025. Disponível em: <https://rochacerqueira.com.br/mercado-de-carbono-lei15042-24/>. Acesso em: 20 jun. 2026.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Mineração brasileira apresenta caminhos para redução de até**

90% de suas emissões de carbono até 2050. Rio de Janeiro: CEBDS, 22 jan. 2025. Disponível em: <https://cebds.org/release/mineracao-brasileira-apresenta-caminhos-para-reducao-de-ate-90-de-suas-emissoes-de-carbono-ate-2050/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. **Decision 1/CMA.5:** outcome of the first global stocktake. Dubai: UNFCCC, 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/637035>. Acesso em: 27 dez. 2025.

DELEIVINGNE, L. et al. **Climate risk and decarbonization:** what every mining CEO needs to know. [S. l.]: McKinsey & Company, 2020. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/climate-risk-and-decarbonization-what-every-mining-ceo-needs-to-know>. Acesso em: 7 jan. 2026.

DOMINGUES, G. F. História da mineração no território brasileiro: uma análise dos tratados políticos que legislam a atividade mineradora (1934–1967). **Revista de História Bilros:** história(s), sociedade(s) e cultura(s), [S. l.], v. 10, n. 20, p. 18, 2023. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/bilros/article/view/11279>. Acesso em: 26 jan. 2026.

EIA — U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Electric power sector CO2 emissions drop as generation mix shifts from coal to natural gas.** Washington: EIA, 2021. Disponível em: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=48296>. Acesso em: jun. 2026.

ELETROTRAFO. **Inversor solar 250 kW trifásico SG250HX-20 Sungrow.** [S. l.]: Eletrotrafo, 10 abr. 2025. Disponível em: <https://www.eletrotrafo.com.br/inversor-solar-250kw-trif-800v-sg250hx-20-sungrow-03820644/p>. Acesso em: 12 jun. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MME — MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Caderno de Eletromobilidade: estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032.** Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Eletromobilidade_PDE%202032_rev2.pdf. Acesso em: jun. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Motorizações alternativas em caminhões e ônibus no Brasil:** contextualização e possíveis trajetórias de inserção. Rio de Janeiro: EPE, 2023. (Nota Técnica NT-EPE-DPG-SDB-2023-02). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-782/NT-EPE-DPG-SDB-2023-02_Motoriza%C3%A7%C3%B5es%20alternativas%20na%20frota%20de%20caminh%C3%B5es%20e%20%C3%B4nibus_2023.pdf. Acesso em: 7 fev. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2026.** Brasília: EPE, 2026. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2026>. Acesso em: 15 jun. 2026.

ENEL. **Eletificação:** o que é, vantagens e aplicações. [S. l.]: Enel Group, 3 fev. 2025. Disponível em: <https://www.enel.com/pt/learning-hub/transicao-energetica/eletificacao>. Acesso em: 7 fev. 2026.

ENERGY SUSTAINABILITY DIRECTORY. **What is the typical lifespan of a utility-scale solar inverter and what are its replacement costs?** [S. l.]: Energy Sustainability Directory, 17 mar. 2025. Disponível em: <https://energy.sustainability-directory.com/learn/what-is-the-typical-lifespan-of-a-utility-scale-solar-inverter-and-what-are-its-replacement-costs/>. Acesso em: 16 jun. 2026.

FERREIRA, Ana Livia Machado. **Análise estatística do consumo energético da mineração e pelletização:** influência de fatores econômicos, sociais e ambientais. 2024. 44 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2024.

FGV EAESP — FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Programa Brasileiro GHG Protocol: ferramenta de cálculo de emissões de gases de efeito estufa.** São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade (FGVces), 2026. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 30 jun. 2026.

FIGUEIREDO, R. L.; SILVA, J. M. da; ORTIZ, C. E. A. A importância do hidrogênio na indústria de mineração como fonte de energia renovável. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 240–251, out. 2023. DOI: 10.24221/jeap.8.4.2023.5544.240-251. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/5544/482485072>. Acesso em: 9 jan. 2026.

FRAYSSINET, Loïc et al. Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, pt. 2, p. 2318–2327, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.040. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117309863>. Acesso em: 29 jan. 2026.

HEAVY VEHICLE INSPECTION. **Maximize mining fleet uptime with key benchmarks.** Sunnyvale: JRS Innovation Inc, 2024. Disponível em: <https://heavyvehicleinspection.com/fleet-management/uptime/mining-uptime-benchmark>. Acesso em: 12 jun. 2026.

HICI DIGITAL POWER TECHNOLOGY CO., LTD. **360kW Super Fast Charging System, Liquid Cooling Charging Station, EV Charger.** Wuhan: HICI, 2026. Disponível em: <https://hiconics-zn.en.made-in-china.com/product-list-1.html>. Acesso em: 15 jun. 2026.

IHU – INSTITUTO HUMANITAS UNISINOS. **Comunidades impactadas pela mineração convivem com falta d'água e cachoeiras que sangram.** São Leopoldo: IHU, 8 fev. 2019. Disponível em: <https://ihu.unisinos.br/categorias/586421-comunidades-impactadas-pela-mineracao-convivem-com-falta-d-agua-e-cachoeiras-que-sangram>. Acesso em: 1 maio 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Compromissos do setor mineral.** Brasília: IBRAM, 2025. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/11/IBRAM-compromissos-setor-mineral.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Indústria da mineração se compromete em reduzir suas emissões de GEE.** Brasília: IBRAM, 28 maio 2024. Disponível em: <https://minerabrasil.com.br/industria-da-mineracao-se-compromete-em-reduzir-suas-emissoes-de-gee/2024/05/28/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração em Números 2024.** Brasília: IBRAM, 2024. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/02/Mineracao-em-Numeros-2024-2.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração está presente na história do Brasil.** Brasília: IBRAM, 5 nov. 2021. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/mineracao-esta-presente-na-historia-do-brasil>. Acesso em: 26 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Minerais críticos e estratégicos no Brasil: um passaporte para o futuro.** Brasília: IBRAM, 2025. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/10/IBRAM_MINERAIS-CRITICOS-E-ESTRATEGICOS-NO-BRASIL_WEB.pdf. Acesso em: 27 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **IBRAM: impacto de tarifas sobre exportações do Brasil pelos EUA.** Brasília: IBRAM, 11 jul. 2025. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/ibram-impacto-de-tarifas-sobre-exportacoes-do-brasil-pelos-eua/>. Acesso em: 7 jan. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The role of gas in today's energy transitions.** Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-gas-in-todays-energy-transitions>. Acesso em: 7 fev. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global Warming of 1.5°C: an IPCC special report.** Geneva: IPCC, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 27 dez. 2025.

IRAMINA, W. S.; TACHIBANA, A.; SILVA, G. A.; ESTON, S. M. Análise de acidentes do trabalho na mineração de pedra britada no estado de São Paulo. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 4, p. 503-508, out./dez. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/zvsvdHKwHnKSR3CSdgCXvPKJ/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 20 jan. 2026.

IRMEN SANY. **Caminhão SKT110E.** Belo Horizonte: IRMEN, 2024. Disponível em: <https://irmen.com.br/maquina/caminhao-skt110e/>. Acesso em: 3 jun. 2026.

LENOIR, Natália Fernanda. **Opencast Mowing Methods.** 2019. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Faculdade Pitágoras, Belo Horizonte, 2019.

LUXEN SOLAR ENERGY CO., LTD. **Datasheet: LNET-710ND — 710W N-Type Bifacial Dual Glass.** Changzhou: Luxen Solar, 2025. Disponível em: <https://luxensolar.com/wp-content/uploads/2025/01/LUXEN-M12-132-LNET-710N-DG-2384-1303-35.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2026.

MARTÍNEZ, Daniel M.; EBENHACK, Ben W.; WAGNER, Travis P. Electric power sector energy efficiency. In: MARTÍNEZ, Daniel M.; EBENHACK, Ben W.; WAGNER, Travis P. (ed.). **Energy efficiency**. Amsterdam: Elsevier, 2019. p. 129–160. DOI: 10.1016/B978-0-12-812111-5.00005-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128121115000056>. Acesso em: 27 jan. 2026.

MINING MONTHLY. Electric trucks cost up to 33% more than their diesel counterparts, study finds. **Mining Monthly**, [S. l.], 14 set. 2023. Disponível em: <https://www.miningmonthly.com/fleets/news/1460452/electric-trucks-cost-diesel-counterparts-study>. Acesso em: 25 jun. 2026.

MOEEN, Muhammad Saad; JUPESTA, Joni; HANAOKA, Tatsuya. Integrated energy planning: review of global practices for energy security and Paris Agreement implementation in Pakistan. **Energy Nexus**, [s. l.], v. 18, art. 100413, 2025. DOI: 10.1016/j.nexus.2025.100413. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125000543>. Acesso em: 7 jan. 2026.

NEOSOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico 710W Bifacial Luxen LNET-710ND**. 2025. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-710w-luxen-lnet-710-nd.html>. Acesso em: 30 jun. 2026

NORGATE, T.; HAQUE, N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 3, p. 266–274, 2010. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.09.020.

NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Annual Technology Baseline 2024: utility-scale PV**. Golden: NREL, 2024. Disponível em: https://atb.nrel.gov/electricity/2024b/utility-scale_pv. Acesso em: 20 jun. 2026.

OLIVEIRA, César Augusto Rolim de. **A história da mineração de ferro em Minas Gerais e a criação do Vale do Aço**. Belo Horizonte: SEMOPBH, 2017. 13 p. Disponível em: <https://semopbh.com.br/uploads/pdf/2017%2012%2020%20Hist%C3%B3ria%20da%20minera%C3%A7%C3%A3o%20de%20ferro%20em%20Minas%20Gerais.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2026.

REZENDE, Vanessa Leite. Mining in Minas Gerais: an analysis of its expansion and the environmental and social impacts caused by decades of exploration. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 28, n. 3, 2016. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/33988>. Acesso em: 7 jan. 2026.

SANY GROUP. **SANY Elétrica em Mobility Live ME**. 2024. Disponível em: https://www.sanyglobal.com/pt/press_releases/2663/. Acesso em: 30 jun. 2026.

SANY ÍNDIA. **SKT110E**. 2026. Disponível em: <https://www.sany.in/mining-machinery/mining-dump-trucks/skt110e/>. Acesso em: 12 jul. 2026.

SOYSTER, A. L.; EYNON, R. T. The conceptual basis of the electric utility sub-model of Project Independence Evaluation System. In: CHERN, M. S. et al. (ed.). **Energy modelling studies and conservation**. Oxford: Pergamon, 1982. p. 417–429. DOI: 10.1016/B978-0-08-027416-4.50038-7. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080274164500387>. Acesso em: 8 abr. 2026.

SUNGROW POWER SUPPLY CO., LTD. **Datasheet: SG250HX multi-MPPT string inverter for 1500 Vdc system**. Hefei: Sungrow, 2020. Disponível em: https://en.sungrowpower.com/upload/file/20210108/DS_20201121_SG250HX%20Data sheet_V1.5.4_EN.pdf.pdf. Acesso em: 12 jun. 2026.

TRACTAFRIC EQUIPMENT. **Caminhões fora de estrada CAT® 775G**. [2026]. Disponível em: <https://www.tractafric-equipment.com/en/machine/cat/191/off-highway-trucks/775g.html>. Acesso em: 12 jul. 2026

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Paris Agreement**. Paris: UNFCCC, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. Acesso em: 27 dez. 2025.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Energia e Ambiente. **Estratégias e impactos da descarbonização para o desenvolvimento sustentável**. São Paulo: IEE-USP, 28 ago. 2024. Disponível em: <https://www.iee.usp.br/noticia/estrategias-e-impactos-da-descarbonizacao-para-o-desenvolvimento-sustentavel/>. Acesso em: 7 fev. 2026.

VALE. **Energia**. Rio de Janeiro: Vale, 10 jan. 2025. Disponível em: <https://vale.com/pt/energia>. Acesso em: 7 jan. 2026.

VALE. **Estratégia e gestão para descarbonização**. Rio de Janeiro: Vale, 2024. Disponível em: <https://vale.com/pt/esg/estrategia-e-gestao-para-descarbonizacao>. Acesso em: 7 jan. 2026.

VALE. **Vale avança na agenda do clima e anuncia US\$ 2 bilhões para reduzir emissões de carbono nos próximos 10 anos**. Rio de Janeiro: Vale, 2020. Disponível em: <https://saladeimprensa.vale.com/pt/w/vale-avanca-na-agenda-do-clima-e-anuncia-usdollar-2-bi-para-reduzir-emissoes-de-carbono-nos-proximos-10-anos>. Acesso em: 26 jan. 2026.

VALE. **Vale avança nos testes com alternativas aos combustíveis fósseis para caminhões fora de estrada**. Rio de Janeiro: Vale, 22 abr. 2025. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-avanca-nos-testes-com-alternativas-aos-combustiveis-fosseis-para-caminhoes-fora-de-estrada/-/categories/985604>. Acesso em: 7 fev. 2026.

VILLAS BÔAS, A. L. **Mineração e desenvolvimento econômico: a questão nacional nas estratégias de desenvolvimento do setor mineral (1930–1964)**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1995. v. 1. (Série Estudos e Documentos, 29).

WANG, Qun et al. Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost. **Sustainable Energy Technologies and**

Assessments, v. 43, p. 100977, 2021. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100977. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138820314053>. Acesso em: 27 jan. 2026.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO Greenhouse Gas Bulletin**: no. 20. Geneva: WMO, 2024. Disponível em: <https://www.unclearn.org/resources/library/wmo-greenhouse-gas-bulletin-no-20/>. Acesso em: 7 jan. 2026.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **State of the Global Climate 2024**. Geneva: WMO, 2024. Disponível em: <https://library.wmo.int/idurl/4/69455>. Acesso em: 7 jan. 2026.

XPI INVESTIMENTOS. **Mercado de carbono**: o que é e o que muda no Brasil após a Lei nº 15.042. [S. l.]: XP Investimentos, 19 dez. 2024. Disponível em: <https://conteudos.xpi.com.br/esg/credito-carbono-mercado-brasil/>. Acesso em: 15 jun. 2026.

ANEXO I – Dados Sobre os Caminhões da Atual Frota a Diesel

Equipamento	Horas Trabalhadas (Mês)	Média de Horas Trabalhadas (Dia)	Km rodados (Mês)	Média de km (Dia)
C00	239	7,97	7,170	239
C01	286	9,53	8.580	286
C02	256	8,53	7.680	256
C03	280	9,33	8.400	280
C04	288	9,60	8.640	288
C05	258	8,60	7.740	258
C06	234	7,80	7.020	234
C07	248	8,27	7.440	248
C08	264	8,80	7.920	264
C09	263	8,77	7.890	263
C10	257	8,57	7.710	257
C11	290	9,67	8.700	290
C12	282	9,40	8.460	282
C13	285	9,50	8.550	285
C14	251	8,37	7.530	251
C15	262	8,73	7.860	262
C16	254	8,47	7.620	254
C17	269	8,97	8.070	269
C18	289	9,63	8.670	289
C19	290	9,67	8.700	290
C20	245	8,17	7.350	245
C21	264	8,80	7.920	264
C22	240	8,00	7.200	240
C23	250	8,33	7.500	250
C24	240	8,00	7.200	240
C25	280	9,33	8.400	280