



## **Pegada de carbono do níquel produzido no Brasil**

### **Carbon footprint of nickel produced in Brazil**

### **Huella de carbono del níquel producido en Brasil**

DOI: 10.55905/rdelosv17.n53-018

Originals received: 02/01/2024

Acceptance for publication: 03/01/2024

#### **Marisa Nascimento**

Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE - UFRJ)

Instituição: Centro de Tecnologia Mineral

Endereço: Rio de Janeiro – RJ, Brasil

E-mail: marisa@cetem.gov.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7485-7750>

#### **Paulo Sergio Moreira Soares**

Doutora em Processos Químicos e Bioquímicos pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (EQ - UFRJ)

Instituição: Centro de Tecnologia Mineral

Endereço: Rio de Janeiro – RJ, Brasil

E-mail: psoares@cetem.gov.br

#### **RESUMO**

O Brasil possui potencial geológico e tecnológico para produção de bens minerais críticos, entre os quais o níquel que possui inúmeras aplicações em produtos de elevado conteúdo tecnológico, e para o qual se espera uma demanda crescente em futuro próximo. Assim, é de grande importância examinar sua contribuição, para o GWP-100 (Potencial de aquecimento global com um horizonte de 100 anos), ao longo dos processos de produção deste metal, o que pode ser avaliado pela sua Pegada de Carbono. Presentemente, o Brasil produz concentrados de minério de níquel e ligas ferro-níquel. O trabalho teve como objetivo, com base na Especificação Técnica ABNT ISO/TS 14067, calcular a Pegada de Carbono associada à produção de 1t de níquel contido em produtos primários desse metal produzido no Brasil. A Pegada de Carbono total do níquel produzido no país foi estimada em 28,2 mil kg de CO<sub>2eq</sub>. As emissões para GWP100-fóssil foram contabilizadas como 27,1 mil kg de CO<sub>2eq</sub>/t de Ni contido. Destas, cerca de 11,7 mil kg de CO<sub>2eq</sub> podem ser atribuídas à etapa de pirometalurgia. A contribuição para o GWP100-biogênico foi estimada em 5,54 mil kg de CO<sub>2eq</sub>/t de Ni contido, enquanto aquela associada às mudanças no uso do solo contabilizou 590 kg de CO<sub>2eq</sub>. Estimou-se ainda uma remoção pelo sistema de 5,01 mil kg de CO<sub>2eq</sub>/t de Ni contido. A eventual substituição de fontes de geração de energia elétrica, que alimenta o sistema, pode acarretar uma redução de até 23,4% na Pegada de Carbono do metal.



**Palavras-chave:** pegada de carbono, níquel, FeNi, lateritas, minérios sulfetados.

#### **ABSTRACT**

Brazil has both geological and technological potential for producing critical mineral resources, including nickel, which has numerous applications in high-tech products. There's an expected surge in demand for nickel in the near future. Therefore, it's crucial to examine its contribution to the GWP-100 (Global Warming Potential over a 100-year horizon) throughout the production processes, which can be assessed by its Carbon Footprint. Currently, Brazil produces nickel ore concentrates and ferro-nickel alloys. Based on the ABNT ISO/TS 14067 Technical Specification, the aim of the study was to calculate the Carbon Footprint associated with producing 1 ton of nickel contained in primary products of this metal in Brazil. The total Carbon Footprint of nickel produced in the country was estimated at 28.2 thousand kg of CO<sub>2eq</sub>. Emissions for GWP100-fossil were accounted for as 27.1 thousand kg of CO<sub>2eq</sub> per ton of contained Ni. Of these, approximately 11.7 thousand kg of CO<sub>2eq</sub> can be attributed to the pyrometallurgy stage. The contribution to GWP100-biogenic was estimated at 5.54 thousand kg of CO<sub>2eq</sub> per ton of contained Ni, while changes in land use accounted for 590 kg of CO<sub>2eq</sub>. Additionally, an uptake of 5.01 thousand kg of CO<sub>2eq</sub> per ton of contained Ni was estimated. A potential substitution of electricity generation sources that supply the system could lead to a reduction of up to about 23.4% in the metal's Carbon Footprint.

**Keywords:** carbon footprint, nickel, FeNi, laterites, sulfide ores.

#### **RESUMEN**

Brasil tiene potencial geológico y tecnológico para la producción de bienes minerales críticos, entre ellos el níquel, que tiene innumerables aplicaciones en productos con un alto contenido tecnológico, y para los cuales se espera una creciente demanda en el futuro cercano. Así, es de gran importancia examinar su contribución al GWP-100 (Potencial de Calentamiento Global con un horizonte de 100 años) a lo largo de los procesos de producción de este metal, que puede ser evaluado por su Huella de Carbono. El Brasil produce actualmente concentrados de mineral de níquel y aleaciones de ferroníquel. El trabajo tuvo como objetivo, basado en la Especificación Técnica ABNT ISO/TS 14067, calcular la Huella de Carbono asociada a la producción de 1t de níquel contenido en productos primarios de este metal producido en Brasil. La huella total de níquel y carbono producida en el país se estimó en 28.200 kg de CO<sub>2eq</sub>. Las emisiones de GWP100-fósil se contabilizaron como 27.100 kg de CO<sub>2eq</sub>/t de Ni contenido. De ellos, unos 11.700 kg de CO<sub>2eq</sub> pueden atribuirse a la etapa de pirometalurgia. La contribución al GWP100 biogénico se estimó en 5,54 mil kg de CO<sub>2eq</sub>/t de Ni contenido, mientras que la asociada a los cambios en el uso del suelo representó 590 kg de CO<sub>2eq</sub>. También se estimó que el sistema eliminó 5,01 mil kg de CO<sub>2eq</sub>/t de Ni contenido. La posible sustitución de fuentes de generación de energía eléctrica, que alimenta el sistema, puede provocar una reducción de hasta el 23,4% en la huella de carbono del metal.

**Palabras clave:** huella de carbono, níquel, FeNi, lateritas, minerales de sulfuro.



## 1 INTRODUÇÃO

O níquel é considerado um bem mineral estratégico para o País e tem aplicação em produtos e processos de alta tecnologia e no desenvolvimento de produtos associados à transição energética e à economia de baixo carbono como as baterias automotivas e na geração de hidrogênio (IEA, 2021b).

Adicionalmente, os compromissos firmados por diversos países com a redução das emissões de GEE (IEA, 2021a) resultaram em uma corrida global e pressão crescente sobre as cadeias de suprimento de minerais estratégicos, que deverão atender a um mercado com demanda crescente nas próximas décadas. Para atender a essa demanda é previsto, no caso do níquel, o aumento da atual produção mundial de 200 mil toneladas métricas (kt) para cerca de 40 Mt até 2050 (Lee & Glynn, 2023).

O Brasil tem efetivo potencial para ser um fornecedor relevante de recursos minerais para a transição energética. O país possui depósitos importantes desses recursos e suas características geológicas são favoráveis ao aumento da produção. As reservas brasileiras de níquel, por exemplo, são estimadas em cerca de 16 Mt, o que corresponde a 17% das reservas mundiais (Ferreira da Silva et al., 2023).

Por outro lado, é necessário avaliar também as emissões de GEE associadas à produção desse metal, e sua contribuição para as mudanças climáticas. A etapa pirometalúrgica da produção da liga FeNi, por exemplo, é bastante intensiva em energia, o que pode contribuir negativamente para o aumento das emissões de GEE. Assim, a análise das características das fontes e do consumo de energia, e a relação destas com as emissões de GEE nos diversos processos produtivos do metal, desde as matérias primas, é particularmente importante (Adiansyah, 2021; Eckelman, 2010).

O níquel ocorre comumente em minérios lateríticos ou sulfetados e, apesar de cerca de 70% dos recursos minerais globais de níquel se encontrarem na forma de lateritas, os minérios sulfetados são responsáveis pela produção de cerca de 60% dos produtos primários do metal em escala mundial. Isto se deve a diversos fatores, entre os quais, ao fato de que lateritas não são suscetíveis a processos de concentração como, por exemplo, a flotação empregada para minérios sulfetados. As dificuldades de concentração podem assim reduzir a atratividade econômica de um depósito laterítico de níquel. Por outro lado, o cobalto presente nesse depósito e a



possibilidade de obtê-lo como coproduto da produção de níquel podem contribuir para tornar atraente sua exploração (Norgate & Jahanshahi, 2011).

No Brasil, diversos projetos para produção de níquel se encontram em desenvolvimento com diferentes graus de avanço (Heider, 2022; Nascimento & Soares, 2019), o que evidencia a importância e atualidade dos estudos para avaliar a nível nacional os impactos da operação da cadeia produtiva deste metal sobre as mudanças climáticas.

O Brasil produz níquel presentemente na forma de dois produtos: como um concentrado de minério sulfetado com teor da ordem de 14% que se destina à exportação e, como uma liga FeNi com teor médio da ordem de 26% do metal, destinada tanto ao mercado interno quanto à exportação.

As características de cada minério influenciam a demanda de energia e materiais e as emissões de GEE na lavra e nos estágios subsequentes de processamento, além de condicionar as características de coprodutos, rejeitos e efluentes.

As emissões atmosféricas de GEE na produção de FeNi por exemplo, são objeto frequente de estudo (Haque & Norgate, 2013), assim como as mudanças climáticas (Mistry et al., 2016; Norgate & Jahanshahi, 2011) dentre outras categorias de impacto ambiental associadas à produção do metal (Bartzas & Komnitsas, 2015; Khoo et al., 2017).

As emissões de GEE são em geral, inventariadas pelas corporações segundo três escopos conforme proposto pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC (IPCC, 2006a): o escopo 1 que compreende as emissões diretas de fontes pertencentes à empresa ou por ela controladas, o escopo 2 que corresponde as emissões indiretas de eletricidade adquirida e, o escopo 3 que abrange todas as outras emissões indiretas que são consequência das atividades da empresa, mas ocorrem a partir de fontes que não pertencem ou não são por ela controladas. Essa é também a metodologia utilizada em diversas iniciativas empresariais de contabilidade e publicação de emissões de GEE como, por exemplo, o GHG Protocol (FGV & WRI, 2023). Esta contabilidade tem se tornado progressivamente mais importante, uma vez que é frequentemente incorporada às declarações ambientais de produtos (DAP) ou exigida em operações comerciais de importação e exportação.

As emissões atmosféricas de GEE de um produto de níquel podem também ser expressas como *Pegada de Carbono* e sua determinação tem como base a contabilidade de emissões de sete gases listados no Protocolo de Kyoto: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido



nitroso ( $N_2O$ ), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs), hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ) e trifluoreto de nitrogênio ( $NF_3$ )(EIB, 2023).

A *Pegada de Carbono* é um relevante indicador para avaliação dos impactos ambientais e para a identificação de oportunidades de aperfeiçoamento dos processos industriais de produção de níquel. Ele é particularmente importante também para avaliação dos impactos ambientais associados à fabricação de inúmeros produtos que tem o níquel como constituinte, entre estes os aços inoxidáveis e os veículos elétricos. Aços inoxidáveis, com aplicações que incluem a utilização em ambientes quimicamente agressivos, são produzidos com a adição de ligas de níquel cujas emissões de GEE podem variar bastante em função de seu processo de fabricação. Veículos elétricos, por sua vez, que podem contribuir para alcançar a sustentabilidade no transporte de cargas e passageiros, utilizam baterias que tem níquel como componente. Uma bateria NMC 111 de 60 kWh, por exemplo, bastante usual nesses veículos, contém entre 15 e 30 kg de níquel (Campagnol et al., 2017). A pegada de carbono do níquel, portanto, afeta a pegada de carbono dos produtos desse metal ao longo de todo o seu ciclo de vida.

No Brasil, o cálculo, os princípios, os requisitos e as orientações para a quantificação e comunicação da Pegada de Carbono são tratados em especificação técnica própria, que tem como base as emissões e remoções de cada GEE no ciclo de vida de um produto. A especificação orienta também que o cálculo do potencial de impacto do GEE sobre as mudanças climáticas, expresso em unidades de  $kg\ CO_{2eq}$ , seja realizado pela multiplicação da massa de cada GEE, liberada ou removida, pelo GWP de 100 anos. A Pegada de Carbono é então a soma desses impactos potenciais (ABNT, 2015).

O presente trabalho teve como objetivo a contabilidade da *Pegada de Carbono* do níquel contido nos produtos primários do metal fabricados no Brasil: concentrado mineral de níquel e liga FeNi. Adicionalmente, o trabalho propôs o exame das etapas de processamento do metal quanto às emissões de GEE. Examinou ainda o papel de fontes de geração de eletricidade mais limpas como eólica e solar, que alimentam o sistema de produto, sobre a pegada de carbono do níquel.

## **2 PRODUTOS PRIMÁRIOS DE NÍQUEL NO BRASIL**

Em 2021 a lavra no país foi essencialmente realizada em quatro minas. Estas, foram operadas por três empresas, AngloAmerican Níquel Brasil, localizada no estado de Goiás e que



respondeu por 54,9 % da produção nacional como Ni contido; Vale no estado do Pará, que respondeu por 25,1% da produção; e Atlantic Nickel Mineração, no estado da Bahia que respondeu por 20 % da produção.

A Tabela 1 apresenta as principais informações sobre a produção brasileira. Em 2021, o Brasil produziu cerca de 12,5 Mt de ROM que corresponderam a 342 mil toneladas de produtos primários de níquel.

Tabela 1. Produção Mineral de Níquel – ROM e Produto Beneficiado no ano de 2021.

Estado	Produção de ROM (t)	Níquel Contido (t)	Teor (%)	Produção Beneficiada (t)	Níquel Contido (t)	Teor (%)
Goiás	3.519.592	47.813	1,36	159.992	41.734	26,09
Pará	2.647.640	40.183	1,52	73.855	19.075	25,83
Bahia	6.281.020	31.531	0,50	108.421	15.179	14,00

Fonte: (ANM, 2023)

A Atlantic Nickel, comercializa um concentrado mineral, produzido a partir do minério sulfetado da Mina Santa Rita, em Itagibá-BA. É estimado um depósito de 58,5 Mt com um teor médio de 0,33%, resultando em 193 mil toneladas de Ni contido (Deloitte, 2022). O minério lavrado alimenta uma planta de beneficiamento localizada a 140 km do Porto de Ilhéus (BA), onde a produção é exportada. A expectativa atual de vida da mina é de aproximadamente 10 anos, tendo como base as atuais reservas de minério (Atlantic Nickel, 2023).

O processo de lavra ocorre em mina a céu aberto e se inicia com o desmonte da rocha com explosivos. A seguir, o minério é transportado de caminhões para a planta de beneficiamento. Britadores primários, cônicos e de mandíbula são alimentados e o produto da britagem primária é transportado para uma pilha pulmão. O material da pilha é então conduzido por correias transportadoras para o circuito de moagem composto por moinho SAG-semi autógeno, britadores cônicos secundários e moinhos de bolas. O produto da moagem é transferido para hidrociclones e a seguir para um circuito de flotação. A recuperação metalúrgica média da planta é de 58% para níquel e o concentrado final tem teores entre 13 e 15 % (Contessotto, 2017; dos Santos Junior & Delboni Júnior, 2016).

Segundo a ANM, as operações de níquel na Bahia, produziram em 2021 cerca de 6,3 Mt de ROM que geraram aproximadamente 108 kt de concentrado mineral sulfetado, o que equivaliu a 15,2 kt de Ni contido (ANM, 2023). Em 2022 foram lavrados 6,6 Mt de minério, o que gerou cerca de 30,6 Mt de estéril. O minério que alimentou a usina apresentava teor médio



de 0,30 % de níquel. Cerca de 117 kt de concentrado foram produzidas nesse ano com percentual médio de 13,6 % níquel (Atlantic Nickel, 2023; BA de valor, 2023).

A Vale produz liga FeNi em sua unidade de Onça-Puma, localizada em Ourilândia do Norte no estado do Pará. Em Onça-Puma, o minério processado via rota pirometalúrgica é o saprolítico, para a produção da liga FeNi que é utilizada como insumo na indústria de aço inoxidável.

A reserva de minério em Onça-Puma é de aproximadamente 106 Mt, com teor médio de níquel de 1,53 % e vida útil estimada de 46 anos. A mineração ocorre a céu aberto e o desmonte na lavra é realizado por explosivos e escavadeiras. O minério lavrado é transportado por caminhões e pás-carregadeiras até uma usina de britagem a 16 km de distância. Depois de britado, o minério é encaminhado para a usina metalúrgica que consiste da tecnologia *RKEF* – *Rotary Kiln Electric Furnace* (forno rotativo e forno elétrico de redução) (Brandt, 2004; Cruz, 2020).

De acordo com a ANM, as operações de níquel no Pará, produziram em 2021 cerca de 2,6 Mt de ROM que geraram aproximadamente 74 kt de liga FeNi, equivalentes a 19,07 kt de Ni contido (ANM, 2023).

A AngloAmerican opera duas unidades, Barro Alto e Codemin, ambas localizadas no estado de Goiás. O depósito de minério laterítico em Barro Alto tem reservas estimadas de 42,9 Mt ROM (1,29 % Ni) com vida útil de 19 anos. Na Codemin, as reservas são estimadas em 6,2 Mt ROM (1,24 % Ni) com vida útil de 13 anos (AngloAmerican, 2022). Ambas as minas operam lavra a céu aberto.

O processo industrial em Barro Alto é composto pelas etapas de britagem, homogeneização, secagem, calcinação, redução e refino. A tecnologia metalúrgica utilizada para a redução e o refino do minério de níquel laterítico é a pirometalurgia em fornos elétricos (RKEF) para a produção de liga FeNi.

O minério preparado em Barro Alto também alimenta, parcialmente, a planta industrial da Codemin em Niquelândia – GO. A tecnologia metalúrgica é similar à operada em Barro Alto (Alves et al., 2020; Guimarães, 2019).

As operações de níquel em Goiás, produziram em 2021, em conjunto, cerca de 3,5 Mt de ROM que geraram aproximadamente 160 kt de liga FeNi, equivalentes a 41,73 kt de Ni contido (ANM, 2023).



### 3 METODOLOGIA

Para o cálculo da Pegada de Carbono do níquel contido nos produtos primários do metal produzidos no Brasil, a especificação técnica ISO/TS 14067 da ABNT foi utilizada como referência.

O método de avaliação foi o *IPCC 2021 GWP100*, empregando o Software Simapro versão 9.5.

Os resultados de Pegada de Carbono foram reportados cumulativamente como GWP100 total, incluindo CO<sub>2</sub> biogênico e também por categoria (ABNT, 2015; IPCC, 2021; PRé Sustainability, 2021) da seguinte forma:

- GWP100 - fóssil: emissões de GEE provenientes de fontes e depósitos de carbono fóssil;
- GWP100 - biogênico: emissões de GEE provenientes de fontes e depósitos de carbono biogênico;
- GWP100 – mudança no uso do solo: emissões de GEE resultantes de transformação da terra e;
- GWP100 - remoção de CO<sub>2eq</sub>: remoções de GEE.

Os dois únicos produtos primários de níquel fabricados no País e considerados no presente estudo foram:

- concentrado mineral produzido a partir de minério sulfetado;
- ligas FeNi produzidas a partir de minérios lateríticos.

A unidade funcional empregada, que permitiu a contabilidade e normalização das entradas e saídas de matérias primas e energia, foi 1 t de níquel contido no produto. Não foram incluídas no estudo as emissões de GEE associadas à produção de coprodutos.

Baseado na média dos dados do Inventário de Ciclo de Vida – ICV realizado neste trabalho, o fluxo de referência adotado foi de 1 t de Ni contido considerando:

- 0,2t de Ni contido em 1,43 t de concentrado de níquel (teor de 14%);
- 0,8t de Ni contido em 3,08 t de liga FeNi (teor de 26,01%).

O estudo abordou as etapas de produção, a partir das matérias-primas minerais em seu “berço” até o produto final colocado no “portão da fábrica”. Não foram incluídas etapas à jusante da cadeia produtiva como as de produção de outros produtos semiacabados ou acabados de Ni, seus usos e fim de vida e/ou recuperação/reciclagem. Foram também excluídos a geração e o

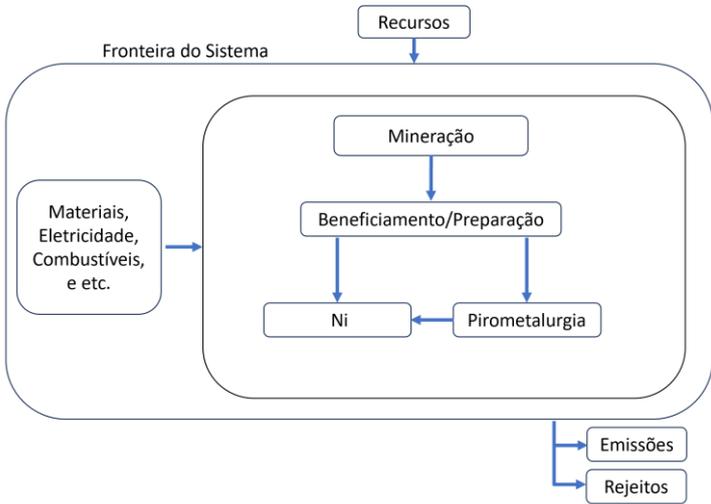


tratamento de drenagem ácida de mina, a embalagem de materiais e produtos, o transporte de materiais, combustíveis e resíduos, a construção e descomissionamento da infraestrutura física, de equipamentos e de veículos.

O escopo geográfico do estudo foi o Brasil que produz atualmente 3,6% do níquel mundial e detém cerca de 17% das reservas do planeta, definidas como a quantidade de níquel que pode ser economicamente extraída ou produzida. O país tem reservas estimadas de 2Mt de níquel contido na forma de sulfetos e 15 Mt de níquel contido na forma de lateritas (Deloitte, 2022).

O modelo adotado para o sistema de produto é apresentado na Figura 1. A fronteira do sistema inclui as principais etapas da produção brasileira desde a mineração de minérios sulfetados e lateríticos, passando pelas etapas de beneficiamento/preparação mineral e, no caso do minério laterítico, a etapa de processamento pirometalúrgico (*foreground*). Foram também consideradas as etapas auxiliares de produção das matérias primas, combustíveis e energia (*background*).

Figura 1. Sistema de Produto



Fonte: material original dos autores.

Para a elaboração do Inventário do Ciclo de Vida - ICV, os dados diretos foram obtidos a partir de informações empresariais disponíveis publicamente e a seguir compostos para representar as informações médias operacionais das instalações que operam no Brasil. Quando esses dados não eram disponíveis, foram adotados dados médios regionais ou globais.



O inventário refere-se ao ano de 2021 que corresponde ao período de maior disponibilidade de dados. Na ausência desses, foram adotados aqueles mais recentes disponíveis.

Os dados de entrada e saída a montante da cadeia produtiva na Figura 1, referentes por exemplo, à produção de combustíveis, eletricidade e materiais, foram considerados indiretos (*background*) e foram obtidos a partir dos bancos de Dados Ecoinvent 3.7 ou Agri-footprint 4.0, buscando respeitar a cobertura geográfica brasileira.

A tecnologia coberta no estudo, como representado no sistema de produto, incluiu os processos elementares **Mineração** e a seguir o **Beneficiamento/Preparação** dos minérios sulfetados e lateríticos. No caso do laterítico, o minério preparado segue para a etapa (processo elementar) de **Pirometalurgia** para a produção da liga FeNi.

O processo elementar **Mineração** tem início com o minério de níquel na mina, e termina com o ROM lavrado a ser enviado ao **Beneficiamento/Preparação**. Esta etapa inicia com o ROM lavrado e termina com o minério tratado que é colocado no portão da unidade de beneficiamento/preparação e exportado como produto final (beneficiado sulfetado) ou alimenta a **Pirometalurgia** (preparado laterítico). Esta última etapa se inicia com o minério preparado e termina com a produção da liga FeNi colocada no portão da fábrica.

Para os dados de ocupação do solo, foram consideradas as áreas superficiais dos terrenos das mineradoras, incluindo as de lavra, beneficiamento, metalurgia, escritórios, oficinas e áreas de preservação (área de concessão).

Quando não disponíveis na literatura consultada, as emissões atmosféricas foram estimadas utilizando a metodologia descrita nos relatórios do IPCC, e corresponderam ao total das emissões, principalmente relativas ao consumo de combustíveis e detonação de explosivos.

Para a combustão de Diesel foram considerados os seguintes fatores de emissão (IPCC, 2006b):

$\text{CO}_2 = 74.100 \text{ kg/TJ};$

$\text{CH}_4 = 4,15 \text{ kg/TJ};$

$\text{N}_2\text{O} = 28,6 \text{ kg/TJ};$

e adotados o poder calorífico de 10.100 kcal/kg de diesel e a densidade de 840 g/L (EPE, 2021).

Foi estimada a emissão de 0,17 t  $\text{CO}_2$  por tonelada de explosivo detonado (ANFO/emulsão) (GHG Protocol, 2016). O valor é semelhante ao reportado na literatura para



outros estudos no Brasil (da Silva et al., 2018). O Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM estimou a emissão de 9.825,47 t CO<sub>2eq</sub> na detonação de explosivos para a produção brasileira de 18,42 Mt de ROM de Ni (IBRAM, 2014).

Foi realizada uma análise da sensibilidade das emissões de CO<sub>2eq</sub> quanto à composição e tipos de fontes de geração de energia elétrica que alimentam o sistema de produto. Para este fim foram simulados cinco cenários de geração. Foi considerado como cenário base a alimentação do sistema de produto com o mix das fontes de geração de energia elétrica no país. A seguir foram propostos quatro cenários alternativos correspondentes a sistemas constituídos por 25%, 50%, 75% e 100% de geração eólica ou solar (fotovoltaica).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV

Segundo a Especificação técnica ABNT ISO/TS 14067, o inventário do ciclo de vida – ICV para o cálculo da pegada de carbono é um inventário de dados de entradas e saídas do sistema de produto em estudo. Assim, foram identificados e quantificados, a energia, materiais utilizados e emissões ambientais associadas ao ciclo de vida da produção dos produtos primários de níquel, a partir da extração mineral até o portão da instalação produtora.

O ICV com os principais processos elementares para a produção dos produtos de níquel no Brasil (FeNi e concentrado mineral), representado em termos de níquel contido, é apresentado nas Tabelas 2, 3 e 4. Todas as entradas e saídas foram consideradas como as médias representativas das operações típicas nas instalações brasileiras.

Tabela 2 – Inventário do Ciclo de Vida – ICV-Mineração (1 t de níquel contido no ROM).

<b>Saídas</b>	
ROM (t de Ni contido)	1
Estéril (t)	4,11E+02
<b>Entradas de Recursos</b>	
Ocupação da terra (ha.ano)	2,81E+00
<b>Entradas de Tecnologia</b>	
Eletricidade (MJ)	5,16E+02
Explosivos (t)	1,58E-01
Óleo Lubrificante (t)	2,36E-03
Diesel (t)	4,76E-01
Gasolina (t)	4,52E-04
<b>Saídas - Emissões para o ar</b>	
CO <sub>2</sub> (t)	1,55E+00
SO <sub>2</sub> (t)	9,91E-04
CH <sub>4</sub> (t)	5,66E-05



CO (t)	2,06E-04
N <sub>2</sub> O (t)	2,12E-04
NO <sub>x</sub> (t)	1,42E-03
VOC (t)	6,66E-05
Particulados (PM2.5-PM10 µm) (t)	2,58E-05
<b>Saídas - Fluxos Finais de Rejeitos</b>	
Rejeito perigoso para incineração (t)	1,36E-05
Rejeito não-perigoso para incineração (t)	2,06E-05
Rejeito não-perigoso para aterro (t)	2,27E-03

Fonte: material original dos autores.

Tabela 3 – Inventário do Ciclo de Vida – ICV-Beneficiamento/Preparação (1 t de níquel contido no minério beneficiado/preparado).

<b>Saídas</b>	
Minério beneficiado/preparado (t de Ni contido)	1
Rejeito de beneficiamento (t)	4,56E+01
<b>Entradas de Recursos</b>	
Água (m <sup>3</sup> )	1,55E+02
<b>Entradas de Tecnologia</b>	
ROM (t de Ni contido)	1,12E+00
Gasolina (t)	5,37E-05
Diesel (t)	4,07E-02
<b>Entradas de Eletricidade e Calor</b>	
Eletricidade (MJ)	5,98E+03
Carvão mineral (MJ)	2,48E+04
GLP (MJ)	5,03E+00
<b>Saídas - Emissões para o Ar</b>	
CO (t)	5,03E-04
CO <sub>2</sub> (t)	2,53E+00
CH <sub>4</sub> (t)	2,56E-04
N <sub>2</sub> O (t)	4,53E-06
NO <sub>x</sub> (t)	3,36E-03
SO <sub>2</sub> (t)	3,36E-03
VOC (t)	1,34E-04
Água (t)	5,03E+00
Particulados (PM2,5-PM10 µm) (t)	7,70E-05

Fonte: material original dos autores.

Tabela 4 – Inventário do Ciclo de Vida – ICV-Pirometalurgia (1 t de níquel contido no FeNi).

<b>Saídas</b>	
FeNi (t de Ni contido)	1
Escória (t)	6,23E+01
<b>Entradas de Recursos</b>	
Água (m <sup>3</sup> )	8,84E-02
<b>Entradas de Tecnologia</b>	
Minério beneficiado/preparado (t de Ni contido)	1,03E+00
Diesel (t)	8,08E-02
Gasolina (t)	2,62E-06
Cavaco de madeira (t)	1,49E+00
Carvão mineral (t)	4,46E+00
Calcário (t)	1,54E-01
Gás natural (m <sup>3</sup> )	6,07E+01
Coque de petróleo (t)	1,12E-02



Areia de sílica (t)	2,08E-04
Ácido sulfúrico (t)	3,69E-04
Fluorita (t)	2,88E-03
Óleo lubrificante (t)	4,61E-04
Cal (t)	6,15E-02
Coque de carvão (MJ)	6,02E+04
FeSi (t)	4,61E-03
<b>Entradas de Eletricidade e Calor</b>	
Eletricidade (MJ)	1,35E+05
GLP (MJ)	2,69E+02
Óleo pesado (MJ)	2,62E-02
Óleo leve (MJ)	9,23E+01
Gás natural (MJ)	2,08E+03
<b>Saídas - Emissões para o Ar</b>	
CO <sub>2</sub> (t)	1,46E+01
NO <sub>x</sub> (t)	1,96E-02
SO <sub>2</sub> (t)	3,19E-02
CH <sub>4</sub> (t)	1,12E-03
CO (t)	1,54E-02
Água (t)	8,46E+00
VOC (t)	7,31E-04
Particulados (>PM10 µm )	3,35E-02
Particulados (PM 2,5-PM10 µm)	3,31E-03
<b>Saídas - Fluxos Finais de Rejeitos</b>	
Rejeito não-perigoso para aterro (t)	8,08E-02
Rejeito perigoso para aterro (t)	5,38E-02
Rejeito não-perigoso para incineração (t)	3,00E-04
Rejeito perigoso para incineração (t)	8,08E-04

Fonte: material original dos autores.

#### 4.2 CÁLCULO DA PEGADA DE CARBONO

Os dados de entradas e saídas obtidos a partir da elaboração do ICV e apresentados nas tabelas 2, 3 e 4, foram tratados com o programa Simapro. Os resultados da pegada de carbono, calculados a partir do método IPCC 2021 GWP 100 são apresentados a seguir.

A Figura 2 mostra o diagrama Sankey associado à pegada de carbono total e expressa em kg de CO<sub>2eq</sub>, para 1 t de níquel contido produzido no Brasil. O diagrama apresenta os processos elementares envolvidos com contribuições acima de 1% para a pegada de carbono. Destaca-se ainda um fluxo na cor verde (que indica um resultado final de remoção de carbono).

Os números inscritos no interior em cada bloco do diagrama na Figura representam as contribuições acumuladas dos processos a montante do respectivo bloco para a Pegada de Carbono total. A espessura das linhas é proporcional a essas contribuições.

A Pegada de Carbono total foi estimada em 28,2 mil kg de CO<sub>2eq</sub>. A maior contribuição para este valor foi de 11,7 mil kg de CO<sub>2eq</sub> ou cerca de 41,5 % deste total, que é proveniente de



emissões diretas do processo de produção de FeNi e decorrente principalmente do uso de combustíveis fósseis.

Observa-se que a geração de energia elétrica tem, individualmente, papel mais relevante no valor na Pegada de Carbono no Sistema de Produto em estudo do que os demais processos a montante da etapa de **Pirometalurgia**. Observa-se também que o emprego de cavacos de madeira na Pirometalurgia pode representar uma remoção líquida de GEE do sistema de produto.

A Figura 3 apresenta os resultados para a Pegada de Carbono fracionados, segundo as categorias descritas no método de caracterização aplicado.

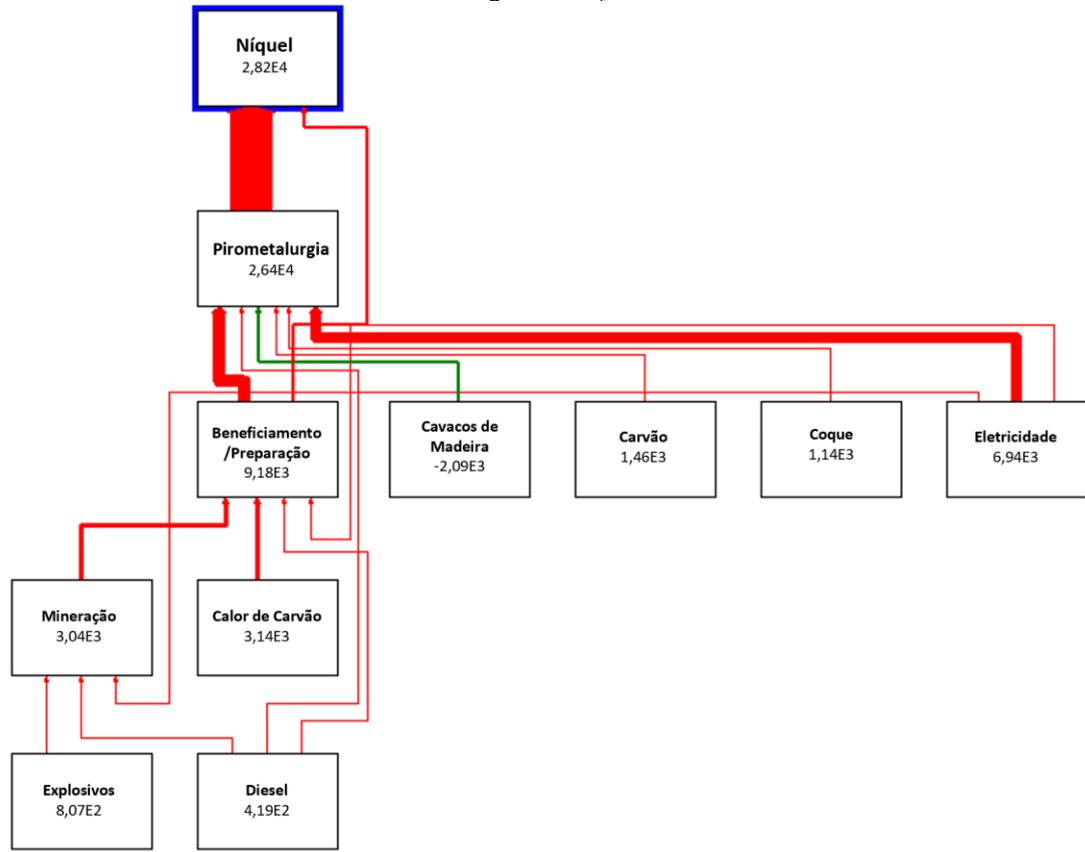
Para GWP100-fóssil as emissões associadas ao sistema de produto analisado foram estimadas em 27,1 mil kg de CO<sub>2eq</sub> por t de Ni contido. Dessas, 43% estão associadas principalmente às operações pirometalúrgicas (emissões diretas) e correspondem a 11,7 mil kg de CO<sub>2eq</sub>.

Para o GWP100-biogênico, as emissões foram estimadas em 5,54 mil kg de CO<sub>2eq</sub> por t de Ni contido e para o GWP100 associado às mudanças no uso do solo, as emissões foram estimadas em 590 kg de CO<sub>2eq</sub>. Nos dois casos, a quase totalidade das emissões é indireta e decorrente da geração de energia elétrica.

As principais operações associadas às remoções de CO<sub>2eq</sub> foram indiretas e decorrentes do uso de biomassa na produção de cavaco de madeira e na geração de energia elétrica do mix brasileiro de energia. Esse valor foi estimado em 5,01 mil kg de CO<sub>2eq</sub>.

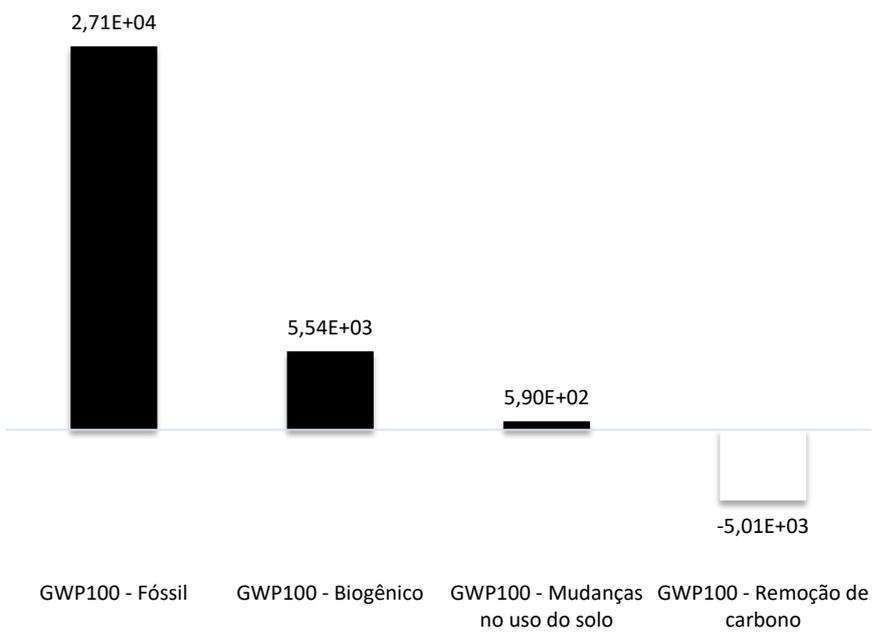


Figura 2. Diagrama Sankey da Pegada de Carbono para a produção no Brasil de 1 t de níquel contido - GWP100 (kg de CO<sub>2eq</sub>).



Fonte: material original dos autores

Figura 3. Caracterização da Pegada de Carbono para 1 t de Ni contido produzido no Brasil (kg de CO<sub>2eq</sub>).



Fonte: material original dos autores



#### 4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA

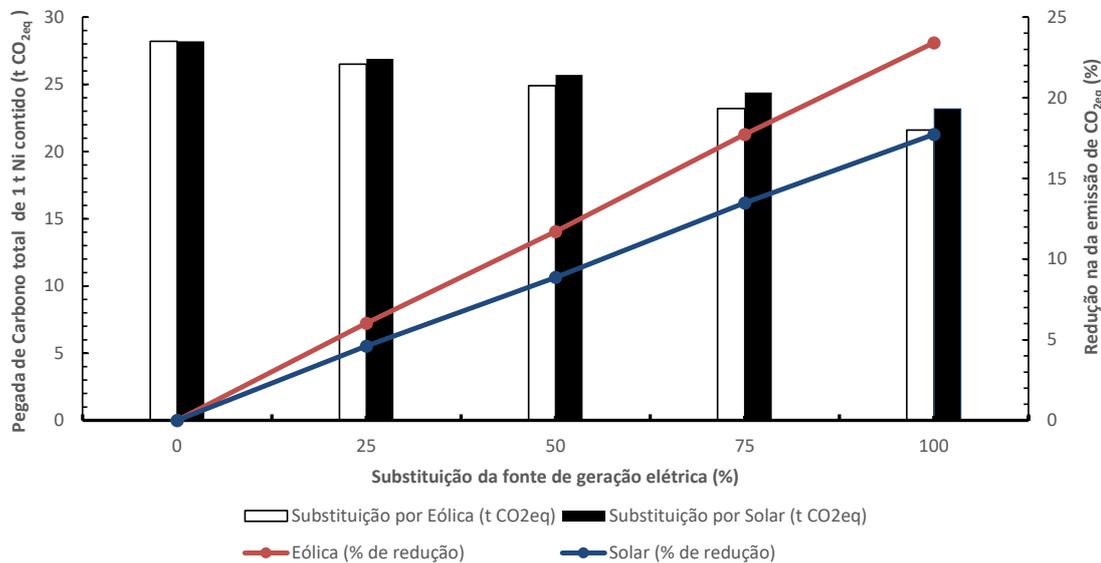
A redução dos teores nos minérios e o aumento da demanda mundial dos metais, provavelmente acarretarão o aumento das emissões de GEE originários dos processos primários de produção (Rasul & Hertwich, 2023; Yokoi et al., 2022). Empresas vêm buscando melhorias em seus processos produtivos com o objetivo de reduzir a Pegada de Carbono. Na etapa de elaboração do ICV, foi identificada, entre as empresas inventariadas, a iniciativa da contratação do suprimento de energia elétrica, gerada a partir de fontes mais limpas, como a proveniente de usinas de geração eólica, instaladas na região nordeste do país (AngloAmerican, 2020) .

Assim, foi verificado, por meio de uma análise de sensibilidade, de que maneira a substituição da fonte geradora de energia que alimenta o sistema de produto, poderia impactar nas emissões totais de CO<sub>2eq</sub>. Na figura 4, são apresentados os resultados dessa análise. As barras verticais na figura, correspondem à Pegada de Carbono total, expressa em t de CO<sub>2eq</sub>, para a produção no Brasil de 1 t de Ni contido. As linhas, representam os percentuais de redução de emissões de CO<sub>2eq</sub> como função do % de substituição. Foram analisadas as fontes de energia eólica e solar. Em ambos os casos, constatou-se a redução das emissões totais do sistema de produto quando comparado às emissões associadas ao uso exclusivo do mix brasileiro de geração elétrica.

Se o sistema de produto operar com o uso de 100% de energia eólica, é possível atingir cerca de 23,4% de redução da Pegada de Carbono do níquel contido. Por outro lado, com o uso exclusivo de energia elétrica solar, essa redução seria de 17,7 %.



Figura 4. Pegada de Carbono e percentual de redução como função do percentual de substituição de fontes de geração de energia elétrica no sistema de produto.



Fonte: material original dos autores.

## 5 CONCLUSÕES

O Brasil possui potencial geológico e tecnológico para se colocar como fornecedor de bens minerais críticos que deverão apresentar demanda crescente nas próximas décadas, entre os quais o níquel. Esse metal possui inúmeras aplicações em produtos de grande sofisticação tecnológica e associados à transição energética e à economia de baixo carbono.

Desta forma, é importante examinar a contribuição da produção de níquel no país para as mudanças climáticas, quantificando sua emissão de gases de efeito estufa e Pegada de Carbono.

A Especificação técnica ABNT ISO/TS 14067 propõe que esta quantificação seja realizada para todo ciclo de vida do produto. Para isso, foi adotada como unidade funcional 1 t de níquel contido nos dois produtos primários de níquel fabricados no país: concentrado de minério de níquel e liga ferro níquel.

A Pegada de Carbono total associada à produção de níquel no país foi estimada em 28,2 mil kg de CO<sub>2eq</sub> por t de Ni contido. As emissões diretas do processo de produção de FeNi ofereceram a maior contribuição individual para esse total e foram estimadas em 11,7 mil kg de CO<sub>2eq</sub> que correspondem a cerca de 41,5% do total, decorrentes principalmente do uso de combustíveis fósseis.



A contribuição para GWP100-fóssil foi estimada em 27,1 mil kg de CO<sub>2eq</sub> por t de Ni contido, em sua maior parte decorrentes das emissões diretas originárias das operações pirometalúrgicas.

A contribuição para o GWP100-biogênico foi estimada em 5,54 mil kg de CO<sub>2eq</sub> por t de Ni contido e a associada às mudanças no uso do solo estimadas em 590 kg de CO<sub>2eq</sub>, ambas emissões indiretas e decorrentes principalmente da etapa de geração de energia elétrica.

Foi estimada a remoção de 5,01 mil kg de CO<sub>2eq</sub>, decorrente da produção de cavaco de madeira (biomassa) e da geração de energia elétrica no mix brasileiro.

O exame preliminar dos resultados da substituição das fontes de suprimento de energia elétrica do sistema de produto por fontes renováveis levou à conclusão de que, se 100% de substituição fosse aplicada, seria possível alcançar cerca de 23,4% de redução na Pegada de Carbono com o uso exclusivo de energia de fonte eólica e 17,7% com o uso exclusivo de energia elétrica de fonte solar.

Os resultados representam um inventário preliminar da produção de níquel no Brasil, produzido a partir de dados publicamente disponíveis. Tais dados podem apresentar incertezas, que são originárias da variação das informações disponíveis nas diversas fontes bibliográficas consultadas, da agregação de operações unitárias de processo e das estimativas aplicadas para a construção do ICV. Estes aspectos foram verificados cuidadosamente de forma a, sempre que possível, realizar contabilidades completas.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI pelo apoio recebido para a realização desse trabalho.



## REFERÊNCIAS

ABNT. (2015). ABNT ISO/TS 14067 Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação. Em *Especificação Técnica* (p. 1–62). ABNT.

Adiansyah, J. S. (2021, dezembro 15). Carbon footprint based analysis for estimating the potential pollution of nickel production in Indonesia. *3rd Borobudur International Symposium on Science and Technology 2021*.

Alves, T. M., de Souza, C. P., & Oliveira, A. E. A. (2020). *Plano Preliminar de Fechamento de Mina - Barro Alto*. <https://brasil.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group/Brazil/sustentabilidade/plano-de-fechamento-de-mina-de-barro-alto.pdf>

AngloAmerican. (2020, junho 25). *Anglo American assina com a Casa dos Ventos o maior contrato para autoprodução de energia renovável no Brasil*. Notícias 2020. <https://brasil.angloamerican.com/pt-pt/imprensa/noticias/2020/25-06-20>

AngloAmerican. (2022). *Ore Reserves and Mineral Resources Report 2022*. <https://australia.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group-v5/PLC/investors/annual-reporting/2022/ore-reserves-and-mineral-resources-report-2022.pdf>

ANM. (2023). *Anuário Mineral Brasileiro 2022 - Principais Substâncias Metálicas*. [www.anm.gov.br](http://www.anm.gov.br)

Atlantic Nickel. (2023). *Página Institucional*. <https://atlanticnickel.com/>

BA de valor. (2023, fevereiro 9). *Atlantic Nickel tem resultado histórico em 2022*. BA de valor. <https://badevalor.com.br/atlantic-nickel-tem-resultado-historico-em-2022/>

Bartzas, G., & Komnitsas, K. (2015). Life cycle assessment of ferronickel production in Greece. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.016>

Campagnol, N., Hoffman, K., Lala, A., & Ramsbottom, O. (2017). The future of nickel: A class act. *McKinsey Quarterly*, 1–16. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-future-of-nickel-a-class-act>

Contessotto, R. (2017). *Classificação de domínios mineralógicos e caracterização de minérios de níquel da mina Santa Rita - BA, em apoio à geometalurgia*. [Dissertação de Mestrado]. Universidade de São Paulo.

Cruz, F. L. dos S. (2020). *CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS ESCÓRIAS ORIUNDAS DO PROCESSO DE REFINO DA LIGA FeNi NA UNIDADE OPERACIONAL ONÇA PUMA* [Monografia]. Instituto Tecnológico Vale.

da Silva, M., Costa Muniz Guimarães, A. R., Hoffmann, R., Luz Lisbôa, A. C., Guimarães da Silva, M., Costa Muniz, A. R., Hoffmann, R., & Luz Lisbôa, A. C. (2018). Impact of greenhouse gases on surface coal mining in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 193, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.076>



Deloitte. (2022). *TECHNICAL ASSISTANCE ON BRAZIL MINERAL RESOURCES Nickel-Market Analysis and Competitiveness Report*.

dos Santos Junior, L. T., & Delboni Júnior, H. (2016). Modelling and simulation of the Santa Rita mine milling circuit. *Revista Escola de Minas*, 69(2), 207–211. <https://doi.org/10.1590/0370-44672014690186>

Eckelman, M. J. (2010). Facility-level energy and greenhouse gas life-cycle assessment of the global nickel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(4), 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.008>

EIB. (2023). *EIB Project Carbon Footprint Methodologies Methodologies for the assessment of project greenhouse gas emissions and emission variations*. [https://www.eib.org/attachments/lucalli/eib\\_project\\_carbon\\_footprint\\_methodologies\\_2023\\_en.pdf](https://www.eib.org/attachments/lucalli/eib_project_carbon_footprint_methodologies_2023_en.pdf)

EPE. (2021). *Balanço Energético Nacional - Manual Metodológico - Nota Técnica EPE DEA 005/2021*. <http://www.epe.gov.br>

FGV, & WRI. (2023). *Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol*. [https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/u1087/biblioteca\\_ghg\\_.pdf](https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/u1087/biblioteca_ghg_.pdf)

Ferreira da Silva, G., Cunha, I. de A., & Costa, I. S. L. (2023). *Critical Minerals Potential of Brazil*.

GHG Protocol. (2016). Emissões de CO<sub>2</sub> pela detonação de explosivos industriais – versão 1.0. Em *Nota Técnica FGV EAESP* (p. 1–2). FGV - EAESP.

Guimarães, C. das G. G. (2019). *Caracterização Tecnológica de Minério de Níquel Laterítico* [M.Sc.]. Universidade Federal de Minas Gerais.

Haque, N., & Norgate, T. (2013). Estimation of greenhouse gas emissions from ferroalloy production using life cycle assessment with particular reference to Australia. *Journal of Cleaner Production*, 39, 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.010>

Heider, M. (2022, abril 26). Estrutura produtiva do níquel no Brasil. *In the Mine*.

IBRAM. (2014). *II Inventário de Gases Efeito Estufa do Setor Mineral*. <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/00005153.pdf>

IEA. (2021a). *Net Zero by 2050*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IEA. (2021b). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

IPCC. (2006a). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Em *IPCC*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>



IPCC. (2006b). *Publications - IPCC-TFI*. IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

IPCC. (2021). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. , Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Orgs.). [https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf)

Khoo, J. Z., Haque, N., Woodbridge, G., McDonald, R., & Bhattacharya, S. (2017). A life cycle assessment of a new laterite processing technology. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1765–1777. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.111>

Lee, L. Y., & Glynn, J. (2023, março 14). *Critical Minerals: will there be enough to meet the 2050 net-zero emissions target?* energypost.eu. <https://energypost.eu/critical-minerals-will-there-be-enough-to-meet-the-2050-net-zero-emissions-target/>

Mistry, M., Gediga, J., & Boonzaier, S. (2016). Life cycle assessment of nickel products. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11), 1559–1572. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1085-x>

Nascimento, M., & Soares, P. S. M. (2019). *Cobalto no Brasil: metalurgia extrativa, ocorrências e projetos* (C. C. Peiter, Org.; 1º ed). Centro de Tecnologia Mineral.

Norgate, T., & Jahanshahi, S. (2011). Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing. *Minerals Engineering*, 24(7), 698–707. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2010.10.002>

PRé Sustainability. (2021). *SimaPro database manual Methods library*. Pré Sustainability. <https://simapro.com/wp-content/uploads/2021/12/DatabaseManualMethods930.pdf>

Brandt. (2004). *PROJETO ONÇA PUMA LAVRA E PROCESSAMENTO DE MINÉRIO DE NÍQUEL - RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL*. [www.brandt.com.br](http://www.brandt.com.br)

Rasul, K., & Hertwich, E. G. (2023). Decomposition Analysis of the Carbon Footprint of Primary Metals. *Environmental Science and Technology*, 57(19), 7391–7400. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05857>

Yokoi, R., Watari, T., & Motoshita, M. (2022). Future greenhouse gas emissions from metal production: Gaps and opportunities towards climate goals. *Energy and Environmental Science*, 15(1), 146–157. <https://doi.org/10.1039/d1ee02165f>