



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**COMPARAÇÃO ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE:
ASPECTOS AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E TECNOLÓGICOS
JUNTAMENTE COM A UTILIZAÇÃO DA IA**

CONNIE SUJIA LI

Foz do Iguaçu
2025

**COMPARAÇÃO ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE:
ASPECTOS AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E TECNOLÓGICOS
JUNTAMENTE COM A UTILIZAÇÃO DA IA**

CONNIE SUJIA LI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Gonçalves Reimbrecht


Foz do Iguaçu
2025

CONNIE SUJIA LI


**COMPARAÇÃO ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE :
ASPECTOS AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E TECNOLÓGICOS
JUNTAMENTE COM A UTILIZAÇÃO DA IA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO GONCALVES REIMBRECHT**
Data: 28/08/2025 21:29:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Gonçalves Reimbrecht
UNILA

Documento assinado digitalmente
 **PRISCILA LEMES**
Data: 28/08/2025 12:29:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Priscila Lemes
UNILA

Documento assinado digitalmente
 **GISLAINE BEZERRA PINTO FERREIRA**
Data: 29/08/2025 09:06:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Gislaïne Bezerra Pinto Ferreira
UNILA

Foz do Iguaçu, 29 de agosto de 2025

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): CONNIE SUJIA LI

Curso: Engenharia de materiais

Tipo de Documento	
<input checked="" type="checkbox"/> graduação	<input type="checkbox"/> artigo
<input type="checkbox"/> especialização	<input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso
<input type="checkbox"/> mestrado	<input type="checkbox"/> monografia
<input type="checkbox"/> doutorado	<input type="checkbox"/> dissertação
	<input type="checkbox"/> tese
	<input type="checkbox"/> CD/DVD - obras audiovisuais
	<input type="checkbox"/> _____

Título do trabalho acadêmico: COMPARAÇÃO ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE: ASPECTOS AMBIENTAIS, ECONÔMICOS E TECNOLÓGICOS JUNTAMENTE COM A UTILIZAÇÃO DA IA

Nome do orientador(a): EDUARDO GONÇALVES REIMBERCHT

Data da Defesa:

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported**.

Foz do Iguaçu, 29 de agosto de 2025



AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pois sem Ele não sou nada, e não poderiam ter planos melhores para a minha vida do que estes que Ele planejou para mim. Agradeço ao meu esposo Jeferson pelo apoio incondicional em todas as dificuldades que passei para chegar até aqui, por estar sempre ao meu lado me apoiando e me incentivando a ir cada vez mais longe, sem você eu não teria conseguido. Obrigada por ser a força que me impulsiona, a tranquilidade que me acalma e a mão que me segura em cada desafio. Agradeço também a minha filha Teresa que ainda se encontra em meu ventre por me motivar a ser uma pessoa melhor.

Aos meus pais Silvana e Tomi por não medirem esforços para me apoiarem desde a decisão de fazer engenharia, por me darem todo o suporte para me mudar para outra cidade, por todas as palavras de carinho e incentivo, sei que sou uma pessoa privilegiada por ter pais tão bons ao meu lado. Agradeço a ambos pelo apoio constante e pela fé em mim, mesmo nos momentos mais difíceis, sem vocês esse sonho não teria sido possível.

Ao meu irmão Kelvin, pelo companheirismo, pela cumplicidade e pelo apoio em todos os momentos da minha vida, obrigada por sempre estar ao meu lado para incentivar, você foi essencial em todos os momentos dessa caminhada, dentro e fora da universidade, me guiando a sempre tomar o melhor caminho.

Aos meus professores do curso, que além de passarem sempre com a maior dedicação todo o conteúdo, também por muitas vezes foram muito mais do que professores, foram amigos e incentivadores para que eu pudesse não só me tornar uma boa profissional, mas também uma pessoa melhor. Ao meu professor orientador, professor Eduardo, não só pela constante orientação neste trabalho, mas também pela disponibilidade e solicitude em todos os momentos. Aos professores da banca pelas orientações...

Aos meus amigos e colegas de turma, por todo o suporte em momentos felizes e difíceis, por todas as risadas que vocês me arrancaram nos dias em que era só isso que eu precisava, em especial a Silene e a Stefany, por todas as incontáveis horas de estudo juntas, por todas as noites mal dormidas e finais de semana que passavam como um piscar de olhos regados a muito estudo e muitas risadas também.

As minhas amigas que se fizeram presentes em minha vida mesmo com a distância física, Sara, Maria Clara e Berteli, por todo o incentivo em momentos de exaustão, e também por todas as risadas compartilhadas que foram meu “cano de escape” quando as coisas pareciam difíceis demais. Vocês sabem quão especiais vocês são na minha vida.

A minha família, tios e primos, e também a família do meu esposo, por todo o incentivo e encorajamento nessa caminhada, por sempre me tratarem com tanto carinho, a ajuda de vocês foi de suma importância nessa caminhada.

Aos meus avós Alceu e Iraci, *in memoriam*, que estiveram ao meu lado durante a maior parte desta caminhada, sempre com uma palavra de carinho e um abraço que conforta, vocês fizeram meus dias muito mais felizes e tenho a honra de poder ter convivido dia após dia ao lado de vocês, acompanhando todas as dificuldades de saúde que vocês passaram até chegar no seu momento de descanso eterno, vocês fizeram eu me tornar uma pessoa infinitamente melhor do que quando eu entrei na universidade. Espero estar honrando dignamente todos os ensinamentos que vocês me passaram durante essa caminhada, amo vocês daqui até a eternidade.

RESUMO

O cobre, fundamental para a transição energética e o avanço tecnológico, apresenta alta demanda global, diante da crescente demanda por cobre, metal essencial para tecnologias sustentáveis e energias renováveis, torna-se urgente avaliar alternativas viáveis à extração mineral tradicional. A mineração, apesar de sua importância econômica e geração de empregos, está associada a impactos ambientais significativos, como degradação do solo, consumo elevado de energia e emissão de poluentes, além de poder gerar conflitos sociais. Em contraste, a reciclagem do cobre se destaca por consumir menos energia, reduzir resíduos e manter a qualidade do material reaproveitado, sendo ambientalmente mais vantajosa. O uso de inteligência artificial tem modernizado ambos os processos: na mineração, auxilia na exploração geológica, extração e gestão de equipamentos; na reciclagem, melhora a triagem, logística e previsão de demanda. A análise mostra que a reciclagem se destaca nos aspectos ambientais, energéticos e, potencialmente, econômicos, sendo uma alternativa estratégica para reduzir a dependência da extração mineral. O estudo reforça a importância de políticas públicas e investimentos em tecnologia para promover uma economia circular mais eficiente.

Palavras-chave: Cobre; Mineração; Reciclagem; Sustentabilidade.

RESUMEN

El cobre, fundamental para la transición energética y el avance tecnológico, tiene una gran demanda mundial. Dada la creciente demanda de cobre, un metal esencial para las tecnologías sostenibles y las energías renovables, es urgente evaluar alternativas viables a la extracción mineral tradicional. La minería, a pesar de su importancia económica y generación de empleo, está asociada a importantes impactos ambientales, como degradación del suelo, elevado consumo energético y emisiones contaminantes, además de generar potencialmente conflictos sociales. Por el contrario, el reciclaje de cobre destaca por consumir menos energía, reducir residuos y mantener la calidad del material reutilizado, siendo más ventajoso ambientalmente. El uso de inteligencia artificial ha modernizado ambos procesos: en minería, ayuda en la exploración geológica, la extracción y la gestión de equipos; En el reciclaje, mejora la clasificación, la logística y la previsión de la demanda. El análisis muestra que el reciclaje se destaca en aspectos ambientales, energéticos y, potencialmente, económicos, siendo una alternativa estratégica para reducir la dependencia de la extracción de minerales. El estudio refuerza la importancia de las políticas públicas y las inversiones en tecnología para promover una economía circular más eficiente.

Palabras clave: Cobre; Minería; Reciclaje; Sostenibilidad.

ABSTRACT

Copper, which is essential for the energy transition and technological advancement, is in high global demand. Given the growing demand for copper, an essential metal for sustainable technologies and renewable energy, it is urgent to evaluate viable alternatives to traditional mineral extraction. Mining, despite its economic importance and job creation, is associated with significant environmental impacts, such as soil degradation, high energy consumption and pollutant emissions, in addition to potentially generating social conflicts. In contrast, copper recycling stands out for consuming less energy, reducing waste and maintaining the quality of the reused material, being more environmentally advantageous. The use of artificial intelligence has modernized both processes: in mining, it assists in geological exploration, extraction and equipment management; in recycling, it improves sorting, logistics and demand forecasting. The analysis shows that recycling stands out in environmental, energy and, potentially, economic aspects, being a strategic alternative to reduce dependence on mineral extraction. The study reinforces the importance of public policies and investments in technology to promote a more efficient circular economy.

Key words: Copper; Mining; Recycling; Sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 DESENVOLVIMENTO	15
2.1 COBRE: UM PRODUTO ESSENCIAL PARA O FUTURO.....	15
2.1.1 Histórico da Mineração de Cobre.....	16
2.1.2 Processo de Mineração de Cobre.....	18
2.1.3 Impactos Ambientais.....	21
2.1.4 Aspectos Sociais e Econômicos.....	23
2.1.5 Reciclagem do Cobre.....	26
2.2 A APLICAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE MINÉRIO DE COBRE.....	28
2.2.1 Mineração do Cobre.....	31
2.2.1.1 <i>Exploração mineral com base em dados geológicos</i>	31
2.2.1.2 <i>Otimização da extração</i>	31
2.2.1.3 <i>Gestão de frotas e equipamentos autônomos</i>	32
2.2.1.4 <i>Análise da qualidade do minério</i>	32
2.2.2 Reciclagem do Minério de Cobre.....	32
2.2.2.1 <i>Triagem automatizada de resíduos</i>	33
2.2.2.2 <i>Reconhecimento de materiais em tempo real</i>	33
2.2.2.3 <i>Otimização da logística na cadeia de reciclagem</i>	34
2.2.2.4 <i>Previsão de demanda e precificação</i>	34
3 METODOLOGIA	36
3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	36
3.2 OBJETIVO.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 COMPARAÇÃO AMBIENTAL ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE.....	38
4.2 COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE.....	41
4.1 COMPARAÇÃO ENERGÉTICA E TÉCNICA ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE.....	44

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	SUMÁRIO	47
5.1 POSSÍVEIS MELHORIAS PARA TRABALHOS FUTUROS		49
5.2 PROJETOS E PESQUISAS FUTUROS		50
REFERÊNCIAS		50

1 INTRODUÇÃO

A mineração de cobre possui uma grande importância para a humanidade desde os primórdios até mundo atual, principalmente devido ao papel crucial desse metal em várias indústrias e tecnologias. O cobre, assim como outros metais, foi e é até hoje importantíssimo para o desenvolvimento e para a evolução do mundo.

O cobre é um excelente condutor de eletricidade, sendo estas características de extrema importância na indústria eletrônica e tecnológica, o mesmo é amplamente utilizado na fabricação de fios elétricos, circuitos eletrônicos, baterias e componentes de dispositivos eletrônicos, como smartphones, computadores e veículos elétricos, isso se dá a sua alta condutividade e preço acessível quando comparado com outros metais como por exemplo a prata que tem coeficiente de condutividade elétrica $6,8.10^7 \Omega^{-1}.m^{-1}$, maior quando comparado ao cobre que possui coeficiente de condutividade elétrica de $6,0.10^7 \Omega^{-1}.m^{-1}$. Com uma condutividade muito parecida, mas com um valor significativamente mais baixo, o cobre segue sendo o material mais utilizado quando o objetivo é sua condutividade. (YAN, 2020)

O cobre é fundamental na produção de energia renovável e sua infraestrutura, para a geração e distribuição de energia elétrica, sendo utilizado em sistemas de transmissão e distribuição. Além disso, ele é essencial em tecnologias de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas. O cobre também é utilizado em tubulações de água e gás, além de ser essencial em sistemas de climatização e construção de edifícios sustentáveis. Os veículos elétricos e híbridos, além de carros convencionais, também dependem de grandes quantidades de cobre em seus motores e sistemas elétricos. Com a crescente transição para o transporte sustentável, a demanda por cobre tende a aumentar, sendo o Brasil uma terra muito rica em minérios, o mercado do cobre tem grande potencial para exportação. (GORAI; JANA; PREMCHAND, 2003)

Mesmo com toda a procura de mineração de cobre, alguns pontos cruciais devem ser levados em conta quando optamos pela opção de mineração de cobre, tendo em vista a poluição e desmatamento causados nas áreas de mineração, os conflitos sociais que envolvem uma mina de cobre e outros minérios, a mudança climática causada pela mineração, e também a exaustão de recursos naturais, tudo isso além do custo de extrair e posteriormente passar o minério pelo processo de beneficiamento para que o mesmo esteja apto para a indústria em geral. A extração de cobre pode causar poluição do ar, solo e água, o processo de mineração pode resultar na contaminação de corpos hídricos com

metais pesados, como arsênio e cádmio, afetando a biodiversidade local, para além disso a mineração em larga escala leva ao desmatamento e à perda de habitats naturais, impactando fauna e flora locais. (GERMANY, 2002) (ROCIO, SILVA, CARVALHO, CARDOSO, 2012)

Muitas vezes, as operações de mineração invadem terras indígenas ou afetam comunidades locais que dependem dessas áreas para sua subsistência, os conflitos por uso da terra e resistência contra a exploração mineral são frequentes. Além disso, as condições de trabalho nas minas podem ser precárias, com mão-de-obra em situações de risco e direitos trabalhistas negligenciados, principalmente em países em desenvolvimento como é o caso do Brasil. Os depósitos de cobre mais ricos estão se esgotando, e a extração está se tornando cada vez mais cara e ambientalmente prejudicial, cada vez mais a mineração de cobre ocorre em fontes de menor qualidade, o que requer mais energia para extração e gera mais resíduos, e também possui um valor agregado menor dependendo do teor de pureza do minério, quanto mais puro, mais valioso. Devido todos estes aspectos a serem avaliados, o preço do cobre pode ser volátil, o que afeta economias que dependem fortemente da exportação do metal, a flutuação de preços pode causar instabilidade financeira, especialmente em países que enfrentam desafios econômicos e sociais. (GERMANY, 2002) (ROCIO, SILVA, CARVALHO, CARDOSO, 2012)

A mineração de cobre desempenha um papel fundamental no desenvolvimento tecnológico, econômico e social do mundo moderno. Sua importância cresce conforme as necessidades globais por novas tecnologias, especialmente com a transição para a energia limpa e a eletrificação do transporte. No entanto, esse processo de extração e exploração enfrenta uma série de desafios ambientais, sociais e econômicos, que exigem uma análise cuidadosa e soluções integradas para garantir que a mineração de cobre seja realizada de forma mais sustentável e equilibrada. O investimento nas tecnologias de mineração devem ser priorizadas com o intuito de reduzir o impacto ambiental. Isso inclui a utilização de métodos de extração mais eficientes e menos poluentes, como a mineração subterrânea em vez da a céu aberto, que pode minimizar os danos à paisagem, mesmo que a mesma também gere impactos negativos, são menores quando em comparação à mineração em céu aberto. A bioextração, que utiliza organismos biológicos para separar o cobre dos minérios, também é uma área promissora que pode reduzir o uso de produtos químicos agressivos e a emissão de poluentes. (FITZSIMONS, WARREN, 2024)

A adoção de práticas de reciclagem de minério de cobre também é uma das alternativas de melhorar a utilização do mesmo, o cobre é um metal 100% reciclável sem perda de qualidade, o que significa que, ao invés de depender exclusivamente da mineração, é possível reutilizar o cobre de produtos antigos. Incentivar a reciclagem de cobre pode ajudar a reduzir a exploração dos depósitos naturais e a reduzir os impactos ambientais da mineração. Programas de reciclagem mais eficazes e a promoção do design de produtos que facilitem a reutilização do cobre são essenciais para o futuro da indústria (BORN, CIFTCI, 2024) . Em resumo, a mineração de cobre é vital para o avanço das tecnologias e para a construção de uma economia global mais sustentável. No entanto, ela também traz consigo uma série de desafios que exigem a adoção de práticas mais responsáveis e inovadoras para minimizar seus impactos negativos, garantindo que os benefícios da mineração sejam amplamente distribuídos e que os danos ao meio ambiente e às comunidades sejam reduzidos ao máximo. A transição para uma mineração mais sustentável e ética não é apenas uma necessidade, mas uma responsabilidade que deve ser compartilhada por governos, empresas e sociedade civil.

Nos últimos anos, o avanço da tecnologia tem impulsionado transformações significativas nos setores produtivos, e a mineração e reciclagem de cobre não são exceções. A aplicação de inteligência artificial (IA) nessas áreas tem se mostrado uma aliada estratégica para aumentar a eficiência, reduzir custos e minimizar impactos ambientais. Na mineração, algoritmos avançados permitem o monitoramento em tempo real das operações, a análise preditiva de falhas em equipamentos e a otimização da extração, identificando com precisão áreas de maior teor de cobre. Já na reciclagem, a IA é empregada na triagem automatizada de resíduos, no reconhecimento de materiais por meio de visão computacional e na otimização dos processos de separação e purificação, garantindo maior recuperação do metal e menor desperdício. Essas tecnologias contribuem para tornar toda a cadeia produtiva do cobre mais sustentável e competitiva.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 COBRE: UM PRODUTO ESSENCIAL PARA O FUTURO

O cobre é uma commodity crucial na indústria de base, com a previsão de um aumento constante na sua procura global nos próximos 25 anos, que pode ser potencializado pela recuperação econômica dos países desenvolvidos e emergentes. Historicamente, a procura por cobre tem sido superior à produção no Brasil. Em 2024, o Brasil exportou US\$ 337 bilhões em bens, sendo destes as exportações de cobre bruto (minério e concentrado) atingiram US\$ 4,16 bilhões em 2024. (JULIANI, MONTEIRO. 2016) (VEIT. 2005)

O cobre é o metal que, juntamente com o ouro, é o único metal que não exibe um tom prateado, exibindo uma tonalidade avermelhada distinta. O cobre possui alta resistência à corrosão, é extremamente reativo e é o segundo metal com maior capacidade de condução elétrica entre os identificados. A condição de oxidação mais frequente é +2.

Este metal está presente em vários minerais, sendo a calcopirita a principal fonte natural deste elemento. O cobre é empregado na fabricação de várias ligas metálicas, como o bronze e o latão, bem como na fabricação de moedas, fios, conectores eletrônicos, tubos de água e vapor, entre outros produtos.

O cobre e suas ligas são amplamente empregados na indústria por suas características físicas e químicas notáveis, tais como as propriedades térmicas (400 W/(m·K)), elétricas (58×10^6 S/m) e de resistência à corrosão. Contudo, material contaminado e/ou com baixa pureza têm um impacto significativo nas propriedades físicas do cobre e das ligas de cobre. O cobre puro, graças à sua elevada condutividade térmica, elétrica e capacidade de usinagem, é amplamente empregado nos setores aeroespacial, automobilístico e elétrico. Especificamente, o cobre puro é um dos principais insumos para trocadores de calor e radiadores, graças à sua elevada condutividade térmica (IKESHOJI et al., 2017) (TREVISAN, et al., 2017) (YAN, 2020). Com o crescimento acelerado das indústrias de manufatura e elétrica, aumentou também a necessidade de produzir peças e componentes com geometrias cada vez mais complexas, no entanto, os métodos de produção tradicionais nem sempre conseguem atender a essas exigências, tornando a fabricação de estruturas complexas um processo mais difícil e limitado. (HUANG , et al., 2020)

A calcopirita (CuFeS_2) é a principal fonte mineral de cobre, seguida pela malaquita ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$), calcantita ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), atacamita ($\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$) e cuprita (Cu_2O). O cobre está bem espalhado pelo planeta, porém com reservas limitadas. As reservas mais significativas de cobre estão localizadas no Chile, Austrália, Peru, Rússia e México. O Serviço Geológico dos Estados Unidos indica que o Chile é o maior produtor de cobre mineral, enquanto a China lidera a produção de cobre refinado. (NOVAIS) (USGS)

No Brasil, algumas das opções mais conhecidas de localidades para se encontrar minério de cobre são o sertão da Bahia e do nordeste em geral, também áreas como as localidades entre a região do Tapajós, que está localizada no sudoeste do Pará, na Amazônia brasileira, e a região do Carajás, a qual encontra-se na região sudeste do Pará, abrangendo sete municípios: Canaã dos Carajás, Curionópolis, Eldorado do Carajás, Marabá, Palestina do Pará, Parauapebas e Piçarra (FAPESPA) (VEIT. 2005). Além disso, lugares ainda não muito conhecidos aqui mesmo no Brasil têm ganhado destaque como a região de Realeza, sudoeste do Paraná, localizada a 210km de Foz do Iguaçu, a qual possui notório destaque por se tratar de uma brecha hidrotermal localizada na Bacia do Paraná, mesmo ainda sendo um local pouco explorado até hoje (VEIT. 2005).

2.1.1 Histórico da Mineração de Cobre

O cobre possui uma história fascinante que se estende por milhares de anos, sendo um dos primeiros metais a ser extraído e empregado pela humanidade. A descoberta e o progresso da mineração de cobre ao longo da história desempenham um papel crucial no progresso das civilizações e na mudança da sociedade. O cobre, um dos primeiros metais a ser usado, foi descoberto aproximadamente em 10.000 a.C. (fim do Paleolítico ou começo do Neolítico). Inicialmente, o cobre era encontrado em seu estado natural, sem a necessidade de refinamento ou fusão.

Provavelmente, o homem pré-histórico descobriu o cobre ao submeter pedras ao fogo ou ao calor, percebendo que certas pedras, ao serem aquecidas, liberavam um metal maleável. Este cobre era empregado na fabricação de ferramentas básicas, enfeites e armas. (HERBERT, 2003)

Como o cobre é um dos poucos metais disponíveis na natureza em sua forma pura, foi um dos primeiros a ser descoberto e empregado. Várias regiões do mundo, incluindo a Mesopotâmia e a Ásia Menor, apresentaram evidências de cobre nativo.

(DOEBRICH, 2009)

Cerca de 3.000 a.C., os humanos iniciaram a fusão do cobre para alcançar uma forma mais pura, empregando a fundição em forno. Este procedimento possibilitou que o cobre fosse moldado de maneira mais eficaz em ferramentas, utensílios e armas. Desde esse período, o bronze, uma combinação de cobre e estanho, tornou-se essencial para o progresso das civilizações. O bronze tinha uma resistência superior à do cobre puro, servindo como base para ferramentas, armas e até objetos religiosos. Isso originou a Era do Bronze. (O'BRIEN, 2014)

O cobre foi extensivamente empregado pelos egípcios, seja na construção (como nas ferramentas utilizadas para erguer as pirâmides), seja em utensílios domésticos e elementos decorativos. Durante a Grécia Antiga e o Império Romano, o cobre foi usado para várias finalidades, incluindo moedas e materiais de construção. Contudo, o bronze, uma liga de cobre, era frequentemente escolhido por sua durabilidade.

Durante a Idade Média, a mineração de cobre progrediu, particularmente na Europa, onde as minas de cobre começaram a ser exploradas de forma mais estruturada, empregando métodos mais sofisticados, como a utilização de moinhos de água primitivos para moer o minério e fornos de fundição mais eficazes. No período renascentista, os métodos de refinamento do cobre foram aperfeiçoados, particularmente na Alemanha, onde os primeiros fornos a carvão foram empregados para a separação do cobre do minério. (HERBERT, 2003)

Com o progresso da Revolução Industrial, a extração de cobre tornou-se mais intensiva e estruturada, tornando-se ainda mais vital, principalmente para a indústria de máquinas e para a geração de energia (utilizado em cabos elétricos, por exemplo). Foi intensificada a exploração de minas como as localizadas em Chile, Peru e Estados Unidos. A extração de cobre começou a ser realizada em grande escala, e a utilização de energia a vapor nas minas começou a simplificar o processo. No século XIX, o método de refino eletrolítico evoluiu, possibilitando um processo de refino do cobre mais eficaz. Isso foi crucial para a produção em larga escala do metal, particularmente devido ao aumento da procura por cabos elétricos, motores e outros componentes industriais. (PEARCE, 2019)

O avanço da eletricidade e das comunicações no começo do século XX tornou o cobre ainda mais relevante, graças à sua notável capacidade de condução elétrica. Durante essa época, o cobre foi empregado em fios de energia elétrica, linhas de transmissão e dispositivos eletrônicos. O crescimento da procura por cobre resultou em uma exploração mais intensa de grandes depósitos em nações como Chile, Peru, Austrália

e Zâmbia. Métodos como a flotação de minérios e o refinamento eletrolítico são frequentemente empregados, possibilitando a fabricação de cobre de elevada pureza. Ademais, a reciclagem de cobre começou a adquirir relevância, com o metal sendo reaproveitado em diversas indústrias.

No século XXI, a valorização do cobre se deve ao seu papel na energia renovável e na eletrificação de automóveis. O cobre é crucial na fabricação de baterias para carros elétricos, painéis fotovoltaicos e turbinas de vento. A indústria está empenhada em tornar a extração de cobre mais sustentável, empregando tecnologias que reduzam os efeitos ambientais, como o uso de energia renovável nas operações e a reciclagem de cobre de maneira mais eficaz. Atualmente, estão em andamento projetos de cobre em áreas com abundância de minerais, como a Amazônia e o deserto do Atacama no Chile, utilizando tecnologias inovadoras de extração, como a mineração subterrânea e a biomineria (utilização de microorganismos para a extração de metais). (PEARCE, 2019)

A extração de cobre no Brasil é um importante setor econômico, com relevância tanto para o mercado doméstico quanto para as exportações. O Brasil tem grandes reservas e diversos projetos em funcionamento, principalmente nas regiões Norte e Nordeste. A Vale, uma gigante brasileira com forte presença em cobre (além de ferro e níquel), e a Lundin Mining, uma empresa canadense que administra a mina Chapada, além da Ero Copper, que também atua no Vale do Curaçá (Bahia). O Brasil figura entre os 15 principais produtores globais de cobre, com a maior parte da produção sendo destinada à exportação, com a China se destacando como um dos principais mercados de consumo. Muitas vezes o que acontece é o Brasil não conseguir suprir a demanda de comércio de cobre que China necessita. (GERMANY, 2002). O crescimento da procura por cobre está intrinsecamente ligado ao desenvolvimento das indústrias de energia renovável (solar, eólica) e de automóveis elétricos, uma vez que o metal é crucial para baterias, cabos e infraestrutura.

2.1.2 Processo de Mineração de Cobre

Existem vários métodos para a extração de cobre, cada um apropriado para diferentes tipos de depósitos minerais e condições geológicas. Os dois principais métodos de extração de cobre são a mineração a céu aberto e a mineração subterrânea. No entanto, novas tecnologias vêm sendo empregadas para melhorar a eficiência e diminuir o impacto no meio ambiente.

A extração de cobre por mineração a céu aberto é um dos métodos mais frequentes, especialmente quando os depósitos de minério estão situados próximos à superfície ou em extensas regiões horizontais. Este procedimento implica na remoção das camadas superiores de solo e rochas para alcançar o minério escondido. (PIETRZYK, TORA, 2018)

Inicialmente, são conduzidos estudos geológicos e coletas de amostras para determinar a localização e a quantidade do minério de cobre. Métodos de sondagem são empregados para recolher amostras de minério e estabelecer sua composição. Depois da perfuração e avaliação, inicia-se o procedimento de desmonte. O minério é extraído do solo através de equipamentos de perfuração de grande porte e escavadeiras. Enquanto o minério é transportado para as áreas de processamento, as rochas que não possuem cobre são descartadas. O material que não possui cobre, conhecido como estéril, é removido e acumulado ao redor da área de extração, resultando em grandes depósitos de estéril. Isso pode causar um impacto ambiental considerável, se não for adequadamente administrado.

O minério obtido é encaminhado para as instalações de beneficiamento, onde será tratado para distinguir o cobre dos demais minerais. O procedimento inclui britagem (quebra das rochas em fragmentos menores), moagem do minério em moinho de bolas e flotação (separação do cobre do ganga, ou material menos valioso). A extração de minérios a céu aberto é mais econômica em relação à subterrânea, principalmente por causa da facilidade de acesso ao minério. Ela possibilita a extração de grandes quantidades de minério de maneira ágil e eficiente, o que representa um grande benefício.

No entanto, o processo de beneficiamento pode resultar em desmatamento, destruição de habitats naturais e contaminação de rios e solos devido à utilização de substâncias químicas no procedimento. Ademais, demanda vastas extensões de terra, o que pode representar um desafio em áreas com elevada densidade demográfica ou biodiversidade. (LU, et al., 2023) (SANTORO, et al., 2021)

A mineração subterrânea é empregada quando os depósitos de cobre estão situados a grandes profundidades ou quando a extração a céu aberto é inviável por causa da existência de zonas urbanas ou da complexidade do terreno. Inicialmente, é feita a perfuração vertical ou inclinada para estabelecer um poço de ar e um túnel de acesso ao minério. Uma vez no subsolo, utiliza-se explosivos controlados para desintegrar a rocha e abrir passagens para os depósitos de cobre. Os depósitos de cobre são encontrados em minas subterrâneas através de um sistema de galerias, que são túneis horizontais ou verticais construídos para acessar os reservatórios. As câmaras de mineração são

escavadas onde o minério de cobre se encontra concentrado, sendo o cobre obtido e levado até a superfície. O minério obtido é carregado e conduzido até o nível do mar por meio de sistemas de correias transportadoras, elevadores ou carrinhos. Depois de chegar à superfície, o minério é submetido aos procedimentos de beneficiamento.

Uma das vantagens é a diminuição do impacto ambiental direto, já que o minério é obtido do subsolo, não sendo necessário remover grandes volumes de terra e estéril, o que diminui o impacto visual e os prejuízos ao ecossistema. Por operar com túneis e galerias, reduz a área superficial diretamente afetada, preservando parte da cobertura vegetal e dos habitats. Porém, pode gerar impactos indiretos como afundamento do solo, alterações no fluxo de águas subterrâneas, contaminação hídrica e riscos de colapso de áreas sobrejacentes. Esses efeitos são mais localizados, mas ainda significativos para o ecossistema. Além disso, a pesquisa de depósitos subterrâneos possibilita a extração de cobre em profundidades onde a mineração a céu aberto seria impraticável. (DONG, et al., 2020)

No entanto, a mineração subterrânea é consideravelmente mais onerosa devido aos gastos com equipamentos especializados, mão de obra e a exigência de infraestrutura para proteção e ventilação. Além de que as condições laborais em minas subterrâneas podem ser mais arriscadas devido à possibilidade de desmoronamentos, explosões e a exposição a gases nocivos.

Nos últimos anos, a indústria do cobre vem implementando tecnologias inovadoras para aprimorar a eficiência da extração, diminuir despesas, aprimorar a segurança e diminuir o impacto no meio ambiente. Numerosas empresas de mineração estão implementando equipamentos automatizados, tais como caminhões, perfuratrizes e escavadeiras, com o objetivo de aprimorar as atividades. Esses veículos dispensam condutores humanos, o que diminui falhas, potencializa a eficiência e aprimora a segurança. A utilização de drones para a localização e supervisão de minas está se tornando cada vez mais frequente. Ademais, sensores em tempo real auxiliam no monitoramento de condições ambientais, tais como temperatura, umidade e segurança, possibilitando respostas ágeis a qualquer ocorrência. (SANTORO, et al., 2021) (PIETRZYK, TORA, 2018)

A biomineria, também conhecida como mineração biotecnológica, emprega microrganismos ou plantas para ajudar na extração de cobre. Métodos de lixiviação bacteriana empregam bactérias que auxiliam na dissolução do cobre do minério, o que simplifica sua extração. Esta metodologia é menos prejudicial ao meio ambiente e pode ser

aplicada na extração de minérios de qualidade inferior. A lixiviação bio-oxidativa emprega microrganismos na oxidação de minerais sulfetados, liberando cobre e possibilitando sua recuperação. Esta tecnologia é particularmente benéfica em depósitos de cobre de baixa lei, onde a concentração de cobre no minério é reduzida. (GUTIERREZ, VERA)

Em certas áreas, tais como fundos marinhos e lagos, companhias estão iniciando a exploração de depósitos de cobre que se encontram submersos. A extração de cobre de fontes minerais subaquáticas é realizada através do uso de veículos autônomos e equipamentos especializados.

A importância do cobre reciclado tem aumentado progressivamente. As estratégias de reciclagem de cobre consistem na recolha e na transformação de cobre proveniente de resíduos, tais como fios elétricos, tubos e outros itens de cobre. Isso não apenas diminui a demanda por extração de cobre mineral, como também favorece a sustentabilidade. (ZIĘTEK, 2025)

2.1.3 Impactos Ambientais

A extração de cobre tem um papel crucial na economia mundial e no progresso tecnológico, sendo crucial na fabricação de cabos elétricos, peças eletrônicas, baterias e equipamentos industriais. Contudo, essa atividade de extração está diretamente ligada a diversos impactos ambientais significativos, que englobam a contaminação de recursos hídricos, a deterioração do solo, a destruição de ecossistemas e a liberação de poluentes no ar. Se não forem controlados, esses impactos prejudicam a qualidade de vida das comunidades próximas, a biodiversidade e a harmonia dos sistemas naturais. (COAYLA, ROMERO CARRION, BEDÓN SORIA, 2024)

Uma das maiores questões ambientais associadas à extração de cobre é a poluição da água, seja ela superficial ou subterrânea. Ao longo do processo de extração e beneficiamento de minérios, utiliza-se uma grande quantidade de água, que pode ser poluída com metais pesados como chumbo, cádmio, arsênio e mercúrio, além de compostos químicos como o ácido sulfúrico, comumente usado em processos lixiviativos. O surgimento da denominada drenagem ácida de minas (DAM) é uma ilustração típica desse efeito. Isso acontece quando minerais sulfetados em contato com o ar e a água originam uma solução ácida que contém vários metais nocivos. Esta água poluída, ao infiltrar no solo ou correr para rios e lagos, prejudica gravemente a qualidade da água,

ameaçando a saúde humana e os ecossistemas aquáticos. (SILVA, 2010)

Além da água, o solo também é diretamente impactado pela atividade de mineração. A exploração de minas a céu aberto e o armazenamento impróprio de resíduos levam à supressão da vegetação nativa, à compactação do solo e, frequentemente, à contaminação por metais pesados. O solo deteriorado perde sua capacidade produtiva, tornando-se impróprio para atividades de agricultura e complicando a recuperação da flora local. Outro aspecto crucial é a disposição dos rejeitos, materiais que sobram após a extração do cobre. Se armazenados inadequadamente em barragens ou pilhas, esses detritos podem vazar ou se infiltrar no solo, modificando sua composição química. Frequentemente, a erosão e a desertificação resultam de consequências prolongadas da mineração irresponsável. (BORN, CIFTCI, 2024)

A devastação dos ecossistemas é um resultado inevitável da mineração de grande porte. A eliminação da vegetação nativa, imprescindível para a abertura de minas, impacta diretamente os habitats de várias espécies de animais e plantas. Esta fragmentação do habitat compromete a sobrevivência da fauna local e coloca em perigo espécies endêmicas, frequentemente as colocando em perigo de extinção. Ademais, a contaminação do solo e da água se espalha pelos ecossistemas, prejudicando as cadeias alimentares e impactando desde seres microscópicos até animais de grande dimensão. A liberação de partículas de poeira, ruídos e poluentes no ar intensifica o desequilíbrio ecológico. (MARTIM, SANTOS, 2013)

Embora cause impactos significativos, a extração de cobre pode ser feita de maneira mais consciente através do uso de tecnologias sustentáveis, práticas de gestão ambiental eficientes e políticas de sustentabilidade. O tratamento das águas impactadas pela drenagem ácida de minas é uma das soluções mais cruciais. Métodos como a neutralização química com cal ou calcário contribuem para diminuir a acidez da água e precipitar metais pesados, facilitando a sua eliminação. Ademais, a biorremediação, que emprega microrganismos e plantas para absorver ou modificar poluentes, tem se destacado como uma opção ecológica promissora. (MARTIM, SANTOS, 2013)

A administração segura dos resíduos é uma prioridade nas empresas de mineração contemporâneas. Uma abordagem inovadora é o empilhamento a seco (dry stacking), que dispensa a utilização de barragens convencionais ao purificar a água dos rejeitos, resultando em pilhas sólidas menos propensas a catástrofes. Ademais, sistemas de monitoramento em tempo real, auxiliados por sensores, auxiliam na detecção antecipada de riscos estruturais. (VEIT, et al., 2008)

É crucial a recuperação ambiental das regiões mineradas para reduzir os efeitos duradouros. Este procedimento engloba o reflorestamento com espécies locais, a recomposição do solo com nutrientes orgânicos e a elaboração de um fechamento apropriado da mina, considerando o uso futuro do local já estabelecido (como parques, áreas de preservação ou iniciativas sociais).

Muitas empresas estão optando por fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica, em vez de utilizar combustíveis fósseis. Além de automatizar e digitalizar os processos, a utilização de veículos elétricos nas minas tem ajudado a reduzir o uso de energia e o impacto ambiental da atividade. (LI, Xiang, et al., 2024)

Todas as atividades de mineração devem ser licenciadas ambientalmente, o que engloba estudos de impacto, ações de mitigação e planos de compensação ambiental. A Agência Nacional de Mineração (ANM) e entidades estaduais supervisionam a observância dessas regras. Adicionalmente, existem estímulos para a responsabilidade socioambiental, como a exigência de alocar recursos para a recuperação do meio ambiente e o progresso das comunidades impactadas.

Sem dúvida, a extração de cobre é uma atividade de grande relevância econômica, porém também possui um grande potencial de destruição para o meio ambiente. A contaminação da água e do solo, o declínio dos ecossistemas e os perigos para a saúde pública são consequências que requerem monitoramento e controle contínuos.

O progresso tecnológico, juntamente com a pressão social e a intervenção de entidades ambientais, tem impulsionado a indústria da mineração a procurar modelos mais sustentáveis, que equilibrem o crescimento econômico com a conservação do meio ambiente. A adoção de práticas gerenciais contemporâneas, a recuperação de áreas degradadas e o aporte em soluções inovadoras indicam um futuro em que a extração de cobre possa ser feita com menos impactos e maiores responsabilidades sociais e ambientais.

2.1.4 Aspectos Sociais e Econômicos

A extração de cobre é uma das atividades mais significativas para a economia global, desempenhando um papel estratégico na geração de energia, tecnologia, construção e setor elétrico. Contudo, a sua presença em áreas habitadas gera efeitos

intrincados nas comunidades locais, variando desde vantagens econômicas até graves ameaças à saúde e ao ambiente. As consequências mudam de acordo com o nível de regulamentação, a atividade das empresas de mineração, a infraestrutura local e a estrutura social das comunidades impactadas.

Em áreas onde existem atividades de mineração de cobre, particularmente em regiões mais isoladas e com desenvolvimento anterior limitado, a instalação de uma mineradora pode representar uma chance de expansão econômica. A exploração de minas geralmente cria empregos tanto diretos quanto indiretos. Além das posições formais no setor de mineração, como operadores, engenheiros, técnicos e administradores, existe uma demanda por serviços terceirizados, como restaurantes, hotéis, transporte e segurança, o que impulsiona a economia local. As cidades mineradoras recebem royalties da mineração através da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) no Brasil, juntamente com receitas provenientes do imposto sobre serviços (ISS), imposto sobre circulação de mercadoria e serviços (ICMS) e outros impostos. Este capital pode ser aplicado em infraestrutura urbana, saúde, educação e construção de infraestrutura pública. Numerosas mineradoras praticam ações de responsabilidade social empresarial, desenvolvendo programas de formação profissional, assistência a escolas, edificação de hospitais e espaços culturais. Quando bem empregados, esses investimentos podem proporcionar um impacto positivo para a comunidade. (BAETA, 2023) (MARTIM, SANTOS, 2014) (TREVISAN, et al., 2017)

Embora traga vantagens, a extração de cobre também apresenta desafios significativos e complexos para as comunidades locais, frequentemente intensificando as desigualdades e provocando conflitos sociais. Em determinadas situações, comunidades tradicionais, indígenas ou agricultores familiares são forçados a se deslocar para a construção de minas, vias ou barragens de rejeitos. Isso resulta na perda de identidade cultural, vínculos sociais e estilos de vida convencionais. Nem sempre o reassentamento é realizado de maneira equitativa, provocando insatisfação e marginalização. Com a entrada de grandes corporações e trabalhadores estrangeiros, os gastos com habitação, alimentação e serviços tendem a aumentar nas áreas de mineração. Frequentemente, os residentes antigos da área não conseguem acompanhar esse crescimento, resultando em exclusão social e conflitos com os recém-chegados. (DONG, et al., 2020) (MARTIM, SANTOS, 2014)

A atividade de mineração utiliza grandes quantidades de água, o que em áreas com escassez de água pode provocar conflitos com a população local, agricultores

ou comunidades à beira dos rios. A falta de água potável não apenas afeta o dia a dia, mas também tem um impacto direto na produção agrícola e na segurança alimentar da área. Quando a economia de uma cidade se baseia fortemente na mineração, surge o perigo de "monocultura econômica". Caso as jazidas se esgotem ou os preços do cobre caiam no mercado global, a cidade pode passar por uma recessão, desemprego em larga escala e desmantelamento da infraestrutura estabelecida, caracterizando o conhecido "ciclo do boom e colapso". (MURARI, SIDDIQUE, JAIN, 2014)

Um dos pontos mais alarmantes da mineração de cobre diz respeito à saúde das comunidades localizadas perto das zonas de extração e processamento. A mineração e o processamento do cobre podem resultar na liberação de metais nocivos, tais como chumbo, arsênio, mercúrio e cádmio. Essas substâncias têm a capacidade de poluir o ar, a água e o solo, afetando diretamente os habitantes da área. Ao longo do tempo, a ingestão ou inalação desses metais está ligada a problemas neurológicos em crianças, câncer de fígado, pulmão e rins, doenças renais crônicas, dificuldades reprodutivas e abortos espontâneos, entre outros problemas. (MURARI, SIDDIQUE, JAIN, 2014)

A Drenagem ácida de Minas (DAM) tem a capacidade de converter corpos de água em fontes de água extremamente ácidas e poluídas. Embora sejam tratadas, essas águas não podem ser reutilizadas para consumo humano ou irrigação, o que intensifica a crise de água e amplia a vulnerabilidade sanitária da população. (MÉNDEZ-SUÁREZ, GARCÍA-FERNÁNDEZ, GALLARDO, 2019)

A constante movimentação de terra, o transporte de minério e a utilização de explosivos produzem partículas finas que se disseminam no ar. Nas áreas próximas a minas, observa-se um crescimento nos casos de asma, bronquite, pneumoconioses e outras enfermidades respiratórias, especialmente em crianças e pessoas idosas. Além dos prejuízos materiais, existem efeitos psicológicos ligados ao estresse social, ao receio de catástrofes, à perda de propriedades e a disputas com empresas ou autoridades. Pesquisas apontam que comunidades impactadas por grandes projetos de mineração exibem índices elevados de depressão, ansiedade e violência doméstica. (MURARI, SIDDIQUE, JAIN, 2014)

A mineração de cobre transforma territórios e vidas. Para as comunidades locais, ela representa tanto esperança de progresso quanto riscos concretos à saúde, ao meio ambiente e à estabilidade social. A dificuldade reside em conciliar crescimento econômico com equidade social e proteção ambiental, através de políticas públicas efetivas, regulação rigorosa e uma atuação responsável das empresas de mineração.

Somente dessa forma poderemos converter a abundância do subsolo em vantagens duradouras para os habitantes da superfície.

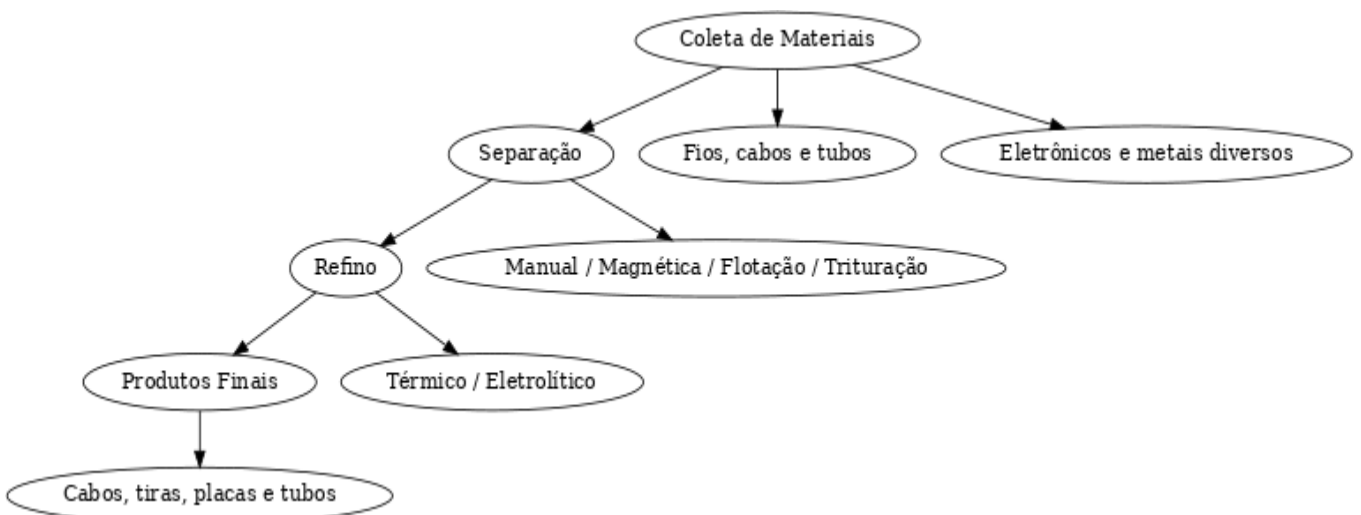
2.1.5 Reciclagem do Cobre

O cobre é um metal com grande capacidade de reciclagem, sendo essa uma de suas principais vantagens. A reciclagem de cobre pode ser realizada quase sem alteração de qualidade, o que implica que ele pode ser reciclado continuamente sem comprometer suas características. Isso faz dele um material perfeito para reaproveitamento em várias indústrias. A extração de cobre provoca efeitos ambientais consideráveis, tais como o desmatamento, a contaminação dos rios e a deterioração de ecossistemas. A reciclagem diminui a necessidade de cobre obtido diretamente do ambiente. (BORN, CIFTCI, 2024)

O procedimento de reciclagem de cobre consome consideravelmente menos energia em comparação à extração e ao refino de cobre puro. A estimativa é que o processo de reciclagem de cobre consuma apenas 10-15% da energia necessária para a produção do cobre primário. Dado que o cobre é limitado e as jazidas de cobre estão progressivamente acabando, a reciclagem contribui para assegurar que o material permaneça acessível para as próximas gerações. (AGRAWAL, SAHU, 2010)

A reciclagem de cobre compreende diversas fases técnicas, como a coleta, a separação, a purificação e o refinamento do material. A seguir temos as etapas referentes a essas fases: (LI, Liquan, et al., 2017) (VEIT, et al., 2008) (LI, Xiang, et al., 2024)

Figura 1 – Etapas da reciclagem de cobre



FONTE: Própria autora, 2025.

. Recolha e Escolha de Materiais

O primeiro passo consiste em recolher cobre usado, que pode ser proveniente de vários produtos, tais como fios e cabos elétricos, um dos principais componentes do cobre reciclado, tubos e canos de cobre, empregados em sistemas de água e ar condicionado, produtos eletrônicos (como placas de circuito e outros componentes de computadores e celulares), barris de cobre e metais empregados nas indústrias da construção e do automobilismo.

Frequentemente, o cobre reciclado provém de fontes mistas, o que implica que pode estar em combinação com outros metais ou materiais, tornando a separação um passo crucial.

. O Processo de Separação

A separação é essencial para assegurar a recuperação eficaz e de alta qualidade do cobre. Algumas das estratégias empregadas incluem:

Classificação manual: Em algumas instalações de reciclagem, os operários separam manualmente o cobre de outros materiais, apesar de essa prática estar se tornando cada vez menos frequente devido ao elevado custo e ao risco de erros.

Separação magnética: Para separar o cobre de outros metais ferrosos, como o aço, utiliza-se um separador magnético. Devido à sua natureza não magnética, o cobre pode ser facilmente separado do ferro e do aço.

Separação por densidade: Em determinadas instalações, a distinção é realizada por meio de processos de separação gravítica, nos quais os materiais são combinados com água, e o cobre é separado por sua densidade distinta dos demais materiais.

Função das máquinas de trituração: Outra estratégia frequente é o uso de trituradores, que cortam os cabos de cobre e outros materiais em partes menores, simplificando a distinção entre o cobre e outros materiais como plásticos ou metais.

. Refino e Purificação

Depois da primeira separação, o cobre é submetido a um processo de refino para atingir a pureza desejada. O cobre reciclado pode conter impurezas provenientes de outros metais e substâncias orgânicas, como plásticos ou borrachas, que necessitam ser eliminadas.

Refino térmico: O processo de fundição do cobre reciclado acontece em

fornos que aquecem o material a altas temperaturas. Então, o cobre derretido é purificado por meio de métodos como a eletrólise, que utiliza a eletricidade para eliminar as impurezas.

Refinamento eletrolítico: Num procedimento mais sofisticado, o cobre fundido é levado a uma célula de eletrólise, onde a eletricidade auxilia na eliminação de impurezas e no refinamento do cobre. O cobre resultante é de elevada pureza, frequentemente superando 99,99% de pureza, sendo este produto final pronto para ser utilizado na indústria.

O cobre refinado pode ser usado para produzir uma variedade de produtos, incluindo fios e cabos elétricos para a construção de infraestruturas elétricas, tiras e placas de cobre empregadas em componentes eletrônicos, sistemas de refrigeração e veículos, além de produtos de construção, como tubos de cobre para instalações hidráulicas e sistemas de aquecimento.

Apesar da reciclagem do cobre ser extremamente benéfica, também apresenta alguns obstáculos. Em certas situações, o cobre reciclado pode estar em combinação com outros metais, como o alumínio ou o zinco, o que pode complicar a purificação e diminuir a qualidade do produto final. Apesar de o processo de reciclagem consumir menos energia do que a mineração, a separação do cobre de outros materiais (como plásticos, alumínio e outros metais) pode ser um procedimento caro, especialmente em grandes quantidades. Em certos produtos, como os eletrônicos, a extração de cobre pode ser desafiadora, pois as quantidades de cobre presentes são reduzidas e o procedimento de separação deve ser extremamente preciso para evitar o desperdício de material valioso. Apesar da prática de reciclagem de cobre ser estabelecida em diversas nações, a escassez de infraestrutura em certas áreas pode restringir a capacidade de reciclagem, resultando em desperdício e no envio de materiais para aterros sanitários. (VEIT, et al., 2008)

Com o aumento do interesse em sustentabilidade e economia circular, a reciclagem de cobre está ganhando relevância, e novas tendências estão surgindo, como a economia circular. O conceito principal da economia circular é a reutilização constante de materiais. Em relação ao cobre, isso implica que ele tem a capacidade de ser reciclado e reincorporado ao ciclo de produção diversas vezes, sem comprometer sua qualidade. O avanço de novas tecnologias de separação, como a Inteligência Artificial (IA) para aprimorar os procedimentos de triagem e a aplicação da nanotecnologia para aprimorar a extração de cobre de materiais mistos, tem potencial para ampliar a eficácia da reciclagem. (LI, Xiang, et al., 2024)

Com o crescimento do uso de aparelhos eletrônicos, existe uma pressão crescente para a reciclagem de produtos como telefones celulares, computadores e televisores, que também contêm cobre, embora em níveis menores. A criação de técnicas mais eficazes para a reciclagem desses produtos será crucial. Adicionalmente, diversos governos estão estabelecendo políticas de reciclagem compulsória e oferecendo incentivos financeiros para promover a reutilização de materiais e diminuir a dependência de recursos naturais não renováveis. (ZIĘTEK, 2025)

A reciclagem de cobre é fundamental para o desenvolvimento sustentável da indústria. Não apenas diminui a demanda por mineração e protege os recursos naturais, como também proporciona vantagens econômicas, como a diminuição dos gastos com energia e a melhoria da segurança dos fornecimentos. Com o avanço da tecnologia e o aumento do interesse em práticas mais sustentáveis, a reciclagem de cobre pode se tornar mais eficaz, contribuindo para a construção de um futuro mais ecológico e diminuindo os efeitos ambientais da fabricação de cobre. (BORN, CIFTCI, 2024)

2.2 A APLICAÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA MINERAÇÃO E RECICLAGEM DO MINÉRIO DE COBRE

O cobre desempenha um papel crucial na economia mundial e no progresso tecnológico atual. Devido às suas características físico-químicas, tais como alta condutividade elétrica e térmica, ductilidade e resistência à corrosão, é frequentemente empregado em diversas aplicações industriais. Dentre as principais indústrias que utilizam cobre estão a construção civil, a produção de aparelhos eletrônicos, a produção de veículos elétricos, redes de distribuição de energia e, mais recentemente, sistemas de produção de energia renovável, tais como painéis fotovoltaicos e turbinas de vento. (MURARI, SIDDIQUE, JAIN, 2014)

Nas últimas décadas, notou-se um crescimento notável na procura por cobre, principalmente devido à transição energética mundial, que tem como objetivo a substituição gradual de fontes fósseis por alternativas limpas e renováveis. Este processo exige a edificação de novas redes elétricas e o crescimento de redes inteligentes de distribuição de energia, onde o cobre tem um papel crucial. Ademais, a expansão da indústria eletrônica e da mobilidade elétrica também tem intensificado a demanda por esse recurso, cuja extração e reutilização se transformaram em questões fundamentais para a sustentabilidade dos

setores mineral e industrial. (MURARI, SIDDIQUE, JAIN, 2014)

Nessa situação, torna-se cada vez mais crucial criar técnicas inovadoras, sustentáveis e eficazes para a extração e reaproveitamento do cobre, tanto para diminuir os gastos operacionais quanto para atenuar os efeitos ambientais provenientes da mineração convencional. A demanda por maior compromisso com o meio ambiente, a falta de novas reservas economicamente viáveis e os obstáculos associados à gestão de resíduos destacam a relevância de uma estratégia tecnológica mais sofisticada e inteligente.

Neste contexto, ressalta-se a importância crescente da Inteligência Artificial (IA). A Inteligência Artificial é um conjunto de tecnologias de computação que possibilitam às máquinas reproduzir a habilidade humana de raciocínio, aprender a partir de dados, reconhecer padrões, tomar decisões e solucionar problemas de maneira independente. Com o progresso em campos como o aprendizado de máquina, visão computacional, mineração de dados e algoritmos preditivos, a Inteligência Artificial começou a ser integrada em várias fases da produção do cobre, desde a busca mineral e extração em minas, até os procedimentos de triagem e reaproveitamento de sucata metálica e resíduos eletrônicos. (MÉNDEZ-SUÁREZ, GARCÍA-FERNÁNDEZ, GALLARDO, 2019)

Na mineração, a Inteligência Artificial tem sido empregada para executar análises geológicas mais acuradas, aprimorando a detecção de regiões com grande potencial mineral, diminuindo os riscos de exploração e aprimorando a eficácia das operações. Ademais, sistemas inteligentes operam dispositivos autônomos, supervisionam a integridade de máquinas em tempo real e possibilitam decisões fundamentadas em dados, auxiliando na produção mais segura, eficiente e com menor impacto no meio ambiente.

Por outro lado, na reciclagem, a Inteligência Artificial ajuda na triagem automática de materiais, na identificação exata de componentes que contêm cobre (como fios, placas de circuito e motores), além de gerenciar de forma inteligente os fluxos de resíduos. Isso é especialmente pertinente em um cenário de aumento na produção de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, que constituem uma fonte secundária de cobre de grande valor. Ademais, a Inteligência Artificial pode ser empregada para antecipar oscilações no mercado de metais e ajudar as indústrias de reciclagem a estabelecer estratégias comerciais mais eficientes.

Assim, a incorporação da Inteligência Artificial nas áreas de extração e reciclagem de cobre sinaliza uma convergência promissora entre avanço tecnológico, viabilidade econômica e preservação ambiental. Esta mudança tecnológica está impulsionando uma

nova maneira de gerir a cadeia do cobre, fundamentada na digitalização, na automação e na inteligência analítica. O uso cada vez maior dessas tecnologias pode reformular os critérios de produtividade, segurança e responsabilidade socioambiental no setor. (ELSHKAKI, et al., 2016)

2.2.1 Mineração do Cobre

A extração de minerais é uma das atividades econômicas mais antigas da humanidade, sendo crucial para o progresso das sociedades ao longo da história. Contudo, apesar do progresso das tecnologias mecânicas e processos industriais ao longo dos séculos, a maior parte das atividades de mineração, até recentemente, manteve-se fortemente atrelada a métodos tradicionais, decisões empíricas e intervenções humanas diretas. Em muitos casos, a seleção de áreas para prospecção, o planejamento das operações e o monitoramento da qualidade do minério extraído eram fundamentados em modelos geológicos convencionais e na experiência adquirida por engenheiros e técnicos ao longo dos anos.

A mineração passou por uma profunda transformação com a chegada dos novos modelos de indústria, mais *high-techs*, caracterizados pela fusão de tecnologias digitais, automação, conectividade e inteligência artificial (IA). Essa mudança é especialmente significativa na extração de cobre, devido à sua importância estratégica na transição energética e no avanço tecnológico. Neste cenário, o uso da inteligência artificial não só atualiza os processos de produção, mas também impulsiona progressos notáveis em eficiência operacional, sustentabilidade ambiental, segurança laboral e tomada de decisões fundamentadas em dados.

Segue uma descrição das principais formas de uso da inteligência artificial na indústria de mineração de cobre, desde o estágio inicial de busca até as fases operacionais e de beneficiamento do minério.

2.2.1.1 Exploração mineral com base em dados geológicos

O processo inicial da mineração, que consiste na busca por regiões ricas em cobre, é um dos mais dispendiosos e imprevisíveis. Através de métodos de aprendizado de máquina e modelagem preditiva, a Inteligência Artificial possibilita a avaliação conjunta de

grandes quantidades de dados geológicos, geoquímicos e geofísicos. Esses algoritmos são aptos a detectar padrões e correlações que seriam invisíveis ao olhar humano, apontando com maior exatidão áreas com grande potencial mineral. Assim, diminui-se a quantidade de sondagens requeridas e aumenta-se a probabilidade de êxito nas descobertas. (ALI, FRIMPONG, 2020)

2.2.1.2 *Otimização da extração*

A fase de extração pode ser significativamente favorecida pela Inteligência Artificial. Sistemas inteligentes têm a capacidade de modificar automaticamente as configurações de perfuração e detonação conforme a dureza e a composição do solo, otimizando a fragmentação do minério e reduzindo as perdas. Adicionalmente, sensores incorporados em equipamentos de perfuração e transporte fornecem informações em tempo real que, ao serem avaliadas por Inteligência Artificial, possibilitam o acompanhamento constante das condições operacionais e a detecção antecipada de falhas mecânicas, prevenindo interrupções não programadas e fortalecendo a segurança no local de trabalho. (ALI, FRIMPONG, 2020)

2.2.1.3 *Gestão de frotas e equipamentos autônomos*

Em minas de grande porte, veículos autônomos como caminhões de transporte, escavadeiras e perfuratrizes já são uma realidade. A Inteligência Artificial é encarregada de administrar e coordenar essas máquinas, aprimorando suas trajetórias e tarefas de acordo com a necessidade operacional e as condições do terreno. Isso não só aprimora a eficiência e diminui o uso de combustível, mas também diminui as chances de acidentes envolvendo operadores humanos, incentivando uma operação mais segura e sustentável.

2.2.1.4 *Análise da qualidade do minério*

Utilizando sensores espectrais e câmeras multiespectrais em conjunto com sistemas de Inteligência Artificial, podemos fazer uma classificação exata do minério extraído com base no seu conteúdo de cobre. Esta avaliação possibilita um direcionamento mais eficaz do material para os processos de beneficiamento, distinguindo com mais exatidão o minério de alta qualidade do estéril. O resultado é um crescimento na

recuperação de cobre e uma diminuição considerável no uso de energia e produtos químicos durante o processo. (FLORES, LEIVA, 2021)

2.2.2 Reciclagem de minério de cobre

A reciclagem de cobre é especialmente benéfica tanto em termos energéticos quanto ambientais. A produção de cobre a partir de reciclagem pode consumir até 85% menos energia do que a obtenção de cobre primário através da mineração. Adicionalmente, a reciclagem auxilia na diminuição das emissões de gases que intensificam o efeito estufa, previne o descarte impróprio de resíduos e alivia a pressão sobre ecossistemas vulneráveis. Neste cenário, a incorporação da Inteligência Artificial nos processos de reciclagem se apresenta como uma abordagem inovadora, com grande potencial para incrementar a eficácia, a exatidão, a rastreabilidade e a sustentabilidade financeira deste empreendimento. (AHMED, ASADULLAH, 2020)

As utilizações da Inteligência Artificial na reciclagem do cobre envolvem várias fases, desde a separação automática de resíduos até a previsão de demanda de mercado e a otimização de percursos logísticos. Em seguida, discutiremos detalhadamente como a inteligência artificial está convertendo a reciclagem do cobre em um procedimento mais contemporâneo, inteligente e sustentável.

2.2.2.1 *Triagem automatizada de resíduos*

A principal dificuldade na reciclagem do cobre reside na separação eficaz do metal em meio a outros elementos, tais como plásticos, ligas metálicas e aparelhos eletrônicos ultrapassados. Sistemas de visão computacional com Inteligência Artificial, frequentemente ligados a braços robóticos, têm sido utilizados para reconhecer e categorizar itens que contêm cobre, tais como cabos, motores elétricos, placas de circuito impresso e transformadores. Esses mecanismos examinam as propriedades visuais e estruturais dos materiais em tempo real, elevando a pureza do material recuperado e diminuindo a demanda por intervenção humana. (GUPTA, et al., 2019)

2.2.2.2 *Reconhecimento de materiais em tempo real*

Um dos desafios na reciclagem de cobre é a identificação exata do metal quando

ele está em combinação com outros materiais ou incorporado em componentes eletrônicos complexos. Em tais situações, uma simples avaliação visual pode não ser adequada. A Inteligência Artificial, em conjunto com tecnologias de sensores hiperespectrais, tem possibilitado progressos notáveis neste campo.

Os sensores hiperespectrais registram as características espectroscópicas dos materiais em diversas regiões do espectro eletromagnético, permitindo a diferenciação entre metais com base em sua composição química. Quando incorporados a sistemas inteligentes, essas informações são tratadas por algoritmos que categorizam os materiais de forma automática, mesmo em fluxos intrincados de resíduos industriais ou eletrônicos.

Por exemplo, essa tecnologia provou ser eficiente na detecção de pequenas quantidades de cobre embutidas em placas de circuito impresso ou combinadas com outros metais não ferrosos. A separação automática baseada nessas análises espectrais eleva consideravelmente a taxa de recuperação de cobre e ajuda a minimizar as perdas de material valioso no processo. (ANTONY JOSE, et al., 2024)

2.2.2.3 Otimização logística na cadeia de reciclagem

A inteligência artificial pode melhorar consideravelmente a logística de coleta, transporte e triagem de resíduos que contêm cobre. Sistemas de roteamento inteligentes avaliam informações em tempo real sobre a localização de pontos de coleta, a quantidade de resíduos e a procura nos centros de reciclagem, elaborando trajetos mais eficientes para os caminhões de coleta e aprimorando a operação em toda a rede.

2.2.2.4 Previsão de demanda e precificação

O mercado de metais recicláveis, que inclui o cobre, enfrenta flutuações frequentes de preço, afetadas por elementos como a oferta e procura globais, a disponibilidade de matéria-prima primária, políticas ambientais e alterações na taxa de câmbio. Neste contexto instável, a Inteligência Artificial tem um papel estratégico ao disponibilizar instrumentos sofisticados de análise preditiva para auxiliar na tomada de decisões nas empresas de reciclagem.

Modelos de Inteligência Artificial aprimorados com dados históricos de preços, informações econômicas, índices de produção industrial, volumes de importação e exportação e indicadores geopolíticos têm a capacidade de antecipar tendências de

mercado com elevada precisão. A partir dessas previsões, as empresas podem determinar o momento ideal para vender seus estoques de cobre reciclado, negociar contratos com margens mais elevadas ou ajustar sua produção às tendências futuras do mercado. (KHOSHALAN, et al., 2021)

Ademais, esses sistemas podem auxiliar na identificação de novas possibilidades de mercado para o cobre reciclado, tais como a venda para indústrias de tecnologia verde, fabricantes de carros elétricos ou companhias de infraestrutura energética, áreas que devem apresentar um crescimento expressivo nas próximas décadas.

A utilização da inteligência artificial na reciclagem de cobre é uma das mais promissoras áreas tecnológicas na área de gestão de resíduos e economia circular. Frente aos desafios ambientais do século XXI, como a falta de recursos naturais e o crescimento da produção de resíduos eletrônicos, a união entre reciclagem e inteligência artificial se torna não só uma alternativa, mas também uma exigência estratégica para o futuro do setor. A implementação dessas tecnologias pode não só diminuir os custos e os efeitos ambientais da reciclagem, mas também elevar as empresas a um novo nível de inovação e responsabilidade social.

3 METODOLOGIA

3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

A primeira etapa metodológica consiste na realização de uma ampla revisão bibliográfica, em seguida, foi realizada a coleta de dados secundários, com foco em informações sobre o volume de cobre extraído e reciclado no Brasil e no mundo, consumo energético envolvido, emissão de gases de efeito estufa, custos operacionais e indicadores de impacto ambiental, como uso da água, degradação do solo e geração de resíduos.

A partir das informações coletadas, foi realizado um estudo comparativo, organizado em tabelas, possibilitando a avaliação de critérios como sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica, eficiência energética e riscos sociais e regulatórios ligados a cada procedimento.

Finalmente, as informações recolhidas foram estruturadas de maneira metódica e apresentadas através de quadros comparativos. A avaliação foi majoritariamente qualitativa, com o objetivo de condensar os pontos fortes e fracos de cada técnica e sugerir reflexões sobre práticas mais sustentáveis para a utilização do cobre na sociedade atual.

3.2 OBJETIVO

Analisar comparativamente os processos de extração e reciclagem de cobre, considerando seus efeitos ambientais, viabilidade econômica e eficiência energética, com o objetivo de determinar qual opção é mais sustentável no cenário atual. Este estudo sugere uma abordagem qualitativa e comparativa, sendo classificado como uma pesquisa exploratória e descritiva. A intenção é analisar e comparar os impactos, custos e benefícios relacionados à mineração tradicional e à reciclagem do cobre, considerando especialmente os aspectos ambientais, econômicos e energéticos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A crescente demanda global por cobre, impulsionada por setores como indústria elétrica, construção e tecnologias sustentáveis, destaca a necessidade de métodos mais eficientes e ambientalmente responsáveis para sua obtenção. Embora a mineração seja tradicional e economicamente relevante, gera altos impactos ambientais e grande consumo de energia. A reciclagem, por sua vez, surge como alternativa viável, pois o cobre pode ser reaproveitado indefinidamente sem perda de qualidade, favorecendo a economia circular e reduzindo danos ambientais. Assim, a comparação entre mineração e reciclagem busca identificar a opção mais sustentável no contexto atual. Com base nas informações obtidas, foram criadas tabelas para comparação direta em relação aos critérios ambientais, econômicos e energéticos. (RUHRBERG, 2006)

4.1 COMPARAÇÃO AMBIENTAL ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE

A Tabela 1 fornece um estudo sobre os efeitos ambientais resultantes dos dois processos de obtenção do cobre: a mineração e a reciclagem. A extração de cobre é uma atividade intensiva em recursos naturais e causa graves danos ao meio ambiente. Dentre as principais questões, destacam-se a elevada produção de dióxido de carbono (CO₂) devido ao uso de equipamentos pesados e transporte, o alto consumo de água e a deterioração do solo devido à abertura de minas, particularmente em áreas de mineração subterrânea.

Além disso, a atividade mineradora tem um impacto significativo na diminuição da biodiversidade e produz resíduos tóxicos que frequentemente são guardados em barragens de alto risco ambiental, como demonstrado em catástrofes ambientais no Brasil. Por outro lado, a reciclagem de cobre tem um impacto ambiental consideravelmente menor: não requer a remoção de grandes quantidades de terra, a emissão de CO₂ é consideravelmente reduzida e não ocorre interferência direta em áreas naturais ou ecossistemas. Portanto, é uma opção mais em sintonia com os princípios de sustentabilidade. (TIAN, et al., 2021)

Tabela 1 – Comparação Ambiental: Mineração vs. Reciclagem de Cobre

Critério	Mineração de Cobre	Reciclagem de Cobre
-----------------	---------------------------	----------------------------

Emissão de CO ₂	Alta (uso de explosivos e transporte)	Baixa (menor consumo de energia)
Consumo de água	Elevado (para extração e processamento)	Muito baixo
Degradação do solo	Significativa (abertura de minas)	Praticamente inexistente
Geração de resíduos tóxicos	Alta (rejeitos de mineração, barragens)	Baixa
Impacto na biodiversidade	Alto (desmatamento, perda de habitat)	Nulo ou mínimo
Ocupação de grandes áreas	Sim, especialmente em minas a céu aberto	Não requer grandes áreas

FONTE: Própria autora, 2025. (TIAN, et al., 2021) (MECHI; SANCHES, 2010) (RABELO, 2017) (PEREIRA, 2023) (DE ARRUDA, OLIVEIRA, MORAES, 2019)

A mineração de cobre é uma atividade de grande escala, altamente intensiva em recursos naturais e energia. Ela envolve diversas etapas complexas, como a exploração geológica, perfuração, detonação de rochas, escavação, transporte de minério, britagem, moagem, flotação, fundição e eletrorefinação. Cada uma dessas fases tem consequências ambientais significativas.

Um dos efeitos mais notáveis é a liberação de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases que intensificam o efeito estufa (GEE), principalmente devido à combustão de combustíveis fósseis empregados em veículos de transporte, equipamentos pesados e nos processos térmicos de fundição. Isso contribui diretamente para a intensificação das alterações climáticas, posicionando a indústria da mineração entre as que possuem a maior pegada de carbono. (MECHI; SANCHES, 2010)

Além disso, o procedimento utiliza grandes quantidades de água, seja para resfriar os equipamentos ou para beneficiar o minério, especialmente nas fases de flotação e limpeza. Em áreas áridas, como no norte do Chile, onde existem grandes minas de cobre, essa necessidade de água gera disputas pelo uso da água, impactando comunidades locais, a agricultura e os ecossistemas vulneráveis.

Outra consequência séria é a deterioração do solo e do cenário natural, particularmente em minas subterrâneas que demandam a remoção de grandes volumes de terra e vegetação. Isso resulta na alteração das paisagens naturais, erosão, sedimentação de rios e diminuição da biodiversidade. Espécies locais são deslocadas ou extintas,

podendo comprometer áreas de preservação ambiental. (RABELO, 2017)

A produção de resíduos sólidos e líquidos tóxicos também está diretamente relacionada à mineração, incluindo os rejeitos de flotação e os ácidos empregados na lixiviação. Esses detritos são guardados em grandes depósitos ou pilhas de detritos, representando sérios perigos socioambientais. Casos como os desabamentos de barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) demonstram de maneira trágica a capacidade devastadora deste tipo de estrutura, tanto para o meio ambiente quanto para a existência humana. (PEDRONI, 2019)

A responsabilidade das empresas de mineração nas catástrofes de Mariana e Brumadinho é ampla e abrange elementos jurídicos, ambientais, sociais e éticos. Em ambas as situações, as investigações revelaram que as companhias envolvidas estavam cientes dos perigos estruturais nas barragens, porém não implementaram ações efetivas para evitar os desastres. Em Mariana, relatórios apontaram indícios de instabilidade meses antes do desastre. Em Brumadinho, registros internos da Vale revelaram que a companhia estava ciente do "nível de risco inaceitável" da barragem, contudo, continuou com as operações. A Justiça do Brasil já propôs ações cíveis e criminais contra executivos e corporações, por crimes como homicídio, danos ao meio ambiente e descaso. Contudo, muitos casos permanecem sem uma decisão final, gerando críticas acerca da impunidade e da morosidade do sistema. (PEREIRA, 2023) (DE ARRUDA, OLIVEIRA, MORAES, 2019)

As empresas de mineração também possuem uma responsabilidade ecológica, uma vez que seus projetos provocaram danos irreparáveis a rios, ecossistemas, fauna e flora. Milhares de indivíduos ficaram sem acesso à água potável, perderam suas casas, fontes de sustento e pessoas queridas. A recuperação social e ecológica tem sido gradual e, de acordo com as comunidades impactadas, insatisfatória. Espera-se que empresas dessa magnitude atuem com transparência, precaução e consideração pela vida humana e pelo meio ambiente. A ênfase no ganho financeiro em vez da segurança revelou um modelo de mineração que muitos veem como insustentável e desumano. Esses desastres evidenciaram a necessidade de alterações estruturais no setor de mineração brasileiro, incluindo mais controle, tecnologia de segurança e participação ativa das comunidades afetadas. (DOS SANTOS, RODRIGUES, 2019)

Em resumo, o processo de extração do cobre, mesmo sendo altamente tecnológico, ainda gera custos ambientais significativos, causando uma série de impactos que prejudicam a qualidade do solo, do ar, da água e da vida nas áreas diretamente e indiretamente impactadas por essas atividades. (TENÓRIO, KAMEOKA, ESPINOSA, 2009)

Por outro lado, a reciclagem de cobre exibe um perfil ambiental claramente mais benéfico. A presença do cobre em materiais e produtos descartados, como cabos elétricos, motores, eletrodomésticos e placas de circuito impresso, permite que seu reaproveitamento evite a extração de recursos naturais intocados e previna várias fases poluentes do processo de mineração.

Em termos de água, a utilização de água no processo de reciclagem é consideravelmente reduzida, limitando-se normalmente à higienização do material e à refrigeração de equipamentos. Não são necessários processos como lixiviação ou flotação, o que reduz a possibilidade de produção de efluentes poluídos. Ademais, a ausência de escavações, uso de explosivos, desmatamento ou ocupação de áreas naturais resulta em uma interferência mínima nos ecossistemas e habitats.

A reciclagem também emite uma quantidade significativamente menor de CO₂ - estima-se que o processo consuma entre 10% a 15% da energia necessária para a produção de cobre a partir do minério, o que impacta diretamente na diminuição da pegada de carbono. Esta economia de energia é fundamental para atingir os objetivos globais de descarbonização e lutar contra o aquecimento global. (MONTES, 2019)

A reciclagem também diminui a produção de resíduos perigosos. Apesar da necessidade de remover impurezas e fazer fusões, os resíduos gerados costumam ser controlados e em volumes bastante reduzidos. Isso favorece um processo produtivo mais limpo, seguro e com menor impacto na saúde pública e no meio ambiente. Ademais, o hábito de reciclar reforça a economia circular, incentivando o reaproveitamento de materiais que, de outra maneira, seriam descartados em lixões ou deixados ao abandono no meio ambiente. Esta estratégia auxilia na utilização consciente dos recursos naturais, na diminuição da extração de minerais e na proteção de áreas naturais vulneráveis.

4.2 COMPARAÇÃO ECONOMICA ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE

A Tabela 2 ressalta as variáveis econômicas mais significativas ligadas aos processos de extração e reciclagem de cobre. Estes fatores englobam despesas operacionais, investimentos iniciais, dependência do mercado global, prazo de retorno financeiro e o impacto social produzido por cada procedimento. Esta avaliação é crucial para compreender a viabilidade e os obstáculos econômicos que cada opção traz.

Tabela 2 – Comparação Econômica: Mineração vs. Reciclagem de Cobre

Critério	Mineração de Cobre	Reciclagem de Cobre
Custo operacional por tonelada	Elevado (exploração, beneficiamento, logística)	Inferior (infraestrutura já existente)
Dependência de commodities	Alta (preço internacional do cobre)	Menor dependência do mercado externo
Investimento inicial	Muito alto (infraestrutura e licenciamento)	Moderado
Tempo de retorno	Longo prazo	Curto a médio prazo
Geração de empregos	Alta em grandes projetos, mas sazonal	Menor, porém mais estável e urbano

FONTE: Própria autora, 2025. (TORQUATO, 2022) (SHOCKMETAIS) (SALLES; MAGRATH; MALHEIROS, 2020) (RODRIGUES, HEIDER, FONSECA, 2009) (WANG, et al., 2019)

A extração de cobre é uma atividade que demanda grandes investimentos iniciais, tornando o setor altamente dependente de capital. Para dar início à exploração de um depósito mineral, são necessárias diversas fases, incluindo a compra de terras, obtenção de licenças ambientais, construção de infraestrutura robusta (estradas, sistemas de fornecimento de água e energia, instalações de processamento) e a compra de equipamentos pesados, como escavadeiras, caminhões e trituradores. Esses gastos iniciais são altos, podendo chegar a milhões de dólares, dependendo do local e do tamanho da mina.

Ademais, a complexidade do processo de extração e processamento do minério gera custos operacionais significativos. Normalmente, o cobre é encontrado em baixas quantidades nas minas, o que demanda grandes quantidades de material para ser extraído, britado e processado até chegar ao produto final. O procedimento de fundição, que consiste no aquecimento e na purificação do metal, também consome muita energia, contribuindo para o crescimento dos gastos operacionais. Juntamente com esses gastos, a indústria de mineração lida com a dificuldade de obter períodos prolongados de retorno financeiro. A duração exigida para erguer a mina, desenvolver a infraestrutura e iniciar as operações pode resultar em um retorno financeiro somente após vários anos de operação. (TORQUATO, 2022)

Outro aspecto relevante é a flutuação dos valores das commodities no mercado global. O valor do cobre, assim como qualquer outro recurso mineral, é fortemente afetado por elementos externos, como alterações na procura mundial, políticas econômicas

de grandes consumidores (como a China) e variações cambiais. O valor do minério de cobre que será posteriormente comercializado é dado através da tabela LME (London Metal Exchange), atualmente, ela é vista como uma das fontes mais seguras e confiáveis em relação à cotação de metais em todo mundo, os indicadores são atualizados todos os dias e, através da tabela, podemos verificar as médias da semana e do mês, juntamente com os valores e variações de cada produto. Essa variação no valor do cobre gera uma instabilidade financeira para os produtores de cobre, que podem se deparar com reduções nos valores de venda, impactando a lucratividade das atividades de mineração. Portanto, a extração de cobre está sujeita a altos riscos econômicos, o que pode afetar a sustentabilidade financeira, particularmente em situações de queda nos preços das matérias-primas. (SHOCKMETAIS) (SALLES; MAGRATH; MALHEIROS, 2020)

Apesar da mineração de cobre criar empregos significativos, particularmente em áreas mais isoladas e com baixos níveis de desenvolvimento, esses postos de trabalho costumam ser temporários e concentrados na etapa de construção e início de operação. A manutenção desses postos de trabalho está atrelada à estabilidade do mercado e à lucratividade do projeto, o que pode representar um perigo para os empregados e suas comunidades.

Em contrapartida, a reciclagem de cobre oferece um modelo econômico consideravelmente mais viável e adaptável. A disponibilidade de materiais recicláveis é um dos fatores cruciais que auxiliam na diminuição dos custos operacionais da reciclagem. O cobre já disponível no mercado - usado em cabos elétricos, circuitos eletrônicos e componentes industriais - pode ser encontrado em áreas urbanas, tornando a logística para sua obtenção e transporte mais eficaz e com custos reduzidos. Não é preciso executar grandes projetos de infraestrutura, como ocorre na mineração, o que diminui consideravelmente o investimento inicial.

Adicionalmente, a reciclagem de cobre não é afetada pelas oscilações de preço do mercado mundial de minerais, uma vez que o cobre reciclado é administrado em um circuito local ou regional. Isso garante uma dependência reduzida de commodities externas, tornando o modelo econômico da reciclagem mais estável e previsível. Políticas de promoção da economia circular, como iniciativas de coleta e reaproveitamento de materiais, estão ganhando cada vez mais relevância em nações avançadas, criando um cenário propício para o desenvolvimento desse segmento. (RODRIGUES, HEIDER, FONSECA, 2009)

Apesar da reciclagem de cobre gerar menos empregos diretos em relação

à mineração, especialmente em relação ao volume de trabalho físico em regiões isoladas, os postos de trabalho gerados por essa indústria costumam ser mais estáveis e concentrados em zonas urbanas. A atividade de reciclagem geralmente se concentra em centros de processamento, onde os funcionários trabalham na triagem de materiais, manuseio de equipamentos recicláveis e na verificação da qualidade do produto final. Esses postos de trabalho são mais duradouros a longo prazo e, por estarem próximos a áreas urbanas, oferecem melhores condições laborais e salários constantes. (WANG, et al., 2019)

Por outro lado, os postos de trabalho na mineração são mais vulneráveis a flutuações econômicas e costumam ser temporários ou concentrados em determinados locais, o que pode resultar em uma dependência excessiva da atividade mineradora para sustentar as comunidades locais. Por outro lado, a reciclagem apresenta a vantagem de estar mais em sintonia com as práticas de economia circular, que promovem o uso contínuo de recursos e a formação de novas cadeias produtivas sustentáveis no âmbito de uma economia local.

4.3 COMPARAÇÃO ENERGÉTICA E TÉCNICA ENTRE MINERAÇÃO E RECICLAGEM DE COBRE

A Tabela 3 faz uma comparação entre os dois processos em relação ao uso de energia e às especificações técnicas de produção. A extração de cobre é altamente energética, especialmente nas etapas de moagem e fundição, que demandam grandes volumes de eletricidade e combustíveis fósseis. Esta necessidade de energia não apenas eleva os gastos operacionais, mas também intensifica os efeitos ambientais devido ao consumo de combustíveis e à liberação de gases nocivos.

Tabela 3 – Comparação Energética e Técnica: Mineração vs. Reciclagem de Cobre

Critério	Mineração de Cobre	Reciclagem de Cobre
Consumo de energia	Muito alto (perfuração, transporte, fundição)	Reduzido (até 85% menos energia)
Eficiência energética	Baixa (perdas ao longo do processo)	Alta (processo direto de reaproveitamento)

Pureza do produto final	Alta (em processos modernos)	Alta (sem perdas significativas de qualidade)
Complexidade tecnológica	Alta (envolve diversas etapas e riscos)	Moderada (processos industriais controlados)
Flexibilidade de produção	Baixa (local fixo e rígido)	Alta (instalações móveis ou urbanas possíveis)

FONTE: Própria autora, 2025. (AT MINERALS PROCESSING) (MARSDEN, 2008) (KAERCHER; MORAES, 2021) (WANG, et al., 2019) (CONTADOR; FREIRE; XAVIER, 2022)

A extração de cobre é marcada pela sua elevada energia desde os seus estágios iniciais. O procedimento inicia com a extração do minério in natura, que normalmente tem um teor de cobre reduzido (normalmente entre 0,5% e 1%). Isso sugere que é preciso processar grandes quantidades de rocha para produzir quantidades com valor comercial do metal. A extração mecânica exige a utilização de escavadeiras, veículos de grande capacidade e explosivos, todos alimentados por combustíveis fósseis. Em seguida, o minério passa por moagem e britagem, que são etapas que demandam grande quantidade de eletricidade para reduzir o minério a partículas finas. (AT MINERALS PROCESSING)

A fase de beneficiamento engloba a flotação e, ocasionalmente, a lixiviação, processos que também requerem reagentes químicos e energia. Por fim, o processo se completa com a fundição e a eletrorefinação, que requerem temperaturas elevadas (superiores a 1.000°C) e, conseqüentemente, um grande uso de energia térmica e elétrica. Combinadas, essas fases fazem da mineração uma das atividades industriais que mais consome energia, elevando não só os gastos operacionais, mas também a emissão de carbono do processo. (MARSDEN, 2008)

Por outro lado, a reciclagem de cobre é notável pela sua eficiência energética consideravelmente maior. Pesquisas da Associação Internacional do Cobre mostram que a reciclagem de cobre consome entre 10% e 15% da energia necessária para produzir a mesma quantidade de cobre proveniente da mineração primária. Isso ocorre devido à supressão de diversas fases de extração e processamento: uma vez que o cobre reciclado já se encontra em estado metálico, não é preciso concentrar, fundir ou purificar o minério bruto.

Normalmente, o processo de reciclagem se resume à coleta, triagem, eliminação de impurezas, fusão e reprocessamento. A maior parte da energia utilizada é

elétrica, voltada para o derretimento e a conformação do material, processos mais simples e que requerem menos energia do que a fundição de minério primário. Este fator torna a reciclagem uma opção muito mais econômica e ecologicamente benéfica em termos energéticos. (WANG, et al., 2019)

Um ponto crítico na comparação entre métodos é a qualidade do produto obtido. No caso do cobre, a reciclagem não implica perda de qualidade, desde que os processos de separação e purificação sejam adequados. O cobre reciclado possui a mesma pureza que o cobre refinado - normalmente 99,9% - e pode ser reaproveitado em usos exigentes, como fios condutores, circuitos eletrônicos, motores elétricos e sistemas de indústria. Isso ocorre porque o cobre é um material que pode ser reciclado infinitamente sem perder suas características físico-químicas, ao contrário de outros metais ou compostos. (KAERCHER; MORAES, 2021)

Esta propriedade assegura que o cobre reciclado seja economicamente viável e tecnicamente comparável ao cobre obtido através da mineração, sendo aceito até mesmo em setores de elevada exigência técnica. Isso reforça o valor industrial e a viabilidade do processo de reciclagem como uma alternativa sustentável e de qualidade.

A reciclagem do cobre preserva suas propriedades mecânicas e químicas graças à sua estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), que confere alta ductilidade e maleabilidade, e também alta condutividade, por permitir deslizamento fácil dos planos atômicos. Essa estrutura é altamente estável, o que permite que o metal seja reciclado diversas vezes sem perda significativa de pureza ou de desempenho. Estudos experimentais confirmam que, quando bem realizada, essa reciclagem mantém pureza e desempenho comparáveis aos do cobre virgem, sendo frequentemente indistinguível em resistividade e condutividade de aplicações industriais. Investigações microestruturais, como fundição de cobre reciclado proveniente de resíduos de tubos de ar-condicionado, mostraram composição química com cobre ultrapassando 98-99 %, e variações de dureza alinhadas com diferenças dendríticas entre zonas colunar e equiaxial, conforme evidenciado por ensaios Rockwell e análise por FRX. Discussões técnicas também enfatizam que, embora pequenos teores de impurezas possam exigir mistura com cobre virgem para atingir padrões específicos de pureza, isso não compromete o uso repetido da matéria-prima reciclada. (SILVA et al., 2019) (GW, 2025) (PÁDUA et al., 2024)

Tabela 4 – Comparação entre cobre virgem e reciclado

Propriedade	Cobre Virgem	Cobre Reciclado
--------------------	---------------------	------------------------

Condutividade elétrica (IACS)	100%	98-99%
Resistividade ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	1,68	1,70-1,72
Dureza Rockwell (HRB)	35-45	34-46
Pureza química (%)	> 99,9	98-99,5

FONTE: Própria autora, 2025. (ASTM INTERNATIONAL, 2022) (COPPERWORKS, 2023) (MATERIAL PROPERTIES, 2024)

A mineração, sob a perspectiva técnica, possui uma maior complexidade operacional. É imprescindível conduzir estudos geológicos e geofísicos, realizar explorações, análises de minerais, elaborar planos de extração e cumprir uma variedade de regulamentos ambientais e de segurança. Os perigos presentes são significativos: instabilidade de encostas, poluição de águas subterrâneas, incidentes com explosivos, desmoronamentos e a gestão de rejeitos em barragens, que têm demonstrado fragilidade em várias situações no Brasil.

Por outro lado, a reciclagem é extremamente simples e apresenta riscos operacionais reduzidos. As fases industriais são gerenciadas em um ambiente fechado, com um nível de perigo reduzido. A logística reversa de materiais e a separação dos elementos metálicos constituem desafios, que podem ser superados através do emprego de tecnologias como separadores magnéticos, trituradores industriais, sensores ópticos e fornos de fusão de médio porte. Ademais, o processo apresenta maior previsibilidade, menor vulnerabilidade a variáveis naturais e pode ser organizado de maneira modular.

A mineração é uma atividade localizada geograficamente, restrita à presença de depósitos naturais. Isso estabelece um padrão de produção rígido, com grandes estruturas situadas em áreas específicas, frequentemente distantes dos centros de consumo. A logística implica um custo adicional e uma pegada de carbono associada ao transporte de minérios ou metais refinados até os consumidores finais.

Por outro lado, a reciclagem de cobre proporciona uma ampla flexibilidade. As fábricas podem ser estabelecidas em zonas urbanas ou industriais, próximas às origens de resíduos e aos principais centros de consumo. Há também iniciativas de estruturas móveis ou regionais, focadas na coleta e reutilização local de resíduos eletrônicos e sucata metálica. Esta habilidade de adaptação diminui os custos logísticos, promove cadeias de produção locais e simplifica a execução de projetos. (CONTADOR; FREIRE; XAVIER, 2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação entre a extração de cobre e a reciclagem revelou diferenças significativas entre as duas técnicas em relação ao impacto ambiental, à viabilidade financeira e à eficácia técnica e energética. Através das tabelas e discussão dos resultados apresentados neste trabalho, notou-se que, apesar da mineração ainda ser a principal atividade para o fornecimento mundial de cobre, seus custos ambientais e operacionais são elevados e seus riscos socioeconômicos são consideráveis.

A mineração é altamente prejudicial ao meio ambiente, devido ao uso intensivo de recursos naturais, à emissão elevada de CO₂ (gás carbônico) e ao risco de poluição ambiental. Por outro lado, a reciclagem de cobre surge como uma alternativa sustentável, diminuindo drasticamente o consumo de energia e água, além de prevenir a extração de novos recursos naturais. Portanto, do ponto de vista ambiental, a diferença entre mineração e reciclagem de cobre é marcante. A primeira está associada a um conjunto de impactos ambientais intensos e difíceis de mitigar, enquanto a segunda representa uma estratégia ecologicamente responsável e alinhada com os princípios da sustentabilidade. A ampliação das práticas de reciclagem, aliada a políticas governamentais de estímulo e à sensibilização da população, é uma ação estratégica crucial para diminuir a pressão nos ecossistemas e atenuar os impactos ambientais provocados pela extração de minerais.

Com essas considerações, a análise econômica evidencia que a reciclagem de cobre, apresenta um retorno financeiro mais rápido e menores custos operacionais, bem como um modelo de negócio mais sustentável e alinhado com as tendências de economia circular, ao passo que a mineração de cobre exige grandes investimentos iniciais, está sujeita a altos riscos econômicos e tem um tempo de retorno mais prolongado, além de impactos sociais e ambientais maiores.

A análise energética e técnica confirmam que a reciclagem de cobre não apenas consome menos energia e reduz significativamente os impactos ambientais, mas também mantém a qualidade do material e opera com maior flexibilidade e menor risco. A mineração, embora ainda essencial para suprir parte da demanda global, apresenta maior complexidade técnica, consumo energético elevado e dependência de localizações fixas. Diante disso, a reciclagem se consolida como uma estratégia complementar, sustentável e tecnicamente viável para o futuro da cadeia do cobre.

O estudo revelou que a extração de cobre, apesar de crucial para o

fornecimento mundial, é uma atividade que consome uma grande quantidade de recursos naturais, apresentando um alto risco de impacto ambiental. O uso excessivo de energia, a liberação de poluentes, a destruição de ecossistemas e os perigos ligados ao manejo de resíduos fazem da mineração uma atividade que demanda controles ambientais rigorosos e uma revisão contínua de suas práticas.

Por outro lado, a reciclagem de cobre se mostrou uma opção mais sustentável ambientalmente, economicamente viável e tecnicamente eficaz. A capacidade de reutilizar o cobre várias vezes sem comprometer a qualidade, juntamente com a considerável economia de energia (até 85% em comparação à mineração), faz da reciclagem um instrumento crucial para o progresso da economia circular. Ademais, a sua versatilidade logística e a menor necessidade de grandes estruturas a tornam mais acessível para áreas urbanas e industriais.

Portanto, mesmo que a mineração continue sendo crucial no contexto atual devido ao aumento da demanda global, as informações examinadas neste trabalho indicam que a reciclagem de cobre deve ser cada vez mais estimulada e associada às estratégias de administração sustentável de recursos. Ela é uma opção não só viável, mas também imprescindível para harmonizar crescimento econômico e conservação ambiental em um cenário mundial de crise climática e escassez de recursos. Ao longo da análise, tornou-se evidente que, apesar da mineração ainda ser imprescindível para atender à demanda mundial, a reciclagem precisa ser aprimorada, organizada e promovida para diminuir a pressão sobre os recursos naturais e atenuar os impactos ambientais.

5.1 POSSÍVEIS MELHORIAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo focou-se em uma análise teórica e comparativa, fundamentada em informações secundárias e pesquisas já divulgadas. A ausência de coleta de dados primários e visitas técnicas a instalações de mineração ou reciclagem restringe a profundidade de certos aspectos técnicos e operacionais. Ademais, a perspectiva unificou os contextos, ignorando as variações particulares entre países ou regiões onde essas atividades acontecem. Uma das melhorias possíveis para trabalhos futuros é de fato fazer uma visita de campo e/ou estudo de caso de um ou mais locais que possuem um processo já comercial de mineração e reciclagem, seja como modo de comparação entre eles ou até para retificar alguma das informações aqui constadas de algo que é diferente entre a teoria e a prática de mineração e reciclagem.

5.2 PROJETOS E PESQUISAS FUTUROS

Com base nas considerações feitas durante o estudo, propõe-se que pesquisas futuras sejam focadas em três áreas principais. Inicialmente, sugere-se a execução de estudos de caso locais ou nacionais, com a finalidade de analisar as políticas governamentais de incentivo à reciclagem e verificar sua efetividade. Essas pesquisas poderiam examinar o impacto de diversas políticas governamentais, tais como incentivos fiscais, normas e programas de responsabilidade compartilhada do produtor, nos índices de reciclagem e na reintegração dos materiais à cadeia de produção.

Em segundo lugar, seria importante realizar pesquisas sobre a percepção pública e empresarial sobre a reciclagem de metais não ferrosos, reconhecendo os principais desafios e as possíveis soluções para ultrapassar as barreiras percebidas. O estudo poderia investigar as percepções acerca dos custos, eficácia e vantagens ambientais da reciclagem, bem como examinar a função das corporações no estímulo à implementação de práticas mais sustentáveis, levando em conta também a pressão de consumidores e autoridades governamentais.

Por fim, propõe-se a análise da viabilidade técnica e financeira de estabelecer centros urbanos de reaproveitamento de metais, concentrando-se na incorporação da coleta seletiva, no tratamento dos materiais e na reinserção do cobre e outros metais não ferrosos na cadeia produtiva. O estudo deveria considerar tanto os obstáculos logísticos e tecnológicos quanto as questões financeiras e operacionais associadas à implementação desses centros, com o objetivo de fomentar uma solução eficaz e sustentável para o reaproveitamento de metais em zonas urbanas.

REFERÊNCIAS

ACI, Associação Internacional do Cobre. Disponível em: <https://internationalcopper.org/> .

AGRAWAL, Archana; SAHU, K. K. Problems, prospects and current trends of copper recycling in India: An overview. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 7, p. 401-416, maio 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.09.005>.

AHMED, Alim Al Ayub; ASADULLAH, ABM. Artificial Intelligence and Machine Learning in Waste Management and Recycling. **Engineering International**, v. 8, n. 1, p. 43-52, 10 maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18034/ei.v8i1.498>.

ALI, Danish; FRIMPONG, Samuel. Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector. **Artificial Intelligence Review**, v. 53, n. 8, p. 6025-6042, 18 abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09841-6>.

ANM , Agência Nacional de Mineração. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br>

ANTONY JOSE, Subin *et al.* Recent Advancements in Artificial Intelligence in Battery Recycling. **Batteries**, v. 10, n. 12, p. 440, 11 dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/batteries10120440>.

ASTM INTERNATIONAL. **A Bright Future for Recycled Copper**. West Conshohocken: ASTM, 2022. Disponível em: <https://www.astm.org/news/bright-future-recycled-copper-jf22>

AT MINERALS PROCESSING. Energy efficiency. **Energy intensity in copper and gold mining**. Disponível em: https://www.at-minerals.com/en/artikel/at_-3001684.html

BAETA, Ana Flávia Castro. **A saúde sobre o prisma ecohealth – aspectos biológicos e ambientais da contaminação do solo por empresas mineradoras**. 2023. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/5841>.

BORN, Konstantin; CIFTCI, Mehmet Metehan. The limitations of end-of-life copper recycling and its implications for the circular economy of metals. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 200, p. 107318, jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107318>.

COAYLA, Edelina; ROMERO CARRION, Violeta L.; BEDÓN SORIA, Ysabel Teófila. Regulación económica e impacto ambiental de la gran minería cuprífera en el desarrollo de Perú. **Economía Sociedad y Territorio**, v. 24, n. 74, p. 1-24, 27 fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.22136/est20242032>.

CONTADOR, Luciana Silva; FREIRE, Larissa Sampaio; XAVIER, Lucia Helena. Paradoxos da logística reversa de resíduos eletroeletrônicos e a mineração urbana no Brasil. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 18, n. 53, p. 141, 15 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3895/rts.v18n53.15790>.

COPPERWORKS. Recycled Copper vs. New Copper: What's the Difference?

Copperworks, 2023. Disponível em: <https://www.copperworks.com/recycled-copper-vs-new-copper-whats-the-difference/>

DE ARRUDA, André Felipe Soares; OLIVEIRA, Fabrício Manoel; MORAES, Lanna Thays Portela. A natureza como sujeito de direito: análise dos casos de Mariana e Brumadinho a partir de estudos juscomparativos socioambientais. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 11, p. 1-8, 2019. Disponível em:

<https://scholar.archive.org/work/vsbuozyv5rd7pgqwq5qjolmsne/access/wayback/https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/download/15968/13029>

DOEBRICH, Jeff. Copper-A Metal for the Ages: U.S. **Geological Survey Fact Sheet** 2009. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2009/3031/>.

DONG, Di *et al.* Assessing the future environmental impacts of copper production in China: Implications of the energy transition. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122825, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122825>.

DOS SANTOS, Diana Amaral; MARTINS, Júlia Ellen Ramos; RODRIGUES, Marcelo Resende. Breve ensaio sobre a responsabilidade civil do Estado no contexto dos desastres ambientais em Mariana e Brumadinho. **Revista do Curso de Direito da Uniabeu**, v. 12, n. 1, p. 158-161, 2019. Disponível em:

<https://revista.uniabeu.edu.br/index.php/rcd/article/view/3693>

ELSHKAKI, Ayman *et al.* Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. **Global Environmental Change**, v. 39, p. 305-315, jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.006>.

FAPESPA, Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas. Disponível em: <https://www.fapespa.pa.gov.br/> . Acesso em 16 de abril de 2025

FITZSIMONS, Eoghan; WARREN, Peter. Desalination investment for copper mining: Barriers and opportunities in Chile. **The Extractive Industries and Society**, v. 17, p. 101449, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101449>.

FLORES, Victor; LEIVA, Claudio. A Comparative Study on Supervised Machine Learning Algorithms for Copper Recovery Quality Prediction in a Leaching Process. **Sensors**, v. 21, n. 6, p. 2119, 17 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21062119>.

GERMANY, Darcy José. A mineração no Brasil. **Ccge**. Secretaria Técnica do Fundo Setorial Mineral. 2002. Disponível em: <https://maiscursoslivres.com.br/cursos/basico-em-operador-de-trator-e-esteira-apostila03.pdf>

GORAI, Bipra; JANA, R. K.; PREMCHAND. Characteristics and utilisation of copper slag—a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 39, n. 4, p. 299-313, nov. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0921-3449\(02\)00171-4](https://doi.org/10.1016/s0921-3449(02)00171-4).

GUPTA, Praveen Kumar *et al.* The Use of Modern Technology in Smart Waste Management and Recycling: Artificial Intelligence and Machine Learning. **Recent Advances in Computational Intelligence. Studies in Computational Intelligence**, v.

823. Springer, Cham. 19 mar. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12500-4_11

GUTIERREZ, Victor Andre Valdivia; VERA, Nicoll Andrea Valdivieso. **Biomíneria Como Fonte Eco-Sustentable Para La Actividad Minera Legal**. Disponível em: [https://www.academia.edu/download/95891232/Biomíneria Como Fuente Eco.pdf](https://www.academia.edu/download/95891232/Biomíneria_Como_Fuente_Eco.pdf)

GW. **Por que o cobre é um metal dúctil: explorando propriedades e aplicações**. Disponível em: <https://etcnmachining.com/pt/blog/copper-ductility/>. Acesso em: ago. 2025.

HERBERT, Eugenia W. **Red Gold of Africa: Copper in Precolonial History and Culture**. [S. l.]: University of Wisconsin Press, 2003. 438 p. ISBN 9780299096045.

HUANG, Jian *et al.* Pure copper components fabricated by cold spray (CS) and selective laser melting (SLM) technology. **Surface and Coatings Technology**, v. 395, p. 125936, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125936>.

IKESHOJI, Toshi-Taka *et al.* Selective Laser Melting of Pure Copper. **JOM**, v. 70, n. 3, p. 396-400, 8 dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2695-x>.

JULIANI, CAETANO - IGC ; MONTEIRO, LENA VIRGINIA SOARES - IGC. Recursos minerais no Brasil : problemas e desafios. cap. 1, p. 134-154, 2016. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/85314a27-70aa-4bbf-acf6-7c8ced7c6e7c/2788641.pdf>

KAERCHER, Luciana; MORAES, Carlos Alberto Mendes. Separação do fio metálico do recobrimento de plástico em fios elétricos e de equipamentos eletroeletrônicos/ Separation of metal wire from plastic coating on electrical and electronic equipment wires. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 30723-30735, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-682>.

KHOSHALAN, Hasel Amini *et al.* Forecasting copper price by application of robust artificial intelligence techniques. **Resources Policy**, v. 73, p. 102239, out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102239>.

LI, Liquan *et al.* Overview of the recycling technology for copper-containing cables. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 126, p. 132-140, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.024>.

LI, Xiang *et al.* Sustainable recovery and recycling of scrap copper and alloy resources: A review. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 41, p. e01026, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01026>.

LU, Tao *et al.* Environmental impacts and improvement potentials for copper mining and mineral processing operations in China. **Journal of Environmental Management**, v. 342, p. 118178, set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118178>.

MATERIAL PROPERTIES. **Cobre: propriedades, preço, aplicações, produção**. 2024. Disponível em: <https://material-properties.org/pt-br/cobre-propriedades-preco-aplicacoes-producao/>

MARSDEN, John. **Energy Efficiency & Copper Hydrometallurgy**. Jan, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265156153_Energy_Efficiency_Copper_Hydrometallurgy

MARTIM, Hélio Cardoso; SANTOS, V. M. Avaliação de impactos ambientais em empresa de mineração de cobre utilizando redes de interação. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 17, n. 17, p. 3246-3257, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Vivianni-Santos/publication/276244703_IMPACTOS_AMBIENTAIS_EM_EMPRESA_DE_MINERACAO_DE_COBRE/links/5bcde98592851c1816b934d8/IMPACTOS-AMBIENTAIS-EM-EMPRESA-DE-MINERACAO-DE-COBRE.pdf

MARTIM, Hélio Cardoso; SANTOS, Vivianni Marques Leite dos. IMPACTOS AMBIENTAIS EM EMPRESA DE MINERAÇÃO DE COBRE. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 17, n. 17, 13 fev. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236117010382>.

MECHI, Andréa; SANCHES, Djalma Luiz. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-40142010000100016>.

MÉNDEZ-SUÁREZ, Mariano; GARCÍA-FERNÁNDEZ, Francisco; GALLARDO, Fernando. Artificial Intelligence Modelling Framework for Financial Automated Advising in the Copper Market. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, v. 5, n. 4, p. 81, 9 out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/joitmc5040081>.

MONTES, Camila. Forecast for water consumption in the copper mining industry, 2018-2029. **JOURNAL OF MINING ENGINEERING AND RESEARCH**, v. 1, n. 1, p. 45-54, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.35624/jminer2019.01.05>.

MURARI, Krishna; SIDDIQUE, Rafat; JAIN, K. K. Use of waste copper slag, a sustainable material. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 17, n. 1, p. 13-26, 3 maio 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0254-x>.

NOVAIS, Stéfano Araújo. **COBRE (Cu)**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/cobre.htm>.

O'BRIEN, William. **Prehistoric Copper Mining in Europe, 5500-500 BC**. [S. l.]: Oxford University Press, 2014. 416 p. ISBN 9780199605651.

PÁDUA, Gabriel Fabrício Rocha de Carvalho et al. **FUNDIÇÃO DE COBRE RECICLADO EM MOLDE PERMANENTE: ANÁLISE MICROESTRUTURAL, MECÂNICA E QUÍMICA DE LIGAS OBTIDAS A PARTIR DE RESÍDUOS DE TUBOS DE AR-CONDICIONADO**. Revista ft, v. 29, n. 141, p. 50-51, 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/fundicao-de-cobre-reciclado-em-molde-permanente-analise-microestrutural-mecanica-e-quimica-de-ligas-obtidas-a-partir-de-residuos-de-tubos-de-ar-condicionado>. Acesso em: 15 ago. 2025.

PEARCE, Mark. The 'Copper Age'—A History of the Concept. **Journal of World Prehistory**, v. 32, n. 3, p. 229-250, 30 ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10963-019-09134-z>.

PEDRONI, Bruna Stefany da Silva. Responsabilidade civil ambiental na teoria do risco integral: casos Mariana e Brumadinho. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Direito)-Faculdade Nacional de Direito, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/10538>

PEREIRA, Kleyton et al. Estudo dos casos dos rompimentos das barragens de Mariana e Brumadinho sob a ótica da (co) responsabilidade do Estado. 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/30466>

PIETRZYK, S.; TORA, B. Trends in global copper mining - a review. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 427, p. 012002, 26 set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/427/1/012002>.

RABELO, Andreia Maria Pinto. Qualidade ambiental e mineração: percepção de moradores de Carmo da Mata/MG. **Pesquisa em Educação Ambiental**, v. 12, n. 1, p. 129, 7 mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18675/2177-580x.vol12.n1.p129-145>.

ROCIO, Marco Aurélio Ramalho; SILVA, Marcelo Machado da; CARVALHO, Pedro Sergio Landim de; CARDOSO, José Guilherme da Rocha. Perspectivas atuais da indústria de cobre no Brasil. **BNDES Setorial** 36, p. 397-428. 2012. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1481>

RODRIGUES, A. F. da S.; HEIDER, M.; FONSECA, D.S.; Economia Mineral do Brasil, **DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral**. 2009. Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3982

RUHRBERG, Martin. Assessing the recycling efficiency of copper from end-of-life products in Western Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 48, n. 2, p. 141-165, ago. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.01.003>.

SALLES, André Assis de; MAGRATH, Raphael Sebastian de Andrade; MALHEIROS, Matheus Manzani. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS RELEVANTES PARA DETERMINAÇÃO DO PREÇO DO COBRE NO MERCADO INTERNACIONAL. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, v. 12, n. 23, p. 1-16, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/263987.12.23-1>.

SANTORO, Sergio *et al.* Membrane technology for a sustainable copper mining industry: The Chilean paradigm. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 2, p. 100091, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100091>..

SHOCKMETAIS: ACOMPANHAMENTO da LME e Dólar - Shockmetais 40 anos. Disponível em: <https://shockmetais.com.br/lme>.

SILVA, L. et al. **COBRE: PRODUÇÃO INDUSTRIAL E APLICAÇÕES**. Química Nova,

2019. DOI:10.21577/0100-4042.20170439.

SILVA, Rodrigo de Almeida. **Recuperação hidrometalúrgica de metais da drenagem ácida de minas por precipitação seletiva**. 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/37391>

TENÓRIO, Jorge Alberto Soares; KAMEOKA, Fernando; ESPINOSA, Denise Crocche Romano. SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA ELETRÔNICA: RECICLAGEM DE COBRE E ALUMÍNIO DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 5, n. 4, p. 219-223, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/tmm.00504006>.

TIAN, Hongyu *et al.* Comprehensive review on metallurgical recycling and cleaning of copper slag. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 168, p. 105366, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105366>.

TORQUATO, Frederico Campos Regazoni. Sustentabilidade no reaproveitamento de rejeitos de mineração: uma revisão sistemática sobre as diferentes técnicas. 2022. Disponível em: <https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/xmlui/handle/123456789/16714>

TREVISAN, F. *et al.* Selective laser melting of chemical pure copper powders. In: **Proceedings Euro PM 2017: International Powder Metallurgy Congress and Exhibition**. European Powder Metallurgy Association (EPMA), 2017. Disponível em: <https://iris.polito.it/handle/11583/2872087>

TRINDADE, Roberto de Barros Emery; SOARES, Paulo Sergio Moreira. **Tecnologia de sistemas passivos para o tratamento de drenagem ácida de minas**. 2004. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/342/1/sta-30.pdf>

USGS United States Geological Survey. Disponível em: <https://www.usgs.gov/>

VEIT, Hugo Marcelo *et al.* Utilização de processos mecânicos e eletroquímicos para reciclagem de cobre de sucatas eletrônicas. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 2, p. 159-164, jun. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0370-44672008000200008>.

VEIT, HUGO MARCELO. Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso. 2005. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/85314a27-70aa-4bbf-acf6-7c8ced7c6e7c/2788641.pdf> .

VIEIRA, Alex Mesquita. Estudo da viabilidade técnica e econômica da recuperação de cobre através da técnica de lixiviação de placas de circuito impresso em solução de ácido muriático e água oxigenada. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/77992>

WANG, Junbo *et al.* Scenario analysis of the recycled copper supply in China considering the recycling efficiency rate and waste import regulations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 580-589, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.008>.

YAN, Xingchen *et al.* Microstructure and mechanical properties of pure copper manufactured by selective laser melting. **Materials Science and Engineering: A**, v. 789, p. 139615, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139615>.

ZIĘTEK, Bartłomiej *et al.* Laser-based measurement system for drilling and bolting operations monitoring in deep underground copper ore mine. **Measurement**, v. 253, p. 117425, set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117425>.