

**Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do cobre para identificação da gravidade
dos aspectos e impactos ambientais potenciais**

Márcia Maria Penteado Marchesini
Universidade Federal do ABC (UFABC)
e-mail: mmarchesini@yahoo.com.br

Beatriz Mendes de Lima Teixeira
Universidade Federal do ABC (UFABC)
e-mail: beatrizmendes.lt@gmail.com

* RECEBIDO em 21/12/2024. ACEITO em 08/08/2025.

Resumo

O cobre é um dos metais cujas principais características são a alta condutividade elétrica e térmica, a capacidade antimicrobiana, a total reciclabilidade, tendo diversas aplicações, como na geração e distribuição de energia elétrica, em veículos elétricos, na geração de energia solar e energia eólica, dentre outras. Este artigo teve como objetivo realizar a ACV de produto que contém cobre (fio trefilado de cobre eletrolítico com 99,99% de pureza) para identificar a gravidade dos aspectos e impactos ambientais potenciais gerados ao longo do ciclo de vida do cobre. Como metodologia, foram utilizados: a abordagem qualitativa de pesquisa, o estudo de caso como método de pesquisa e o instrumento de coleta de dados foi a análise de documentos de empresas e instituições para a obtenção de dados secundários que representam cada etapa do ciclo de vida do cobre para realizar a ACV, cujo método adotado foi ERPA (*Environmentally Responsible Product Assessment*). O ciclo de vida do cobre apresenta gravidade ou responsabilidade ambiental total consideráveis, sendo a etapa de mineração a que apresenta maior impacto ao meio ambiente, seguida pela etapa de uso do fio de cobre. Dados a necessidade da diminuição dos impactos ambientais do ciclo do cobre em especial da fase de mineração e o déficit da oferta em relação à demanda por cobre em nível mundial, tem-se a importância da Logística Reversa e suas estratégias de reuso, remanufatura e reciclagem de produtos que contêm cobre.

Palavras-chave: Avaliação de Ciclo de Vida (ACV); Cobre; Aspectos Ambientais; Impactos Ambientais Potenciais.

Abstract

*Copper is one of the metals whose main characteristics are high electrical and thermal conductivity, antimicrobial capacity, total recyclability, having various applications, such as in the generation and distribution of electric power, in electric vehicles, in solar energy generation and wind energy, among others. This article aimed to conduct a life cycle assessment (LCA) of a product containing copper (electrolytic copper drawn wire with 99.99% purity) to identify the severity of potential environmental aspects and impacts generated throughout the life cycle of copper. As a methodology, the qualitative research approach was used, the case study as the research method, and the data collection instrument was the analysis of documents from companies and institutions to obtain secondary data that represent each stage of the copper life cycle to perform the LCA, which adopted method was ERPA (*Environmentally Responsible Product Assessment*). The life cycle of copper has considerable gravity and total environmental responsibility, with the mining phase having the greatest impact on the environment, followed by the use phase of copper wire. Given the need to reduce the environmental impacts of the copper cycle, especially the mining phase, and the supply deficit compared to worldwide demand for copper, the importance of Reverse Logistics and its strategies for reuse, remanufacturing, and recycling of products containing copper is emphasized.*

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); Copper; Environmental Aspects; Potential Environmental Impacts.

1. Introdução.

Conforme Barbieri, Cajazeira e Branchini (2009), é comum a Revolução Industrial ser apontada como o início do agravamento dos problemas ambientais no planeta, pois grande parte da emissão de gases de efeito estufa e substâncias tóxicas é causada por atividades industriais.

Nas últimas décadas, as empresas vêm sendo pressionadas a se responsabilizarem pelos seus produtos em todo o ciclo de vida, desde as fases de obtenção de recursos, produção, distribuição até o pós-uso, sendo as pressões exercidas pelos governos, sociedade (consumidores finais, ONGs, organizações da comunidade) e mercados (investidores, concorrentes, fornecedores, clientes empresariais). Para evitar o pagamento de multas e melhorar a imagem perante o mercado, as organizações estão incluindo questões sociais e ambientais em seu planejamento estratégico. Os acionistas se preocupam com a imagem da empresa perante a sociedade, em que empresas vistas como poluidoras e que agredem o meio ambiente podem acarretar numa desvalorização das ações, no pagamento de multas, boicotes, entre outros problemas. Em relação aos clientes e consumidores, já existe uma pequena parte da sociedade que têm mudado a forma de consumir produtos, preferindo empresas ecologicamente corretas, que se preocupam em diminuir os impactos ambientais e sociais, ainda que seja uma atitude pouco realizada na prática. Mas se nota uma crescente conscientização da sociedade e das novas gerações, que estão mais preocupadas com os impactos ambientais e em como isso afeta sua vida e das próximas gerações (ASSUMPÇÃO; CAMPOS, 2014; LINS, 2015; BARBIERI, 2016).

Diante de tais pressões, organizações do mundo todo se viram obrigadas a buscar um equilíbrio entre os lucros da empresa e a preservação do meio ambiente e da sociedade, principalmente as organizações que atuam em segmentos de alto risco ambiental, uma vez que o próprio mercado (acionistas), os clientes e sociedade passaram a ser mais exigentes quando o assunto é sustentabilidade e responsabilidade social (ASSUMPÇÃO; CAMPOS, 2014; LINS, 2015; BARBIERI, 2016). Tachizawa (2019) reforça que, quanto antes as organizações entenderem a importância do tema da sustentabilidade, maior será a chance de sobreviverem nesse novo mercado. As organizações que integrarem a questão socioambiental em suas decisões estratégicas podem conseguir vantagens competitivas significativas e podem ter um futuro duradouro e lucrativo.

Em relação à sustentabilidade ambiental, Barbieri (2016) aponta que existem três maneiras de as empresas incluírem práticas de gestão ambiental em suas atividades, conhecidas como as três abordagens de Gestão Ambiental Empresarial (GAE). A primeira delas atua no controle da poluição, cujo objetivo é de controlar os efeitos da poluição, geralmente de forma pontual e para atender exigências legais. Essa abordagem muitas vezes não elimina o problema em si, pois atua nas consequências e transfere os impactos para outra fase do ciclo do produto, ou seja, além de ser uma abordagem insuficiente do ponto de vista ambiental, é mais custosa economicamente para a empresa. A segunda abordagem está relacionada com a prevenção da poluição, atuando na eliminação ou minimização da poluição, diminuição dos resíduos gerados, redução no uso dos recursos naturais, dentre outras ações que visam tornar o processo mais eficiente. A terceira e última abordagem é a estratégica, ela enxerga a gestão ambiental como uma maneira de obter vantagens competitivas no mercado, pois além de praticar o controle e prevenção da poluição, aproveita a oportunidade para agregar valor ao produto ou marca perante seus stakeholders.

Nesta terceira abordagem Estratégica de Gestão Ambiental Empresarial, a atuação da empresa para reduzir impactos ambientais deve alcançar o nível das cadeias de suprimentos. Nesse sentido, afirma-se que, muitas vezes, os impactos ambientais de um produto ocorrem fora do local onde o produto é fabricado, podendo acontecer a montante ou a jusante ao longo dos diferentes estágios produtivos de uma cadeia de suprimentos (BEAMON, 1999; SEURING; MÜLLER, 2008; UNEP (United Nations Environment Programme); SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), 2010). É nesse contexto que atualmente há uma necessidade de atrelar as práticas de gestão ambiental dentro da cadeia de suprimentos dos produtos, uma vez que cada empresa está inserida em uma cadeia produtiva ou de suprimentos, trocando materiais, produtos e informações com fornecedores e clientes internos e externos. Então, os prejuízos causados por poluentes estão além dos muros de uma única empresa, sendo que eles se propagam por todo o ciclo de vida dos produtos e serviços.

Para aplicar a gestão ambiental empresarial na esfera das cadeias de suprimentos, precisa considerar o Ciclo de Vida do Produto, que é formado pelos sucessivos estágios do processo de produção

e comercialização de um bem ou serviço, desde a origem dos recursos naturais até a disposição final após o uso ou consumo, passando pelos estágios intermediários, como beneficiamento, transportes, estocagens, reaproveitamentos na forma de reuso, reciclagem, revalorização energética (BARBIERI, 2016). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica usada para avaliar os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais advindos de um produto durante suas fases do ciclo de vida (OMETTO; SAAVEDRA, 2012). A NBR ISO 14040 (2009) define a ACV como a compilação e avaliação das entradas (matérias-primas, água e energia), saídas (outputs de produtos e resíduos) e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.

Diante da necessidade de colocar em prática a gestão ambiental empresarial em todas as etapas do ciclo de vida do produto, o objetivo deste artigo é realizar a ACV de produto que contém cobre (fio trefilado de cobre eletrolítico com 99,99% de pureza) para identificar a gravidade dos aspectos e impactos ambientais potenciais gerados ao longo do ciclo de vida do cobre.

As justificativas para a escolha do setor de cobre relacionam-se às suas diversas funcionalidades e aplicações em vários produtos e à sua alta reciclabilidade e aos seus impactos ambientais. Sobre as diversas funcionalidades e aplicações, o cobre é um dos metais mais importantes na indústria, sendo sua principal característica a alta condutividade elétrica e térmica, utilizado nos setores de geração de energia elétrica e distribuição, em produtos eletroeletrônicos, em tubulações de água e gás, em peças de automóveis, além da sua capacidade antimicrobiana garantindo funcionalidade também em utensílios hospitalares, em setores de inteligência artificial e automação, transição energética e tecnologias verdes (veículos elétricos, tecnologias de hidrogênio verde, energia solar, energia eólica). Além disso, com os avanços tecnológicos, cada vez mais a sociedade precisa ter acesso à energia elétrica para atender suas necessidades básicas, além do aumento no uso de equipamentos eletrônicos que já fazem parte do dia a dia das pessoas no trabalho, na educação e para entretenimento. É nesse contexto que o cobre foi escolhido para a pesquisa, pois tem diversas funcionalidades para a sociedade e provavelmente será um material que permanecerá sendo essencial para a sociedade por milhares de anos. Além disso, o cobre é um material totalmente reciclável, que pode ser transformado novamente em novos produtos sem perder suas características e propriedades e o aumento da reciclagem deste metal poderia reduzir o déficit entre oferta e demanda no nível mundial. Contudo, apesar de ser um material totalmente reciclável, a mineração, extração e fabricação de produtos de cobre a partir do minério envolvem processos que usam recursos naturais (materiais, energia e água) e geram resíduos e poluentes ao meio ambiente (DÍAZ, 2025; RODRIGUES; SILVA; GUERRA, 2012; ICSG, 2024).

International Copper Study Group ou Grupo Internacional de Estudo do Cobre (ICSG, 2025) foi formalmente estabelecido como uma organização intergovernamental autônoma em 1992 após diversas reuniões patrocinadas pelas ONU. O objetivo do grupo é aumentar a transparência do mercado de cobre, promovendo um fórum global onde indústria e governos possam discutir problemas e objetivos comuns sobre o tema. São 25 países membros (incluindo o Brasil) mais a União Europeia. A sede do grupo fica localizada em Lisboa, Portugal. As reuniões ocorrem duas vezes ao ano e são abertas a membros de governos, conselheiros industriais (empresas) e observadores convidados. Qualquer país que seja membro da ONU e que esteja envolvido na produção, uso ou comércio internacional de cobre pode participar das reuniões.

Hinojosa Franco (2023), Díaz (2025), Cordova Nuñez, Romero Tello e Tapia Gutierrez (2024) salientaram o déficit entre oferta e demanda de cobre no mercado global, refletindo em demanda insatisfeita por cobre. Segundo Rodrigues, Silva e Guerra (2012), em relação ao Brasil, devido ao forte crescimento dos setores automobilístico, de construção civil e de eletrodomésticos, o país, que tradicionalmente importa uma boa parte do cobre que consome e terá que importar ainda mais. Para diminuir tal déficit e necessidade de importação, a reciclagem do cobre torna-se importante (DÍAZ, 2025).

O cobre é considerado uma commodity, sendo seu preço determinado pelo mercado e negociações nas bolsas de valores. Sobre a Cotação Internacional do Cobre no Mercado Mundial, houve uma queda no período de 2011 a 2016, alcançando US\$ 240,50 a libra, ao passo que, no período de 2016 a 2021, houve aumento no preço atingindo US\$ 375,60 a libra em 2021 (HINOJOSA FRANCO, 2023), indicando sua importância econômica. Conforme Silva (2011), o mercado de cobre trabalha com a compra e venda do material em diferentes formatos e porcentagem de pureza (minério, cobre refinado, ligas de bronze e latão etc.), além dos produtos semiacabados (fios, chapas, barras, tubos e conexões etc). Logo, o fato de o cobre ser totalmente reciclável, sem perder as suas propriedades, fez o mercado

de sucata ganhar importância nos últimos anos. As sucatas são classificadas de acordo com sua origem e qualidade e isso influencia no preço de comercialização.

Apesar de sua grande importância econômica e variedade de utilização, o cobre e seus produtos possuem aspectos e impactos ambientais gerados ao longo do seu ciclo de vida. A questão de pesquisa que este artigo busca responder é: ‘quais são os aspectos e impactos ambientais potenciais ao longo do ciclo de vida de produtos que contêm cobre?’. Para viabilizar a pesquisa, serão realizados recortes: será focado o fio trefilado de cobre eletrolítico com 99,99% de pureza, sua extração pela mineração, sua industrialização por metalúrgica de fundição e refino de cobre primário, a embalagem por meio de papelão, o uso por empresa de geração e distribuição de energia elétrica e a reciclagem do metal.

Na próxima seção, será apresentada a revisão bibliográfica sobre o setor do cobre (variedade de utilizações, déficit entre oferta e demanda, ciclo de vida e a reciclagem deste metal). Na seção 3, tem-se a metodologia utilizada; na seção 4, serão apresentados os resultados da ACV; e na seção 5, as considerações finais.

2. Revisão Bibliográfica.

Nesta seção, será apresentada a revisão teórica sobre a variedade de aplicações do cobre, o déficit mundial entre oferta e demanda deste metal, o seu ciclo de vida e a reciclagem. Em seguida, será apresentada a ferramenta ACV, que foi usada para levantar os aspectos e possíveis impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do cobre.

2.1. Cobre: variedade de aplicações e déficit mundial entre oferta e demanda.

Para Cordova Nuñez, Romero Tello e Tapia Gutierrez (2024) (2024), o metal cobre é utilizado em uma variedade de setores, incluindo construção, consumo geral, redes elétricas, maquinaria industrial e transporte.

Díaz (2025) ressalta os fatores que determinarão o aumento da demanda por cobre: industrialização e urbanização das economias emergentes (como China e nos países do leste asiático), o crescimento em setores de inteligência artificial e automação, transição energética e as tecnologias verdes. Em especial, sobre o aumento da demanda do cobre pelas tecnologias mais limpas em busca da sustentabilidade, suas aplicações são: redes de armazenamento de bateria, veículos elétricos e as tecnologias de hidrogênio verde, energia solar, energia eólica.

O cobre é altamente utilizado no setor elétrico, em geradores, motores, transformadores e sistemas de produção de energia renovável. No setor de eletrônicos e comunicações, na transmissão de dados em alta velocidade, incluindo serviço de internet, além de estar presente em smartphones, computadores, conectores, interruptores etc. No setor de construção civil, é utilizado nos formatos de tubos e conexões, além de ser usado em elementos arquitetônicos e itens de decoração devido a sua coloração. Também está sendo muito demandado no setor de veículos elétricos, que contêm aproximadamente quatro vezes mais cobre do que os carros convencionais. O cobre está nas baterias, rolamentos, radiadores, motores elétricos, cabos/fiação e infraestrutura de carregamento.

As maiores utilizações do cobre são (ICSG, 2024):

- **Setor elétrico:** por ser o melhor condutor de eletricidade entre os metais não preciosos e sua resistência à corrosão, é utilizado em cabos elétricos, sejam isolados ou não isolados, para aplicações de alta, média e baixa tensão, em fiação de edifícios comerciais e residenciais, em geradores, motores, transformadores e sistemas de produção de energia renovável para eficiência energética, como solar, eólica, geotérmica, células de combustível e outras tecnologias
- **Setor eletrônico e de comunicação:** nas TIC (tecnologias de informação e comunicação), para transmissão de dados em alta velocidade, como internet, através da infraestrutura de cobre das linhas telefônicas comuns, em linhas de assinantes domésticos, redes locais e amplas, telefones celulares e computadores pessoais, dissipadores de calor de cobre em processadores de computador, em outros equipamentos eletrônicos na forma de fios, transformadores, conectores, interruptores.

- Setor de Construção: em encanamento, torneiras, válvulas e acessórios, tubos de cobre em sistema de água, em maçanetas e placas de cobre devido a propriedades biostáticas que ajudam a prevenir a transferência de doenças e micróbios. Por seu valor estético, em fachadas, toldos, portas e molduras de janelas. Em caso de incêndio, o cobre não queima, derrete ou libera fumaças nocivas ou tóxicas.
- Setor de maquinário e equipamentos industriais: por sua durabilidade, usinabilidade e capacidade de serem fundidos com alta precisão e tolerâncias, são usados em engrenagens, rolamentos e lâminas de turbinas. Por sua capacidade superior de transferência de calor e resistência a ambientes extremos, é usado em equipamentos de troca de calor, vasos de pressão e tanques. Por ser resistente à corrosão, o cobre e as ligas de cobre (como latão, bronze e cobre-níquel), usado em ambientes marinhos, em vasos, tanques e tubulações expostos à água do mar, hélices, como em plataformas de petróleo e usinas costeiras.
- Produtos gerais: pela sua durabilidade superior, o cobre é usado em moedas, computadores, aparelhos elétricos, utensílios de cozinha, artigos de latão, fechaduras e chaves.
- Setor de transporte: em todas as formas de transporte. Em cascos de barcos e navios, devido à resistência e eficiência energética. Em automóveis e caminhões, por meio de motores de cobre, fiação, radiadores, conectores, freios e rolamentos. O motor a combustão interna médio contém cerca de 22,5 kg de cobre, ao passo que os Veículos elétricos (EVs) contêm aproximadamente quatro vezes mais cobre (em baterias, enrolamentos e rotores de cobre usados em motores). Pela superior condutividade térmica, resistência, resistência à corrosão e reciclabilidade, o cobre é usado em radiadores automotivos e de caminhões, em aviões e trens de nova geração.
- Setor médico: por sua característica antimicrobiana, é uma alternativa ao plástico em aplicações médicas, como superfícies de mesa estéreis e alças de carrinhos médicos.

Conforme Hinojosa Franco (2023), existe Déficit de Cobre no Mercado Global, ou seja, existe no mercado mundial demanda insatisfeita por cobre, sendo a defasagem da oferta em torno de 4 milhões de Toneladas Métricas na década de 2012 – 2021. Em concordância ao déficit do balanço de oferta e demanda por cobre a nível mundial, Díaz (2025) afirma que, desde 2010, o saldo de cobre refinado é deficitário e com tendência de aumentar tal déficit (com exceção do ano de 2023, que ocorreu o menor déficit desde 2003). Díaz (2025) sintetiza que o saldo deficitário advém, no que tange à oferta, em parte pela queda da oferta de cobre refinado do Chile e Índia e, no que tange à demanda, pelo aumento no consumo de cobre refinado pela economia da China e da Índia, com tendência a se manter o saldo deficitário entre oferta e demanda do cobre em nível mundial.

Sobre a análise da Demanda por cobre, Hinojosa Franco (2023) aponta que a demanda global por cobre apresenta uma tendência ascendente, sendo que setor Eletrônico o maior demandante do consumo de Cobre: o ano de 2012 (mais de 8 milhões de Toneladas Métricas anuais) e em 2021 alcança 10 milhões de Toneladas Métricas anuais. Em relação aos continentes demandantes, em 2021, o Continente Asiático teve a maior demanda de cobre (62,85% da demanda global, em torno 16 milhões de Toneladas Métricas anuais), seguido pela Europa (17,66%), América (13,08%), Oceania (5,04%) e África (1,37%). Cordova Nuñez, Romero Tello e Tapia Gutierrez (2024) salientam que, em 2023, a demanda de cobre da China cresceu 5% (equivalente a 734 mil toneladas métricas) e no nível global, o Banco Mundial prevê um crescimento de 1% na demanda de cobre para os anos de 2024 e 2025, equivalente a um aumento de 150 mil toneladas a cada ano. Os principais países importadores são: China, Japão, República do Coréia, Espanha e Alemanha.

Para Hinojosa Franco (2023), sobre a análise da Oferta de cobre, de 2012 a 2021, a oferta mundial de cobre foi em torno de 20 milhões de Toneladas Métricas Anuais. Enquanto que a Ásia apresentou um aumento de 187,60% na oferta (2000 a 2021), o continente americano teve diminuição de 41,59% na oferta e tem tendência decrescente e os continentes da Oceania e da África não superam 2 milhões de Toneladas Métricas Anuais. Em nível mundial, há 67 Fundições de Cobre que adquirem o cimento de cobre. Em concordância, Díaz (2025) afirmou que a produção de cobre de mina a nível mundial passou de 18,4 milhões de Toneladas Métricas em 2013 para 22,4 milhões de Toneladas Métricas em 2023, sendo um aumento de 21,3%. Em 2023, o Chile continua sendo o principal produtor de cobre de mina do mundo, com uma produção de 5,2 milhões de toneladas, que representa 23,4% do total mundial. Mas há cerca de dois anos, sua produção de cobre de mina tem apresentado reduções,

perdendo mercado a nível internacional, devido a esgotamento de alguns depósitos, ao custo da energia, à escassez hídrica e à diminuição da produtividade das principais empresas mineradoras.

Para Díaz (2025), a demanda por cobre deve continuar com tendência de alta, devido à sua importância e aplicação por vários setores produtivos e às exigências que a transição energética que demanda muito deste mineral. Entretanto, o autor insere a importância da reciclagem do cobre para a definição futura do equilíbrio da oferta e demanda do cobre refinado no futuro, além da velocidade da transição energética que pode aumentar os preços do metal vermelho.

2.2. Cobre: ciclo de vida e reciclagem.

O ciclo de vida do cobre compreende tanto a cadeia de suprimentos direta como a reversa. Em relação à cadeia direta, Díaz (2025) divide a cadeia produtiva do cobre em três etapas sucessivas de acordo com seus diferentes produtos, cuja agregação de valor implica no aumento do grau de pureza: produção de cobre de mina (minério de cobre), cobre fundido e cobre refinado. A produção do cobre nestas 3 grandes etapas da cadeia se manteve estável no período de 2003 a 2023. Nota-se que a produção de cobre refinado lidera em termos de sua importância relativa (média de 38,3% do total), em seguida, tem-se a produção de cobre de mina (média de 32,9%), e por fim a produção de cobre fundido (média de 28,7%). A produção de cobre de mina é preponderante sobre a fundição e a refino no continente americano, regiões da África e Oceania, portanto sendo regiões onde há carência por mais produção em etapas de agregação de valor do cobre (fundição e refino). Em 2023, na América, a produção foi de 63,3% para a produção de mina, 23,1% para cobre refinado e 13,7% para cobre fundido (DÍAZ, 2025).

Já ICSG (2024) apresenta a visão de todo o ciclo de vida do cobre, por meio das cadeias direta e reversa, com as seguintes etapas principais: mineração, produção, fabricação, uso e pós-uso. Na mineração, acontece o processo de extração do minério de cobre a partir de depósitos subterrâneos ou a céu aberto. Depois de extraído da mina, o minério de cobre é transportado para uma planta de concentração. Nessa etapa, o minério é triturado e moído para reduzir o tamanho das partículas e liberar o cobre dos outros minerais presentes. O cobre é coletado na forma de concentrado, que contém cerca de 30% de cobre. Então, o concentrado de cobre é transportado para a produção, onde ocorre a fundição e refino do cobre. Na fundição, o concentrado é aquecido a altas temperaturas no forno flash e, em seguida, o cobre é purificado e transformado em catodos de cobre com mais de 99% de pureza. Os catodos são então enviados para outras fábricas, onde são fundidos novamente e transformados em tarugos, barras/placas para posteriormente serem transformados em produtos finais, como fios, tubos, arames, chapas e outras formas de cobre utilizadas nas indústrias. A cadeia direta do cobre se encerra na utilização dos produtos. Na Figura 1, se observam também os fluxos reversos, tendo a entrada e saída de sucatas recicladas e resíduos em diversas etapas da cadeia, gerando um ciclo fechado ou semi-fechado, em que os resíduos de cobre são reaproveitados na cadeia produtiva que o originou ou em outras cadeias. Essa é uma das principais vantagens dos metais, pois podem ser reciclados em qualquer formato ou etapa do seu ciclo de vida (ICSG, 2024).

Dessa maneira, o ciclo reverso do cobre consiste na entrada e saída de sucatas recicladas em diversas etapas do processo, a depender da qualidade e pureza do material descartado. Por exemplo, peças com defeitos e de baixa qualidade podem retornar para a fundição, assim como a sucata proveniente do descarte após uso também pode ser reciclada. Portanto, a cadeia reversa do cobre começa com a coleta de produtos que contêm cobre, sendo esses produtos então transportados para uma instalação de reciclagem, onde são separados de acordo com a sua qualidade (pureza); em seguida, o cobre é processado para remover quaisquer impurezas e prepará-lo para ser fundido, fechando o ciclo do material, havendo o retorno do mesmo para a fabricação, podendo se tornar outro produto ou então ser destinado para outros usos.

O ICSG (2024) estimou que, em 2023, 32% do uso global de cobre foi proveniente de cobre reciclado e que, em alguns países, o uso do cobre reciclado é indispensável para atender às demandas internas. No entanto, devido à baixa quantidade de cobre reciclado, ainda é necessário o cobre mineral vindo da mineração para atender às demandas da sociedade.

Apesar de ser um material totalmente reciclável (ICSG, 2024, 2025), há dificuldades para a sua maior realização. Beamon (1999) e Linton, Klassen e Jayaraman (2007) ressaltaram que a Logística Reversa ou a gestão da cadeia reversa lida com incertezas maiores do que a cadeia direta, ocasionando maior complexidade, devido à incerteza associada ao processo de recuperação de produtos no seu final

de vida ou uso, em termos de tempo, qualidade e quantidade de produtos retornados. Quanto à incerteza no tempo e quantidade de retorno, ICSG (2024) afirmam que os produtos que contêm cobre costumam ter vida útil longa, o que significa que leva tempo para estarem disponíveis para reciclagem, acarretando em dificuldade quanto à quantidade de cobre reciclado. Quanto à incerteza na quantidade e qualidade de retorno, há desafios técnicos (qualidade/pureza do cobre) e logísticos associados ao processamento e recuperação do cobre, interferindo na qualidade e pureza do material. Nem sempre a sucata de cobre reciclada possui a qualidade/pureza necessária, existindo desafios técnicos, econômicos e logísticos associados ao processamento e recuperação do cobre a partir de certos produtos ou resíduos, o que reduz a eficiência da reciclagem. Além disso, a disponibilidade de sucata de cobre pode ser limitada em certas regiões, o que dificulta a obtenção de quantidades suficientes para atender à demanda.

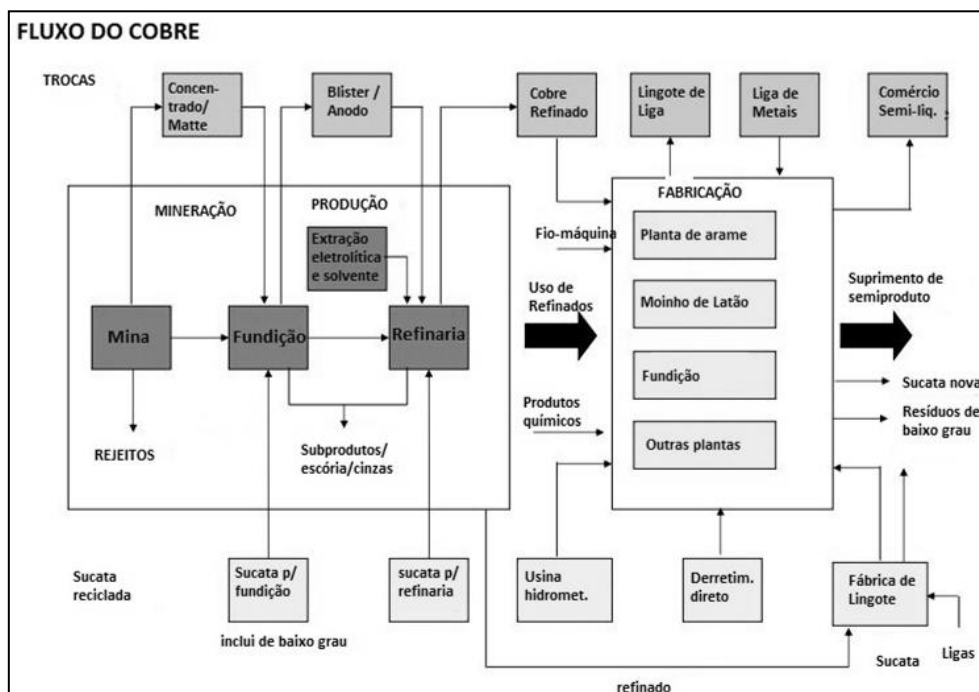


Figura 1 – O Ciclo de vida do cobre: cadeia de suprimentos direta e reversa. Fonte: Adaptado de ICSG (2024).

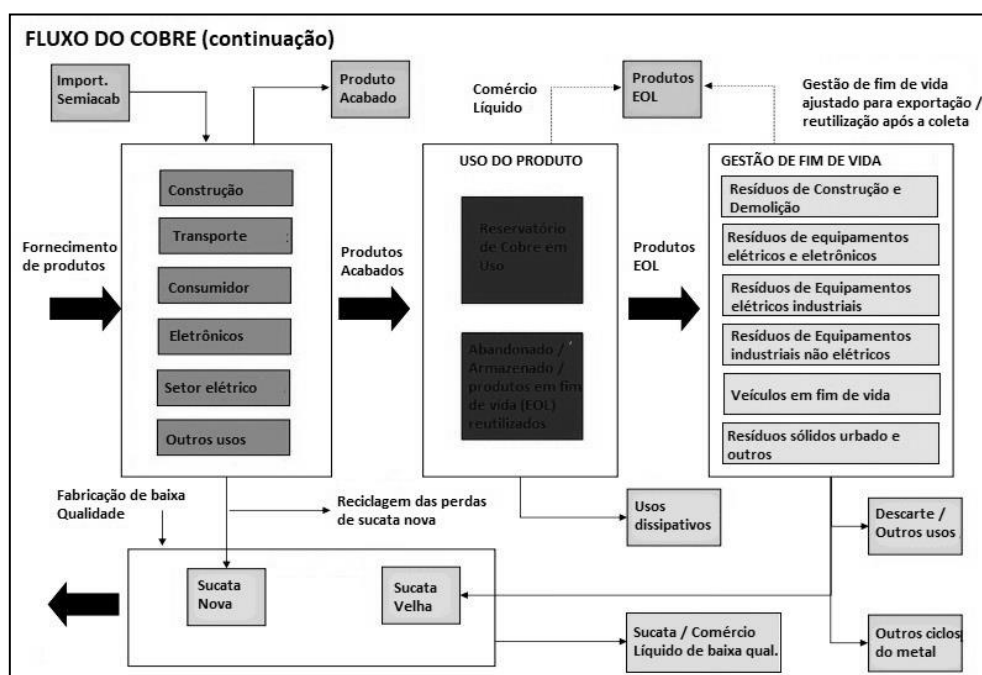


Figura 2 – O Ciclo de vida do cobre: cadeia de suprimentos direta e reversa. Fonte: Adaptado de ICSG (2024).

Além dos benefícios ambientais e econômicos de realizar a reciclagem do material, também é uma maneira de garantir a continuidade de produção em caso de interferências climáticas ou uma pandemia, como ocorreu entre 2019 e 2021, quando houve desequilíbrios na produção de cobre devido à dificuldade de recebimento de matéria-prima vinda do Chile, levando empresas a buscarem maneiras de aumentar o reaproveitamento de materiais e ampliação da reciclagem do cobre. A pandemia de COVID-19 afetou a produção e as exportações de cobre em nível mundial. Para CEPAL/ONU (2020), as atividades econômicas foram muito afetadas pela pandemia de COVID-19, tendo impactos na oferta e demanda devido a necessidade de os governos adotarem quarentenas para evitar a disseminação do vírus. O distanciamento acarretou na desaceleração da produção ou até mesmo na sua interrupção total. Em particular, na região da América Latina e Caribe, houve as seguintes consequências com a pandemia: diminuição das atividades econômica e principalmente exportações pela recessão global, queda nos preços dos produtos primários (incluindo o cobre), interrupção das cadeias produtivas globais de valor (fornecedores chineses, produção europeia e dos EUA e houve influências no México e Brasil).

2.3. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Conforme a ABNT NBR ISO 14040 (2009), o ciclo de vida é definido como estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final. E define a ACV como a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. Para Barbieri (2016), a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta utilizada para compilar e avaliar os aspectos ambientais de um produto ou serviço durante todo o seu ciclo de vida. E para a gestão ambiental, o ciclo que se refere é o ciclo físico do produto, em que este passa por diversas etapas durante o processo de produção, transporte, estocagem até a comercialização e disposição final após o uso ou consumo, ou seja, se refere a todas as atividades exercidas na cadeia de suprimentos do produto.

Diante da variedade de conceitos e métodos adotados para aplicar a ACV, a Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization* – ISO) desenvolveu normas para estabelecer conceitos, critérios e diretrizes padrões sobre a ACV, para garantir que o seu uso tenha credibilidade. Então hoje a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem duas normas principais sobre a temática de ACV, sendo que a ISO 14040 (2009) descreve os princípios e estrutura da ACV e a ISO 14044 (2009) descreve os requisitos e orientações. A ACV de forma geral pode ser utilizada para diversos objetivos, seja para melhoria do processo produtivo de um produto ou serviço, para revisar um processo e reduzir os impactos ambientais causados, para comparação entre produtos de marcas diferentes, como forma de marketing verde da organização, dentre outros (BARBIERI, 2016).

Na figura 2, observam-se as quatro etapas da ACV de acordo com a Norma ISO 14040 (2009). A primeira delas é a definição do objetivo e escopo do estudo, em que o objetivo se refere às aplicações do estudo, qual o público que se quer atingir e as razões que exigiram a realização do estudo. Já no escopo são definidas as fronteiras do sistema, a unidade funcional, a profundidade, abrangência e detalhamento do estudo, a depender da sua aplicação e objetivo. Em seguida, vem a fase de análise de inventário, que consiste na busca e coleta de dados necessários para atingir os objetivos do estudo, ou seja, os dados de entrada e saída associados ao sistema de estudo. A terceira fase é a avaliação de impacto, que busca entender e avaliar a magnitude dos potenciais impactos ambientais e encontrar informações que auxiliem na avaliação dos resultados do inventário do ciclo de vida (ICV) do sistema do produto, visando melhor entendimento sobre sua importância ambiental. A interpretação dos resultados é a última fase da ACV e tem por objetivo sumarizar os resultados obtidos nas fases anteriores e utilizar de base para tomar decisões, fazer recomendações e conclusões, de acordo com o objetivo e escopo do estudo. Porém, o estudo e realização de uma ACV de acordo com a ISO exige uma equipe multidisciplinar e muito tempo, podendo levar meses ou anos a depender da complexidade do ciclo do produto e dados disponíveis. Devido a isso, há métodos de realização da ACV de maneira simplificada, baseados na ISO 14040 e ISO 14044 mas de forma reduzida, excluindo alguns elementos sem que cause

mudanças significativas nas conclusões do estudo (BARBIERI, 2016). O método simplificado escolhido para realização da ACV do cobre é a Avaliação de Produto Ambientalmente Responsável (*Environmentally Responsible Product Assessment - ERPA*), detalhado na seção 3.

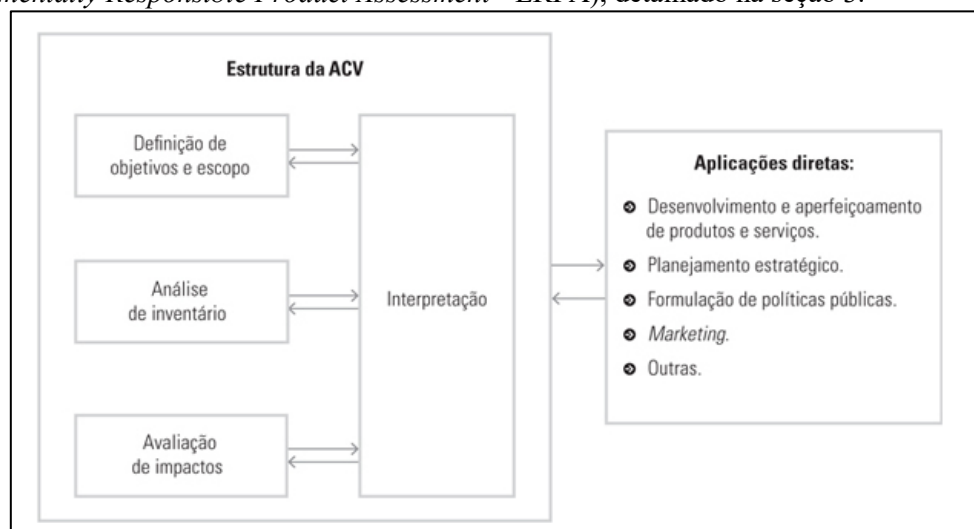


Figura 3 – As quatro fases da ACV. Fonte: ABNT, NBR ISO 14040 (2009).

Vale mencionar algumas pesquisas que abordaram a ACV de produtos ou materiais. Freitas e Marchesini (2022) realizaram a ACV das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos, a partir de dados secundários e concluíram que a etapa de extração dos recursos naturais é a que apresenta maior impacto ambiental com potencial aquecimento global, acidificação, eutrofização e geração de resíduos. Também verificou que, na fase de uso da bateria, há um consumo elevado de energia elétrica e a reciclagem é a etapa que se destaca com o maior consumo de água doce e geração de esgoto. Esse resultado apenas demonstra o quão importante é realizar o estudo dos impactos ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, pois apesar dos veículos elétricos serem uma ótima alternativa por emitirem uma quantidade pequena de CO₂, quando comparado com os veículos a combustão, é na fase de extração da matéria-prima que se concentra a maior parte da emissão de gases de efeito estufa.

Silva *et al.* (2018) apresentaram um exemplo de ACV do berço ao túmulo aplicado a válvulas de escape produzidas no Brasil utilizadas em automóveis. Os dados foram obtidos de fontes primárias e secundárias, além do estudo de caso aplicado a uma empresa que produz válvulas para motores no Brasil. Ao todo, treze categorias de impacto foram avaliadas e mais de 90% de todos os impactos foram devidos ao consumo de combustível no motor de combustão interna durante a fase de uso das válvulas. Com relação à fase de fabricação das válvulas, os processos de usinagem aplicados na haste da válvula representaram 63% de todos os impactos e foram fortemente influenciados pelo consumo de energia elétrica, matérias-primas utilizadas na haste da válvula e fluido de corte. Após isso, cenários de Produção Mais Limpa (P+L) foram avaliados e testados. Ao final do estudo, a comparação entre os perfis ambientais antes e depois da adoção das medidas de P+L propostas mostrou uma redução significativa de 27% nos impactos em termos de esgotamento de recursos (fósseis e minerais). Portanto, os resultados mostraram que as mudanças nos parâmetros de fabricação da válvula de escape podem gerar um melhor desempenho ambiental do ciclo de vida para uma produção mais limpa.

Pereira (2004) realizou uma ACV do processo produtivo de pisos cerâmicos, realizando análise ambiental do processo de fabricação de pisos cerâmicos de duas empresas do ramo (empresa A e empresa B). Foram considerados no estudo apenas os processos internos de fabricação, da extração e transporte da argila até a embalagem do piso, portanto, etapas como utilização e pós-uso não foram estudadas. A pesquisa utilizou as partes principais de estrutura de uma ACV, ou seja, definiu os sistemas, a unidade funcional, realizou o inventário (etapa de coleta de dados) e por fim estabeleceu um banco de dados capaz de contribuir para o desenvolvimento de indicadores de desempenho ambiental. Os dados quantitativos obtidos foram em relação ao consumo de água, matérias-primas e combustíveis, além de emissões gasosas e resíduos sólidos associados à produção de 1 m² de piso cerâmico. Ao final da pesquisa, ambas as empresas (A e B) adotam iniciativas para otimizar o consumo de matérias-primas e energia, bem como o tratamento e/ou reutilização de resíduos. No entanto, a empresa B apresentou um

perfil ambiental melhor do que a empresa A, possivelmente devido à otimização de seus processos de produção e à produção em maior escala, o que dilui os valores medidos. Pereira (2004) ressalta que a subjetividade é comum em avaliações que utilizam métodos multicritério, pois a ponderação dos critérios depende das prioridades e valores de quem está realizando a avaliação. Por isso, é importante que a avaliação seja transparente e bem documentada, com uma explicação clara dos critérios utilizados e das razões por trás de sua escolha.

Outro trabalho interessante de aplicação da ACV foi o estudo de Ferreira (2014), aplicando a metodologia para avaliar a produção de concentrado de minério de ferro. O controle dos problemas ambientais causados pela mineração requer o monitoramento e tratamento adequados dos impactos da atividade e o cumprimento da legislação pertinente. O objetivo do estudo foi estimar os impactos ambientais da mineração de ferro, através da aplicação da ACV, e avaliar os processos de lavra e tratamento de minério de ferro no Brasil, utilizando a abordagem "do berço ao portão". Foram utilizados dados primários do processo da Samarco Mineração e da base de dados Ecoinvent v2.0, sendo que foram todos consolidados com o auxílio da ferramenta SimaPro 7. Os resultados indicaram que o consumo de diesel nos equipamentos de lavra foi o principal contribuinte em relação ao esgotamento de combustíveis fósseis, enquanto os processos de produção e uso dos corpos moedores foram fontes importantes de impactos ambientais em quase todas as categorias avaliadas. Ainda, afirma que o estudo atesta a aplicabilidade da ACV para avaliação de impactos ambientais da mineração e destaca a necessidade de adotar medidas mais amplas, como a substituição de materiais, para reduzir esses impactos.

3. Metodologia.

Este artigo utilizou a abordagem qualitativa de pesquisa, o método de pesquisa foi o estudo de caso e o instrumento de coleta de dados foi a análise de documentos de empresas e instituições para a obtenção de dados secundários que representam cada etapa do ciclo de vida do cobre, sendo dados coletados em Abril de 2023, para a realização da ACV com base no método ERPA. Para a aplicação da ACV em produtos que contêm cobre, o foco do artigo foi o fio trefilado de cobre eletrolítico com 99,99% de pureza.

O estudo de caso é um estudo empírico que investiga um fenômeno dentro de um contexto real, onde as fronteiras não são rigidamente definidas. É uma análise cujo objetivo é aprofundar o conhecimento sobre determinado processo ou problema, para compreender o fato, sugerir hipóteses e desenvolver uma teoria (MIGUEL, 2007; YIN, 2001).

Quanto aos recortes para realizar o estudo da ACV, o escopo do estudo e a unidade funcional envolveram o fio trefilado de cobre eletrolítico com 99,99% de pureza, referente a 1 tonelada de tais fios, sendo considerada a sua utilização pelo setor de energia elétrica.

Quanto à coleta de dados secundários sobre aspectos ambientais em cada fase do Ciclo de vida do Cobre para realizar sua ACV, têm-se as seguintes fontes de empresas e instituições que representam cada fase do ciclo de vida do cobre (quadro 1 sintetiza as fontes, as referências e as limitações):

- na etapa de extração de materiais: os dados foram baseados no relatório de sustentabilidade da Coldeco (2021), maior empresa de mineração de cobre do Chile
- na etapa de manufatura do produto: os dados obtidos tiveram origem no Relatório de Sustentabilidade de 2018 da empresa Paranapanema (2018), que é uma metalúrgica do cobre desde a transformação do concentrado até o produto final (fio de cobre). No Ranking da Revista Exame sobre as Melhores e Maiores Empresas de 2025, no setor de 'Siderurgia, mineração e metalurgia', a Paranapanema ocupa a 26ª posição em receita e a 36ª posição no ranking geral (Revista Exame, 2025a), indicando que é uma empresa representativa no setor.
- na etapa de embalagem e expedição: os dados foram limitados ao uso do papelão, principal material utilizado para embalar os produtos em cobre, não sendo considerado dados relativos a expedição dos produtos. Escolheu-se a instituição Portal de Resíduos Sólidos (2023).
- na etapa de uso do produto: os dados foram obtidos do relatório da Enel Brasil (2022), que é uma empresa privada multinacional do setor de geração, distribuição, transmissão e comercialização de energia elétrica, proveniente das seguintes fontes renováveis: eólica, solar e hídrica. Além de usar fontes mais sustentáveis de energia (eólica e solar), a representatividade da Enel Brasil no setor de energia advém da sua posição no Ranking da Revista Exame sobre

as Melhores e Maiores Empresas de 2025 no setor de ‘Energia’: a empresa ocupa a 7ª posição em receita e a 101ª posição no ranking geral (Revista Exame, 2025b).

- **na etapa de reciclagem e disposição final:** devido às dificuldades apresentadas em obter dados consolidados e robustos referentes à reciclagem do cobre, não foram encontrados dados quantitativos para analisar os impactos ambientais causados nessa etapa do ciclo de vida.

Quadro 1 – Síntese das fontes dos dados para o inventário da ACV: diferentes fontes de dados foram consultadas de acordo com a etapa do ciclo de vida.

Etapa do Ciclo de Vida	Fonte de dados	Referência	Limitações
1) Extração de materiais/mineração	Coldeco – <i>Corporación Nacional del Cobre</i> (Chile) (Coldeco, 2021)	Corporación Nacional del Cobre de Chile (Coldeco). Reporte de Sustentabilidad 2021, Santiago, 2021. Disponível em: https://www.codelco.com/memoria2021/site/docs/20220219/20220219165716/reporte_sustentabilidad_codelco_2021_1_.pdf	Minas de cobre administradas pela Coldeco no Chile
2) Manufatura do produto	Paranapanema: indústria metalúrgica de fundição e refino de cobre primário (Paranapanema, 2018)	Relatório de Sustentabilidade da empresa de 2018. Disponível em: https://ri.paranapanema.com.br/perfil/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/ . Acesso em 23 de abril de 2023	Dados de 2018 da metalúrgica Paranapanema
3) Embalagem e expedição	Portal de Resíduos Sólidos (2023) referente ao papelão	Portal de Resíduos Sólidos. Reciclagem de Papel. Disponível em: https://portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-papel-2/ . Acesso em 23 de abril de 2023	Dados apenas referentes ao papelão, não considerando demais materiais utilizados na embalagem dos produtos. Também não foram analisados dados referentes à expedição ou distribuição dos produtos
4) Uso do produto	Enel Brasil (2022)	ENEL BRASIL. Relatório Anual de Sustentabilidade 2021. 170 p., 2022. Disponível em: https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Sustentabilidade/relatorios-anuais.html . Acesso em 23 de abril de 2023	Dados de 2021.
5) Reciclagem e disposição final	X	X	Não foram encontrados dados quantitativos consolidados sobre essa etapa do ciclo de vida

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Barbieri (2016) destaca que a complexidade para realizar a ACV de forma completa e detalhada como recomendam as normas ISO torna a ACV impraticável. Isso porque a ACV é um instrumento que processa uma grande quantidade de dados e realiza cálculos que dificilmente seriam possíveis sem o uso de softwares, cujas bases de dados são residentes, sendo nem sempre possível utilizá-los sem comprometer a consistência se ACV se referir a regiões e ambientes diferentes de tais bases de dados. O autor indica que as soluções para tal problema é aperfeiçoar os softwares ou usar métodos simplificados de ACV, como a Matriz ERPA – desenvolvida por Graedel e Allembly em 1995).

Então, o método simplificado escolhido para realização da ACV do cobre é a Avaliação de Produto Ambientalmente Responsável, que vem do inglês *Environmentally Responsible Product Assessment* (ERPA). Esse método foi escolhido pois possui flexibilidade e é uma maneira simplificada de realizar a ACV, além de que ao final da avaliação, é possível obter um valor numérico capaz de dizer a gravidade dos impactos. O método foi desenvolvido por Graedel e Allembly e consiste em uma matriz 5x5, em que as linhas representam as etapas do ciclo de vida do produto, e as colunas, as principais

preocupações ambientais a serem consideradas em cada estágio. As preocupações ambientais precisam ser definidas antecipadamente de acordo com o produto e objetivos do estudo. A avaliação de cada uma das células da matriz corresponde à terceira fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV), que devem ser preenchidas de acordo com uma escala de valores que variam de 0 a 4, sendo que 0 representa impacto significativo e 4 nenhum impacto ou desprezível. Os valores intermediários podem ser considerados da seguinte forma: 2 sendo o impacto médio e o 1 e 3 sendo impacto superior e inferior à média, respectivamente. Os valores atribuídos para cada célula da matriz ERPA são obtidos de maneira lógica segundo a análise do inventário do ciclo de vida, sendo verificados os dados do balanço de massa e energia. No final da análise, todas as 25 células da matriz precisam estar preenchidas e a responsabilidade ambiental total (RTA) do produto será a soma dos valores atribuídos em cada célula. Portanto, quanto mais próximo de zero, significa que maior é o impacto ambiental do ciclo e quanto mais se aproxima de 100, menor é o impacto total. É importante ressaltar que o método permite realizar mudanças na forma de classificação e escala, utilizando a escala de maneira inversa ou usando adjetivos como baixo, médio e alto impacto. Além disso, também há flexibilidade para atribuir pesos diferentes aos impactos ambientais definidos e ampliar a matriz, incluindo mais impactos a serem avaliados ou até incluindo mais estágios do ciclo de vida do produto (GRAEDEL e ALLENBY, 1995).

De acordo com Graedel e Allenby (1995), os cinco estágios do ciclo de vida mencionados nas linhas da Matriz ERPA são: pré-fabricação ou extração de materiais; manufatura do produto; embalagem e expedição; uso do produto; e reciclagem e disposição final. Quanto às preocupações ambientais dispostas nas colunas da Matriz, geralmente são os seguintes atributos: escolha dos materiais, que examina a natureza, origens e propriedades dos materiais utilizados no produto; uso de energia, está relacionado ao modo e à quantidade de consumo de recursos energéticos; e os outros três atributos levantam a questão dos resíduos sólidos, líquidos e gasosos gerados e/ou lançados no meio ambiente em qualquer fase da vida do produto.

4. Resultados da ACV.

As subseções seguintes apresentarão a aplicação das quatro fases da ACV, a saber: 1) o objetivo e escopo da ACV; 2) o inventário do ciclo de vida; 3) a análise dos potenciais impactos do ciclo de vida para cada fase e a matriz ERPA do Cobre; e 4) a interpretação da ACV.

4.1. Fase 1 da ACV: definição do objetivo e escopo do estudo.

O objetivo da ACV foi levantar as etapas do ciclo de vida de produtos em cobre e identificar os principais impactos ambientais potenciais causados em cada etapa, inclusive no uso e pós-uso.

O escopo do estudo será o fio trefilado de cobre eletrolítico com 99,99% de pureza, de diversos diâmetros. Como unidade funcional, consideram-se o consumo de água, uso de energia, geração de resíduos sólidos, resíduos líquidos (efluentes) e resíduos gasosos (emissão de gases de efeito estufa - GEE) para 1 tonelada de fios de cobre.

As fronteiras do sistema serão as cinco fases do ciclo de vida do produto, conforme matriz ERPA (pré-fabricação ou extração de materiais; manufatura do produto; embalagem e expedição; uso do produto; e reciclagem e disposição final), no entanto, devido à dificuldade de obtenção dos dados secundários, não foram considerados todos os impactos relacionados com o transporte e/ou deslocamento dos materiais entre as fases. Nesse caso, a etapa de pré-fabricação/extração de materiais considera apenas o processo de extração do minério e processos de obtenção do concentrado de cobre. A etapa de manufatura do produto envolve o processo de fabricação dos fios trefilados. Na etapa de embalagem e expedição, é considerado apenas o processo de embalagem do produto, não considerando os impactos de transporte até o cliente. O uso do produto é baseado apenas em um tipo de aplicação do fio de cobre para limitar as análises de impactos ambientais, que nesse caso será o setor de energia elétrica. E por fim, o pós-uso considerando o processo de reciclagem.

4.2. Fase 2 da ACV: Análise do Inventário do Ciclo de Vida.

Para realização da análise de inventário, os dados foram obtidos de empresas que representam cada etapa do ciclo de vida do material, sendo abordados de maneira consolidada. A fonte dos dados e informações para cada etapa do ciclo de vida é:

- na etapa de extração de materiais: os dados foram baseados na Coldeco, que é a maior empresa de mineração de cobre do Chile;
- na etapa de manufatura do produto: os dados obtidos tiveram origem no relatório de 2018 de uma indústria metalúrgica que atua na fundição e no refino do cobre primário, e que atua em grande parte da cadeia produtiva industrial do material, até a fabricação e venda de produtos e coprodutos de cobre e suas ligas;
- na etapa de embalagem e expedição: os dados foram limitados ao uso do papelão, principal material utilizado para embalar os produtos em cobre, não sendo considerados dados relativos à expedição dos produtos. Os dados utilizados foram obtidos do Portal de Resíduos Sólidos;
- na etapa de uso do produto: os dados foram obtidos do relatório da Enel Brasil, a maior empresa privada do setor de geração, distribuição, transmissão e comercialização de energia elétrica;
- na etapa de reciclagem e disposição final: devido às dificuldades apresentadas em obter dados consolidados referente à reciclagem do cobre, não foram encontrados dados quantitativos para analisar os impactos ambientais causados nessa etapa do ciclo.

Sobre a etapa do ciclo de vida do cobre relativa à **Extração de Materiais**, a extração do cobre pode ter vários impactos ambientais negativos, como a poluição da água, ar e solo, devido aos processos de mineração e beneficiamento do minério de cobre. A extração do cobre envolve o uso de maquinários pesados e processos de fundição que emitem poluentes atmosféricos, requer grandes quantidades de água, que podem ser poluídas por produtos químicos usados para a extração do minério e por metais pesados que são liberados durante o processamento do minério. Também pode levar à erosão do solo e à perda de vegetação, além de contaminar o solo com produtos químicos e metais pesados. E o uso de energia e combustíveis fósseis no processo contribui para a emissão de gases de efeito estufa.

Segundo o ICSG (2024), o Chile é o maior produtor de cobre do mundo, sendo responsável por quase um terço da produção mundial de minas de cobre em 2021, com uma produção de 5,6 milhões de toneladas de cobre. O Chile tem uma longa história na mineração de cobre e possui algumas das maiores minas de cobre do mundo, incluindo a mina de Escondida. O Peru também é um país significativo na produção de cobre, responsável por 10,8% da produção mundial de minas de cobre em 2021. No Brasil, a mineração de cobre é realizada predominantemente nos estados do Pará e Goiás, que juntos respondem por cerca de 85% da produção de concentrado de cobre do país. O Pará é o principal estado produtor de cobre do Brasil, em destaque a mina de Sossego; Goiás possui importantes reservas de cobre, com a mina de Chapada. A Bahia, que já foi o maior estado produtor de cobre do país, agora responde por apenas cerca de 12% da produção de concentrado de cobre. A mineração de cobre na Bahia é realizada pela mina de Caraíba, que é uma das mais antigas do país, mas que atualmente produz quantidades menores de concentrado de cobre em comparação com outras minas no Pará e em Goiás (ROCIO, 2012).

De acordo com BNDES (1997), cerca de 80% das reservas mundiais de cobre são de minério sulfetado, sendo que mais da metade é do tipo sulfetado porfirítico, como as da mina de Escondida no Chile. Essas reservas têm grande importância econômica devido ao volume de minério disponível e podem ser lavradas a céu aberto. No entanto, essas reservas apresentam um baixo teor de cobre, geralmente abaixo de 1,5%, pois o cobre encontra-se disseminado em rochas. Isso torna mais desafiadora a extração do cobre dessas reservas e que requer o uso de técnicas avançadas de mineração e processamento para obter uma quantidade significativa de cobre a partir do minério.

Uma das maiores minas de cobre situadas no Chile, Chuquibambilla, pertence à Corporación Nacional del Cobre (Codelco), além de mais sete outras minas também operadas pela empresa. Segundo o Relatório de Sustentabilidade da Coldeco do ano de 2021 (Coldeco, 2021), foram medidas as *emissões de gases de efeito estufa* diretas e indiretas, sendo as emissões indiretas de origem do sistema de geração de energia fornecida para as instalações e as emissões diretas o uso de combustíveis (petróleo e derivados, gás natural e carvão). Para o ano de 2021, as operações resultaram na emissão direta de

aproximadamente 1.738 mil toneladas de dióxido de carbono equivalente (kt CO₂ eq) e indireta de 2.900 kt CO₂ eq, um total de 4.637.446 t CO₂ eq. Foram cerca de 2,87 t CO₂ eq por tonelada de material produzido (1.618.266 ton de material produzido em 2021). Em termos de *energia consumida*, a maior parte dessa energia foi gerada a partir de fontes não renováveis, como o carvão, gás natural e derivados de petróleo, mas a empresa também utilizou energia renovável, como hidrelétrica e solar, em suas operações. O consumo total foi de 52,31 PJ (petajoule) em energia, isso corresponde a 1,453 x 10¹⁹ GWh (gigawatt-hora).

A água é um recurso importante na extração de minério de cobre, pois é utilizada em vários processos, como no transporte do minério, no processo de lixiviação e na purificação do cobre. Somando todas as fontes de recursos hídricos utilizados pela Coldeco (água superficial, subterrânea, minas, comprada de terceiros e municipais), houve um consumo de 183.078 mil m³ de água em 2021. Em relação aos resíduos sólidos e líquidos, os resíduos de mineração incluem materiais que são retirados da terra durante o processo de extração do minério de cobre, como rochas, solo e sedimentos. Esses resíduos geralmente contêm pequenas quantidades de minerais de cobre, mas são descartados como rejeitos porque não são economicamente viáveis para a produção de cobre, já os resíduos de processamento incluem materiais que são gerados durante as etapas de processamento do minério de cobre para a produção do metal. Esses resíduos podem incluir lamas, cinzas, escórias, poeira, gases de combustão e resíduos químicos. Esses resíduos geralmente contêm altas concentrações de metais pesados e outros contaminantes, tornando-os perigosos para o meio ambiente e a saúde humana se não forem manuseados e dispostos corretamente. Assim como a água utilizada no processamento pode conter altas concentrações de metais pesados e outros contaminantes. Em 2021, segundo a Coldeco (2021), foi gerado um total de 142 mil toneladas de resíduos não perigosos e foi reciclada aproximadamente 26% (cerca de 37 mil toneladas). Já em termos de resíduos perigosos, foi gerado 17 mil toneladas (óleo usado, baterias, ânodos de chumbo, resíduos contaminados, entre outros).

O Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2014) realizou um levantamento de emissão de gases de efeito estufa considerando as principais empresas extratoras de minério de cobre no Brasil, considerando os processos de lavra, extração, beneficiamento físico, transporte interno, recuperação de áreas abertas e encerramento da mina. O escopo do levantamento foi dividido em dois, sendo o escopo 1 – emissões diretas: combustão em equipamentos fixos; combustão em equipamentos móveis; geração própria de energia; uso de explosivos; emissões do processo; emissões fugitivas; resíduos sólidos e efluentes; tratamento e correção do solo. E escopo 2 – emissões indiretas: aquisição de energia. A estimativa de emissão de GEE para 100% do minério movimentado na extração de Cobre para o ano-base 2011 foi de 280.878,36 t CO₂ eq para o escopo 1 e 22.484,05 t CO₂ eq para o escopo 2, totalizando em 303.362,41 t CO₂ eq.

Sobre a etapa do ciclo de vida do cobre relativa à **Manufatura do Produto**, a manufatura do fio de cobre se inicia com o processamento do concentrado por meio da pirometalurgia ou da hidrometalurgia. O processo pirometalúrgico é o mais utilizado e envolve as fases de fundição, conversão e refinamento do material para obtenção do cobre com 99,99% de pureza (cátodo), que será utilizado como matéria-prima para a fabricação dos fios. O cobre é novamente fundido para obter o formato adequado para seguir o processo, que é na fábrica de laminação. As barras são laminadas para se tornarem placas de cobre com espessuras específicas, utilizando-se equipamentos chamados laminadores. As placas de cobre laminado são cortadas em tiras, que são submetidas a um processo de trefilação, em que são puxadas por uma matriz de metal duro em forma de cone, que reduz a espessura e aumenta o comprimento do material, formando o fio de cobre. Ainda, dependendo da aplicação e especificação do fio, ele pode receber um revestimento de material isolante, como polímeros ou esmaltes, para garantir a sua resistência e isolamento elétrico. Assim, os fios são enrolados em bobinas, embalados e seguem para o cliente (ROCIO, 2012).

Considerando que a Empresa Paranapanema (2018), metalúrgica de fundição e refino de cobre (cujos dados foram utilizados neste artigo) e que realiza a manufatura do cobre desde a transformação do concentrado até o produto final (fio de cobre), os dados do relatório de sustentabilidade 2018 foram a fonte principal de informações referentes aos impactos ambientais, como consumo de água, energia, emissões de gases de efeito estufa e descarte de resíduos sólidos e efluentes. A água é utilizada em diversas etapas do processo de manufatura do fio de cobre, como na eletrólise, se utilizando água como eletrólito, na trefilação para lubrificar o fio e resfriar o equipamento durante esse processo e também pode ser utilizada na limpeza do fio antes do revestimento e no enxágue após o revestimento. De maneira

geral, nesta Empresa Metalúrgica, a água é utilizada para o resfriamento dos metais e da limpeza dos equipamentos, higienização das instalações, bem como para consumo de colaboradores e visitantes. Na unidade da Bahia, a água utilizada é de origem subterrânea, captada em poços artesianos, perfurados e operados pela própria empresa. Já na unidade de São Paulo, cerca de 80% da água total utilizada são de reuso, sendo provenientes dos processos industriais e retorno do efluentes gerados na própria unidade, além da captação e tratamento de água da chuva. Em 2018, esta Empresa Metalúrgica consumiu um total de 3.057.751,96 m³ de água, sendo 194.027,10 m³ provenientes de abastecimento público e adquirida de outras empresas de abastecimento e 2.863.724,86 m³ de águas subterrâneas. Em relação aos efluentes, apenas na unidade da Bahia foram 2,35 milhões de m³ de efluentes descartados. Em contrapartida, na unidade de São Paulo, 98% dos efluentes foram reutilizados, pois utiliza um circuito fechado, onde todo o efluente industrial e efluente de esgoto, são encaminhados para Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) e Estação de Tratamento de Água (ETA), sendo tratados e retornados para os setores produtivos.

A energia é outro recurso muito requisitado na produção do cobre, principalmente para funcionamento do maquinário das fábricas de refino, fundição, laminação, trefilação etc. Em 2018, o consumo de energia foi de 1.468.168,06 de giga joules (GJ), sendo 111.825,08 GJ de fontes de energia não-renovável e 1.356.342,98 GJ em energia elétrica (correspondente a 376.694.133,64 kWh).

Os resíduos sólidos descartados pela Indústria Metalúrgica em 2018 somaram ao todo 11.851,366 toneladas de resíduos, sendo 8,98 mil toneladas classificados como não-perigosos e 2,87 mil toneladas como perigosos. A destinação desses resíduos é diversa, como incineração (com ou sem recuperação de energia), reciclagem, aterros, tratamentos físico-químicos, dentre outros.

Em relação a emissão de gases de efeito estufa (*GEE*), a Indústria Metalúrgica relata que a produção de cobre é menos impactante em termos de emissão de GEE, quando comparada com siderúrgicas, refinarias e produtoras de alumínio e cimento, pois não utiliza substâncias destruidoras da camada de ozônio, como hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), clorofluorcarboneto (CFCs), halons e brometo de metilo. No entanto, há emissão de *gases tóxicos*, que são controlados pela empresa, buscando minimizar seus efeitos e atender os limites exigidos pela legislação. Ela realiza o monitoramento de emissões de material particulado (MP), metais (Pb, Cr, Cu, Sn), óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis medidos como hidrocarbonetos não metano (HCNM), além do dióxido de enxofre (SO₂) na unidade da Bahia. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, todos esses gases são prejudiciais à saúde humana, principalmente, causando problemas respiratórios, e apresentam efeitos nas mudanças climáticas globais. No ano de 2018, essa empresa foi responsável pela emissão de 7.218,67 toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e) referentes ao escopo 1 e 27.869,09 tCO₂e em relação ao escopo 2. O escopo 1 se refere a emissões diretas ligadas à queima de combustíveis para geração de energia por processos estacionários, fontes de combustão móveis e emissões fugitivas a partir do uso de extintores de incêndio e equipamentos de refrigeração e ar-condicionado, já o escopo 2 são de emissões indiretas, a partir do consumo de eletricidade adquirida pela empresa. Somando as emissões dos escopos 1 e 2, o total foi de 35.087,76 tCO₂e.

Sobre a etapa do ciclo de vida do cobre relativa à **Embalagem e Expedição**, de acordo com Santos e Alves (2015), o papelão é a embalagem mais utilizada no mundo para fazer o transporte de produtos, pois possui diversas vantagens, como ter diversos tamanhos, resistência, reciclabilidade, além de otimizar o ato de carregar e descarregar cargas. Nessa Indústria Metalúrgica, os produtos finais são armazenados em embalagens de papelão, montados sobre pallets de madeira e fixados com quatro cintas de plástico, destacando que todos os componentes da embalagem (papelão, madeira e plástico) são 100% reciclados.

No que tange ao uso de embalagem de papel/papelão, é importante abordar a produção de papel reciclado e virgem. O papel reciclado é produzido a partir do processamento de materiais recicláveis, como papel velho, jornais, revistas e caixas de papelão, também conhecidos como "aparas". O processo de produção do papel reciclado é semelhante ao do papel virgem, que é produzido a partir da celulose obtida das árvores de eucalipto. Ambos os processos envolvem a transformação da polpa de papel em folhas de papel através de prensagem e secagem. No entanto, o processo de produção do papel reciclado consome menos energia e água do que o processo de produção do papel virgem, além de gerar menos resíduos sólidos. Por esse motivo é considerada mais sustentável do que a produção de papel virgem, uma vez que utiliza recursos que já foram extraídos da natureza e reduz a necessidade de desmatar florestas para a obtenção de celulose. Além disso, o processo de reciclagem de papel também contribui

para a redução do volume de resíduos que são descartados em aterros sanitários, ajudando a prolongar a vida útil desses locais. Mas é importante destacar que também há impactos ambientais, especialmente quando os processos de coleta, triagem e reciclagem não são realizados de forma adequada (SANTOS; ALVES, 2015)

Segundo o Portal de Resíduos Sólidos (2023), para fabricação de cerca de uma tonelada de papel virgem, é necessário, aproximadamente, de 44 a 100 mil litros de água e de 5 a 7,6 mil KW de energia, além de duas toneladas de madeira, o equivalente a cerca de 15 árvores. Como resíduos da fabricação, estima-se que são gerados, aproximadamente, 18 Kg de poluentes orgânicos descartados nos efluentes e 88 Kg de resíduos sólidos, sendo que esses poluentes são compostos por fibras, breu (material insolúvel) e celulose (de difícil degradação). O papel reciclado, apesar de ainda consumir energia e água na sua fabricação, é um número muito menor. Estima-se que o volume de água cai para 2 mil litros e o consumo de energia cai para 2,5 mil KW. É uma queda significativa e demonstra a importância da reciclagem do papel, que além de consumir menos recursos, a quantidade de papel descartado como resíduo sólido também diminui, podendo o papel ser reciclado até 6 vezes. Portanto, quanto mais papel é reciclado, menos madeira precisa ser utilizada para a produção de papel e menos floresta precisa ser derrubada.

Sobre a etapa do ciclo de vida do cobre relativa ao **Uso do Produto**, considerando que os fios de cobre são fortemente utilizados no setor elétrico, os dados relacionados aos recursos consumidos e impactos ambientais foram obtidos através do Relatório de Sustentabilidade da Enel Brasil (Enel Brasil, 2022), que atua em toda a cadeia energética, incluindo geração, distribuição, transmissão e comercialização de energia elétrica, além de ser a maior empresa privada do setor elétrico brasileiro e atende quase 19 milhões de clientes residenciais, comerciais, industriais, rurais e do setor público, o que indica uma ampla presença no mercado e um papel importante na oferta de energia para diferentes setores da sociedade. Segundo tal relatório, a Enel busca eficiência e o reuso no consumo de água das suas instalações, principalmente nas plantas eólicas e solares localizadas no Nordeste do país, que sofrem com escassez de água. As usinas hidrelétricas Enel Green Power são a fio d'água, aproveitando força da correnteza dos rios para gerar energia, sem precisar estocar a água. Nas empresas de distribuição e transmissão, não há consumo de água no processo produtivo, sendo o consumo apenas para atender as necessidades dos colaboradores e, em sua maioria, são fornecidas pelas redes municipais. Em relação aos efluentes sanitários gerados pelas unidades de distribuição, esses são lançados nas redes de esgoto municipal conectadas à estação de tratamento local. Para o ano de 2021, o volume total de água captada, proveniente de águas superficiais, águas subterrâneas, águas marinhas e água comprada de terceiros, soma 82.057.689,42 ML.

A tabela 1 abaixo mostra a quantidade de *energia consumida* pela organização no ano de 2021, em que as fontes não renováveis são referentes à compra de energia térmica, compra de energia nuclear, diesel, gasolina e gás natural. Já as fontes renováveis são provenientes de energia hidroelétrica, eólica, solar, biomassa, etanol e biodiesel.

Tabela 1 – Consumo total de energia na Enel em 2021.

Consumo total de energia dentro da organização	2021 (em GJ)
Energia de fontes não renováveis	50.698.315,82
Energia de fontes renováveis	24.396.358,89
Energia consumida internamente	356.451,08
Energia vendida	346.873.880,75

Fonte: Adaptado de Enel Brasil (2022).

O total de resíduos gerados pela Enel em 2021 foi de 8.600,60 toneladas de resíduos perigosos (amianto, produtos químicos, resíduos industriais, solo e pedras, água e óleo etc) e 86.619,03 toneladas de resíduos não-perigosos (resíduos de construção e demolição, resíduos industriais, resíduos municipais com escritórios, embalagens, eletroeletrônicos e outros resíduos), totalizando 95.219,63 toneladas. Do

total, cerca de 44.565,26 t foram destinadas para reciclagem, e o restante destinado para outras disposições, como incineração, aterro e outras operações de descarte. Em relação aos GEE, o relatório também difere as emissões diretas e indiretas, sendo as indiretas proveniente da aquisição de energia, totalizando 1.913,61 tCO₂e. Já as emissões de gases de efeito estufa são distribuídas da seguinte forma (ENEL BRASIL, 2022):

1. Geração de eletricidade, calor ou vapor resultantes da queima de combustíveis em fontes estacionárias (fixas) como caldeiras, fornos e turbinas e de outros processos de combustão, como queima;
2. Transporte de materiais, produtos, resíduos, empregados e passageiros resultantes da queima de combustíveis em fontes móveis de combustão pertencentes ou controladas pela empresa, como caminhões, trens, navios, aviões, ônibus, carros;
3. Emissões fugitivas resultantes de liberações intencionais ou involuntárias, como vazamentos em juntas, lacres, embalagens e vedações de equipamentos, emissões de metano provenientes de minas de carvão e sistemas de ventilação, emissões de hidrofluorcarbonetos (HFC) - oriundas do uso de geladeiras e ar condicionados, e vazamentos de metano provenientes do transporte de gás.

O total de *emissões diretas GEE* é apresentado na tabela 2, abaixo.

Tabela 2 – Emissões diretas de gases de efeito estufa (tCO₂ equivalente).

Emissões diretas de gases de efeito estufa	2021 (em tCO ₂ e)
Geração de eletricidade, calor ou vapor (1)	137.199,45
Transportes (2)	253,59
Emissões fugitivas (3)	15,17
Total de emissões brutas de CO ₂ eq.	137.468,21

Fonte: Adaptado de Enel Brasil (2022).

Sobre a etapa do ciclo de vida do cobre relativa à **Reciclagem e Disposição Final**, foram escolhidos os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) como foco, por utilizarem a energia elétrica da etapa anterior da ACV. O aumento da geração de REEE é um dos grandes desafios ambientais da atualidade. Esses resíduos contêm diversos tipos de materiais, incluindo metais pesados, que podem ter impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana se não forem gerenciados adequadamente. Por isso, é fundamental que haja um sistema eficiente de coleta e reciclagem desses resíduos, que permita a sua destinação correta e segura. A prevenção da geração de REEE é uma abordagem essencial para reduzir o impacto ambiental desses resíduos, através de desenvolvimento de produtos mais duráveis, com menor consumo de energia e materiais, e a promoção da reutilização e reparo dos produtos (CARVALHO; XAVIER, 2014).

No entanto, um dos principais desafios da reciclagem dos REEE é a sua complexidade, pois esses resíduos contêm diversos tipos de materiais e componentes, sendo que muitos desses materiais são difíceis de separar e reciclar, o que torna o processo mais caro e demorado. Outro desafio é a falta de conscientização e informação por parte da população, que muitas vezes descarta os seus equipamentos eletrônicos de forma inadequada, misturando-os com o lixo comum ou deixando-os em locais impróprios, como terrenos baldios e margens de rios. Além disso, é importante que os fabricantes de produtos eletrônicos assumam a responsabilidade pela gestão adequada dos resíduos gerados por seus produtos, promovendo a reciclagem e o tratamento seguro desses materiais. A aplicação de medidas de prevenção e gestão adequada dos resíduos eletrônicos também pode trazer benefícios econômicos, como a redução de custos com matéria-prima virgem e energia na produção de novos produtos (CARVALHO; XAVIER, 2014).

Como mencionado anteriormente, a reciclagem de cobre pode apresentar diversas dificuldades para as empresas, principalmente, relacionado com a coleta e triagem de sucata, a contaminação, a disponibilidade de sucata, além da informalidade de catadores. Entretanto, segundo Morigi (2018), a formação de cooperativas de reciclagem tem aumentado em todo o Brasil, sendo que os catadores começaram a se organizar em cooperativas, com apoio do setor público, privado e sociedade civil. As cooperativas de reciclagem desempenham um papel fundamental na coleta e reciclagem de resíduos

sólidos, incluindo materiais que contêm cobre. Essas cooperativas são formadas por trabalhadores que muitas vezes são de camadas mais vulneráveis da sociedade. Ao coletar, receber, separar, processar, embalar e retornar os itens aos ciclos produtivos, as cooperativas de reciclagem contribuem para a redução do volume de resíduos sólidos que são destinados a aterros sanitários e lixões, além de promover a recuperação de matérias-primas e a geração de emprego e renda.

No entanto, segundo a Cartilha ‘Reciclagem Consciente’, divulgada pela ABCOBRE - Associação Brasileira do Cobre (2016), a sucata de fios e cabos de cobre é comumente recuperada através de queimas a céu aberto, realizada em pequenas instalações e sem medição das emissões de poluentes atmosféricos. Geralmente, a queima é realizada em tambores abertos ou terrenos a céu aberto, onde não se faz nenhum controle de temperatura ou adição de oxigênio para alcançar a combustão completa dos componentes plásticos. O objetivo da queima é realizar a separação do cobre do material de revestimento do fio/cabo, sendo mais comum o plástico. A queima a céu aberto de resíduos, incluindo plásticos que contêm cloro, óleo e outros materiais, pode liberar uma variedade de substâncias químicas perigosas na atmosfera, incluindo dioxinas e furanos, que são altamente tóxicos e podem ter efeitos negativos na saúde humana e no meio ambiente. Além disso, é importante ressaltar que a recuperação de cobre a partir de sucata deve ser feita de maneira segura e adequada, seguindo as leis e regulamentos ambientais aplicáveis. Existem técnicas de recuperação de cobre mais seguras e eficazes, como é o caso da moagem e decapagem.

A moagem e decapagem dos cabos são consideradas técnicas preferenciais para a recuperação de cobre em comparação com a incineração em alta temperatura, pois são mais econômicas e ambientalmente seguras. Essas técnicas envolvem a remoção da capa de plástico dos cabos e a separação do cobre do plástico, sem que haja a queima do plástico, minimizando a emissão de poluentes. O processo de moagem de cabos de cobre envolve a redução dos cabos em pequenos fragmentos para separar o cobre do plástico, que pode ser feita manualmente ou por meio de equipamentos específicos. Em seguida, os cabos sem a capa de plástico são moídos em um triturador, que reduz os cabos em pequenos fragmentos; e os fragmentos de cobre e plástico são separados por meio de técnicas de separação, por exemplo, a separação por densidade. O processo de decapagem remove as camadas de isolamento de plástico do fio, que podem variar dependendo das características do fio e do equipamento utilizado. Em geral, uma máquina utiliza lâminas para cortar a camada de isolamento em toda a extensão do fio, sem danificar o metal, assim o fio é puxado através da máquina e a camada de isolamento é cortada em tiras. Em seguida, as tiras de isolamento são removidas da superfície do fio de cobre, através da utilização de ar comprimido, jatos de água, ou mesmo a vibração mecânica. Logo, a incineração em alta temperatura deve ser utilizada apenas para o tratamento de cabos que não possam ser recuperados através do corte ou da separação, em lugares com a atmosfera controlada e garantindo a combustão completa do plástico (ABCOBRE, 2016). Depois de realizada a separação, o fio de cobre pode seguir para a reciclagem ou descarte adequado.

De acordo com um estudo realizado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) (2009), em 1970, só se reciclava 30% do cobre, já no ano de 2000 a taxa de reciclagem do cobre em alguns países europeus se aproximava a 40%, incentivada pelas fortes regulamentações ambientais. No ano de sua publicação, cita que 43% das necessidades de cobre na Europa são supridas pela reciclagem. Já em nível mundial, 35% das necessidades de cobre se obtêm através de resíduos reciclados que contêm cobre, como computadores, equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos. E segundo o ICSG (2024), estima-se que 33% do uso global de cobre teve fonte do cobre reciclado em 2021.

Diante das informações apresentadas, percebe-se a importância da reciclagem do cobre para atender as demandas da sociedade atualmente, no entanto, devido a reciclagem do cobre ser complexa em termos da logística reversa, não foram encontrados dados quantitativos suficientes sobre os impactos ambientais causados nessa etapa do ciclo de vida, como consumo de água, uso de energia e emissões de resíduos (sólidos, líquidos e gasosos). As grandes empresas de reciclagem de metais da Europa e/ou Estados Unidos reciclam diversos tipos de metais, não apenas cobre. Então, nos relatórios de sustentabilidade, os dados sobre uso de energia, água, resíduos gerados e emissões de poluentes são baseados em todos os processos da empresa, levando em consideração todos os tipos de metais reciclados por eles, não sendo possível obter os dados somente sobre a reciclagem do cobre. Além disso, as empresas que reciclam e fabricam produtos em cobre não fazem produtos com material 100% reciclado, geralmente uma porcentagem do material utilizado é sucata reciclada e a outra é de matéria-prima virgem, como naquela Indústria Metalúrgica de fundição e refino de cobre. Logo, apesar de citar

a porcentagem de material reciclado versus material virgem utilizado na fabricação dos produtos, entende-se que não seria correto considerar a proporção de recursos utilizados e resíduos gerados com base nessa porcentagem.

Uma busca na base de dados *Ecoinvent* (versão 3.7.1, 2020) foi realizada para verificar se existem dados relativos à reciclagem da sucata de cobre. Foi encontrado o processo de tratamento de sucata de cobre por refino eletrolítico, que inclui o processo de coleta e manuseio da sucata, a fundição, conversão e refino do cobre para produção do cátodo, matéria-prima utilizada na fabricação dos produtos em cobre. Apesar de não englobar a fabricação dos produtos de cobre, esse foi o processo mais semelhante ao estudado neste trabalho. As informações encontradas são relativas à produção de 1 kg de cátodo e foram obtidos de uma planta de grande porte da Alemanha. Segundo a base de dados, 1,31 kg de sucata de cobre prensada resulta em 1 kg de cátodo de cobre e gera cerca de 1 m³ de água residual não poluidoras. São mencionados diversos compostos químicos liberados ao meio ambiente, contudo, não há a informação da quantidade de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais responsáveis pelo efeito estufa. Também não há dados relativos ao consumo de energia e água no processo, assim como não informa os resíduos sólidos gerados.

4.3. Fase 3 da ACV: avaliação de impactos ou avaliação dos resultados do inventário do ciclo de vida (ICV).

Depois de coletar os dados do inventário para cada fase do ciclo de vida dos fios de cobre, é apresentada a avaliação desses dados nos itens a seguir. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) são apresentadas na unidade de CO₂ equivalente, que expressa a quantidade de gases de efeito estufa em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono. Em seguida, os dados foram agrupados por etapa e somados para obter a avaliação do ciclo de vida dos fios de cobre. Por fim, a Matriz ERPA é construída com base na avaliação dos impactos.

a) Extração de materiais

Os dados considerados nessa fase do ciclo de vida do produto foram da empresa Coldeco, que produziu um total de 1.618.266 ton de material em 2021, mesmo ano em que os outros dados foram coletados. Diante disso, todos os dados foram convertidos para a base de uma tonelada de material produzido, conforme consolidado na Tabela 3, apresentada abaixo.

Tabela 3 - Quantidade total de entradas e saídas na etapa de Extração de Material e por tonelada de material produzido.

Fatores	Quantidade Total	Por tonelada de material produzido
Consumo de água (mil m ³)	183.078	0,1131
Consumo de energia (GWh)	1,453 x 1019	8,978 x 1012
Emissões de GEE (t CO ₂ eq)	4.637.446	2,87
Resíduos sólidos e líquidos gerados (ton)	159.000	0,0983

Fonte: Adaptado de Coldeco (2021).

Então, para uma tonelada de material produzido na extração, é consumida 0,1131 mil m³ de água e cerca de 8,978 x 1012 GWh em energia. Em relação às saídas, foram emitidos 2,87 tCO₂e de GEE e gerados 0,0983 toneladas em resíduos sólidos e líquidos (perigosos e não perigosos).

b) Manufatura do produto

Em relação à manufatura do produto, os dados obtidos de uma Indústria Metalúrgica são do ano de 2018 e incluem também dados da produção de outros produtos de cobre, além dos fios/cabos em cobre eletrolítico de 99,99% de pureza. Segundo o relatório, o volume de produção foi de 295,4 mil

toneladas, sendo 147 mil toneladas em produção de cobre primário e 148 mil toneladas de produtos de cobre. Destaca que 108 mil toneladas são relativas à produção de fios, vergalhões e outros, entretanto, como todos os dados são relativos à produção total da Empresa, os dados de entradas e saídas calculados por tonelada de material produzidos são com base na produção total, ou seja, 295,4 mil toneladas. Os dados consolidados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade total de entradas e saídas na etapa de Manufatura do Produto e por tonelada de material produzido.

Fatores	Quantidade Total	Por tonelada de material produzido
Consumo de água (mil m ³)	3.057,75	0,0104
Consumo de energia (GWh)	407,8244	0,0014
Emissões de GEE (t CO ₂ e)	35.087,76	0,1191
Resíduos sólidos (ton)	11.851,37	0,0402
Resíduos líquidos/Efluentes (mil m ³)	2.350,00	0,008

Fonte: Adaptado de Paranapanema (2018).

Então, cerca de uma tonelada material manufaturado consome cerca de 0,0104 mil m³ de água e 0,0014 GWh em energia. Em relação às saídas, foram emitidos 0,1191 tCO₂e de GEE, gerados 0,0402 toneladas em resíduos sólidos e 0,0080 mil m³ em resíduos líquidos (efluentes).

c) Embalagem e expedição

Em relação ao processo de embalagem, não foi possível encontrar a informação referente à quantidade de embalagem utilizada para expedição do volume total de produtos manufaturados na Indústria Metalúrgica, pois não foi possível identificar a quantidade de embalagem necessária para uma tonelada de produto. Portanto, aqui são considerados os dados obtidos do Portal de Resíduos Sólidos (2023) para uma tonelada de papelão reciclado, principal material utilizado para embalar os fios de cobre. Os dados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantidade total de entradas e saídas na etapa de Embalagem do produto para uma tonelada de papelão reciclado.

Fatores	Quantidade Total
Consumo de água (m ³)	2
Consumo de energia (kW)	2500
Emissões de GEE (t CO ₂ e)	Não informado
Resíduos sólidos (kg)	88
Resíduos líquidos/Efluentes (kg)	18

Fonte: Adaptado de Portal de Resíduos Sólidos (2023).

d) Uso do produto

Assim como no item anterior, não foi possível obter as informações referentes aos recursos consumidos e resíduos gerados no uso de uma tonelada de fios de cobre, no entanto, entende-se que a Enel é uma grande empresa do setor elétrico, em que os fios de cobre são fortemente utilizados. Os dados são apresentados na Tabela 6 referentes ao ano.

Tabela 6 - Quantidade total de entradas e saídas na etapa de uso do produto.

Fatores	Quantidade Total
Consumo de água (mil m ³)	82.057,69
Consumo de energia (GWh)	1,1731 x 10 ⁵
Emissões de GEE (t CO ₂ e)	139.381,82
Resíduos sólido e líquido gerados (ton)	95.219,63

Fonte: Adaptado de Enel Brasil (2022).

e) Reciclagem e disposição final

Devido à complexidade na reciclagem do cobre em termos da logística reversa, não foram encontrados dados quantitativos consolidados sobre os impactos ambientais causados nessa etapa do ciclo de vida, como consumo de água, uso de energia e emissões de resíduos (sólidos, líquidos e gasosos). Diferente das etapas de produção e uso, nesse caso, não foi encontrada uma empresa de grande porte que realiza a coleta, preparação e separação da sucata de cobre para voltar ao processo produtivo na indústria de cobre. As grandes empresas de reciclagem de metais da Europa e/ou Estados Unidos reciclam diversos tipos de metais, não apenas cobre. Então, nos relatórios de sustentabilidade, os dados sobre uso de energia, água, resíduos gerados e emissões de poluentes são baseados em todos os processos da empresa, levando em consideração todos os tipos de metais reciclados por eles, não sendo possível obter os dados somente sobre a reciclagem do cobre. Além disso, as empresas que reciclam e fabricam produtos em cobre não fazem produtos com material 100% reciclado, utilizando uma parte de matéria-prima virgem. Logo, apesar de citar a porcentagem de material reciclado *versus* material virgem utilizado na fabricação dos produtos, entende-se que não seria correto considerar a proporção de recursos utilizados e resíduos gerados com base nessa porcentagem.

Uma busca na base de dados *Ecoinvent* (versão 3.7.1, 2020) foi realizada para verificar se existem dados relativos à reciclagem da sucata de cobre. No entanto, apesar de ter algumas informações, entende-se que os dados não são suficientes para análise e não serão considerados, sendo essa uma limitação da pesquisa, conforme já mencionado anteriormente.

f) Matriz ERPA do Cobre

Com base nas informações obtidas no inventário de ciclo de vida e avaliação dos impactos do ciclo de vida, foi construída a Matriz ERPA, mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 - Matriz ERPA do cobre preenchida.

ESTÁGIO DO CICLO DE VIDA	PREOCUPAÇÕES AMBIENTAIS					Total
	Consumo de água	Uso de Energia	Resíduos Sólidos	Resíduos Líquidos	Resíduos Gasosos	
Extração de materiais	1	0	1	1	0	3
Manufatura do produto	3	3	3	4	3	16
Embalagem e expedição	4	4	4	4	NA	16
Uso do produto	2	1	2	2	2	9
Reciclagem e disposição final	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Total	10	8	10	11	5	44

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Lembrando que não foi possível obter todos os dados necessários das preocupações nos cinco estágios do ciclo de vida para uma tonelada de fios de cobre, conforme estabelecido na unidade funcional. Diante disso, a construção da Matriz ERPA considerou os dados por tonelada de material produzido, quando possível, para comparação e atribuição da nota de impacto. Já nos casos em que não há os dados por tonelada de material produzido, foram considerados os dados totais. Portanto, os valores atribuídos para cada célula da matriz ERPA foram obtidos de maneira lógica, em que aqueles em que estão com NA, significa que não é aplicável devido à falta de dados. Lembrando que o método de ACV simplificado não substitui uma ACV completa, mas é uma ferramenta relevante para corporações identificarem onde estão os maiores impactos ambientais no ciclo do seu produto.

4.4. Fase 4 da ACV: interpretação dos resultados.

A tabela 7 consiste na matriz ERPA da ACV do cobre. Lembrando que 0 significa impacto significativo e 4 nenhum impacto ou desprezível, sendo os valores 1, 2 e 3 intermediários na escala. Como não foi possível atribuir as notas para a etapa de reciclagem e disposição final, considera-se que a nota máxima é de 80 pontos. A soma total dos valores resultou em uma nota final de 44 pontos, que apesar de estar levemente acima da nota média (40 pontos), significa uma situação preocupante em termos de impactos ambientais.

Como não foi possível obter os dados da etapa de reciclagem e disposição final, a falta de dados impacta de forma significativa na nota total, concluindo mesmo assim uma situação preocupante em relação ao ciclo de vida do cobre. Em uma análise das etapas do ciclo de vida do cobre, quando se comparam as notas das preocupações ambientais das etapas de extração, manufatura e uso, a etapa de embalagem é bem menos significativa. Sobre a etapa de reciclagem e disposição final, são necessários estudos mais aprofundados em torno dos dados de entradas e saídas (aspectos e impactos ambientais) para mensurar a criticidade dos impactos ambientais associados a essa etapa do ciclo de vida do cobre.

Conclui-se que a extração de materiais (mineração) é a que apresenta maior impacto ao meio ambiente, principalmente no consumo de energia e emissão de gases de efeito estufa (GEE, resíduos gasosos). Depois da extração, o estágio de uso dos fios de cobre são a segunda etapa de maior impacto, seguido da manufatura e, por último, o processo de embalagem, cujos valores são bem menos significativos quando comparado com as demais fases.

Em uma análise das preocupações ambientais refletidas nos aspectos e impactos ambientais, as maiores preocupações ambientais são os GEE, seguidos pelo uso de energia, geração de resíduos sólidos, uso da água e geração de resíduos líquidos. No entanto, a inserção dos dados dos aspectos e impactos ambientais da etapa de Reciclagem e Disposição Final pode alterar tais resultados e, principalmente, a soma dos valores atribuídos em cada célula, resultando em uma responsabilidade ambiental total (RTA) maior, isto é, uma maior gravidade dos impactos ambientais gerados pelo ciclo de vida do cobre.

5. Considerações Finais.

O objetivo deste artigo foi realizar a ACV de produto que contém cobre (fio trefilado de cobre eletrolítico com 99,99% de pureza) para identificar a gravidade dos aspectos e impactos ambientais potenciais gerados ao longo do ciclo de vida do cobre, desde a sua extração pela mineração, sua industrialização por metalúrgica, a embalagem por meio de papelão, o uso por empresa de geração e distribuição de energia elétrica e a reciclagem do metal. Foram levantados aspectos e impactos ambientais por meio de dados secundários de fontes de empresas e instituições que representam cada fase do ciclo de vida do cobre: a) na etapa de extração de materiais/mineração, foram utilizados dados da mineradora Coldeco (2021), que é maior empresa de mineração de cobre do Chile; b) na etapa de manufatura do produto, foram utilizados dados da empresa Paranapanema (2018), representativa no setor e que é uma metalúrgica de fundição e refino de cobre primário até chegar no fio de cobre; c) na etapa de embalagem e expedição, foram utilizados dados sobre a embalagem de papelão por meio da instituição Portal de Resíduos Sólidos (2023); d) na etapa de uso do produto, dados Enel Brasil (2022), que é uma empresa multinacional do setor de geração, distribuição, transmissão e comercialização de energia elétrica; e) na etapa de reciclagem e disposição final, não foram considerados os dados desta

etapa em função das dificuldades apresentadas em obter dados consolidados e robustos referentes à reciclagem do cobre.

Observou-se que o ciclo do cobre é preocupante quando se trata de aspectos e impactos ambientais. A matriz ERPA da ACV do cobre resultou na pontuação 44 e foi usada como referência a nota máxima de 80 pontos, por desconsiderar a etapa de Reciclagem de Disposição Final. Apesar de estar levemente acima da nota média (40 pontos), o ciclo de vida do cobre apresenta gravidade e responsabilidade ambiental total (RTA) consideráveis. A gravidade dos aspectos e impactos ambientais pode ser aumentada ao incluir dados da reciclagem do cobre, cuja etapa possui processos que usam recursos naturais e geram outros resíduos.

As etapas do ciclo de vida do cobre com maior gravidade nas preocupações ambientais foram: em primeira posição do ranking, a etapa da mineração para extração do metal; em segunda posição, encontra-se a etapa de uso dos fios de cobre; em terceira posição, a etapa da manufatura; em quarta posição, etapa da embalagem. Sobre as preocupações ambientais refletidas pelos aspectos e impactos ambientais mais significativos, o ranking é formado pelos GEE, seguidos pelo uso de energia, geração de resíduos sólidos, uso da água e geração de resíduos líquidos, nesta ordem. No entanto, a inserção dos dados dos aspectos e impactos ambientais da etapa de Reciclagem e Disposição Final pode alterar tais resultados, o ranking das etapas do ciclo de vida com mais impactos ambientais e o ranking das próprias preocupações ambientais.

Dada a necessidade da diminuição dos impactos ambientais do ciclo do cobre em especial da fase de mineração (primeira posição no ranking das etapas mais impactantes) e dado o déficit da oferta em relação à demanda por cobre em nível mundial (Hinojosa Franco, 2023; Cordova Nuñez; Romero Tello; Tapia Gutierrez, 2024; Díaz, 2025), aponta-se a necessidade do estímulo e maior desenvolvimento da Logística Reversa de produtos que contêm cobre para a reinserção deste metal nos ciclos de vida de produtos, por meio de estratégias de reuso, remanufatura e reciclagem. A alta reciclabilidade ou potencial de reciclagem do cobre é reconhecida apesar da atual baixa porcentagem de uso do cobre reciclado diante do uso global do cobre (estimativa de cerca de 32% - ICSG (2024)). Tal porcentagem poderia ser aumentada na medida em que as dificuldades técnicas e logísticas forem sanadas e as incertezas de tempo, qualidade e quantidade do cobre retornado forem diminuídas por meio da adoção de tecnologias da 4ª Revolução Industrial para a integração de dados e informações e, assim, a rastreabilidade dos retornos.

O cobre é um dos poucos materiais que não se degradam ou perdem suas propriedades químicas ou físicas no processo de reciclagem, sendo que ICSG (2025) salientaram a importância do reuso e reciclagem do cobre para atender à demanda e à sustentabilidade. Se a reciclagem for gerenciada adequadamente, pode estender o ciclo de vida do material, diminuindo a necessidade da mineração e minimizando o uso de recursos (como energia) e os resíduos gerados. Através da Logística Reversa e suas estratégias de reuso e reciclagem, é possível fechar as cadeias de suprimentos, aumentar a produtividade geral dos recursos e permitir a transição da sociedade para padrões de produção e consumo mais sustentáveis.

Apesar de haver aumento na quantidade de sucata de cobre disponível devido à sua variada aplicação em diversos produtos, ainda é necessário colocar em prática as estratégias para que essa sucata chegue nas empresas recicladoras e seja aproveitada de maneira eficiente. Algumas medidas podem aumentar significativamente a disponibilidade de cobre reciclado e reduzir a dependência do cobre primário proveniente da mineração, contribuindo para a sustentabilidade e a conservação de recursos naturais.

Para incentivar a Logística Reversa e suas revalorizações dos retornos por meio de reuso, remanufatura e reciclagem, algumas iniciativas podem ser adotadas para que aumente a oferta/disponibilidade de sucata e cobre reciclado. Esforços de Educação Ambiental podem aumentar a conscientização da população e empresa para realizarem o retorno de produtos ou peças que contenham cobre em suas composições, inclusive dando visibilidade e informando sobre a rede reversa, ou seja, em qual ponto ou local devem ser levados tais resíduos. Instrumentos econômicos (como multas e taxas ou até incentivos econômicos para consumidores finais e empresas da cadeia) podem ser realizados pelo governo para estimular tais retornos e tornar a reciclagem mais atrativa.

Através da colaboração entre diferentes setores, como governo, indústria, instituições de pesquisa e ONGs, programas conjuntos de reuso, remanufatura e reciclagem podem ser desenvolvidos, facilitando o compartilhamento de melhores práticas e investimentos em tecnologias mais eficientes. O

investimento na infraestrutura de reciclagem é importante para facilitar e aumentar a capacidade de processamento de sucata de cobre, além da necessidade de criação e modernização de centros de reciclagem para se tornarem mais bem equipados, com tecnologias avançadas de separação e refino.

Importante mencionar as limitações de pesquisa e os direcionamentos para pesquisas futuras. A primeira limitação é inerente ao método da ACV, que permite prever os potenciais impactos ambientais futuros, mas não é capaz de afirmar com precisão os impactos reais que podem ser causados. E também, o estudo da ACV se limita a impactos ambientais relacionados aos objetivos e escopo definidos inicialmente, assim pode não abranger todos os impactos ambientais do produto (ISO 14040, 2009), sendo que há inúmeros produtos que contêm cobre em suas constituições e que não foram considerados.

Entretanto, como reforça Souza, Sanches, Ometto e Pacca (2010), a ACV é uma ferramenta analítica utilizada para estudar as cargas ambientais associadas aos diversos estágios de um sistema de produto, pelo levantamento, quantificação da energia e dos materiais necessários (entradas), e dos produtos, resíduos e emissões liberados ao meio ambiente (saídas), permitindo ao tomador de decisão escolher uma alternativa considerando seus aspectos técnicos e seu desempenho ambiental, além de auxiliar na identificação de oportunidades de melhoria no ciclo de vida em estudo. Este artigo que realizou a ACV do cobre resultou na identificação das fases mais críticas do ciclo de vida do cobre e, assim, das suas oportunidades de melhoria.

A segunda limitação foi a desconsideração da etapa de Reciclagem e Disposição Final do cobre devido à falta de dados consolidados e robustos somente sobre este metal. Provavelmente, esta fase também tenha carga ambiental significativa, por envolver processo industrial, e o ranking das fases mais poluentes do ciclo de vida do cobre poderia ter sido alterado. A maior dificuldade foi encontrar dados desta etapa, pois mesmo as grandes empresas recicladoras de metais da Europa e/ou Estados Unidos têm seus relatórios baseados em todos os processos da empresa e levam em consideração todos os tipos de metais reciclados por eles, não sendo possível obter os dados quantitativos somente da reciclagem do cobre. Além disso, as empresas que reciclam e fabricam produtos em cobre não fazem produtos com material 100% reciclado: geralmente, uma porcentagem do material é sucata reciclada e a outra é matéria-prima virgem, como na empresa metalúrgica de fundição e refino do cobre Paranapanema. Logo, apesar de citar a porcentagem de material reciclado versus material virgem utilizado na fabricação dos produtos, entende-se que não seria correto considerar a proporção de recursos utilizados e resíduos gerados com base nessa porcentagem. As informações obtidas através do banco de dados Ecoinvent também não foram suficientes para realização da análise. Portanto, é necessária a realização de estudos mais aprofundados em torno dos dados para mensurar a criticidade dos impactos ambientais associados à etapa de reciclagem do cobre.

Outra limitação se refere à fase de embalagem e expedição, que se concentrou somente na embalagem de papelão e desconsiderou as atividades de transporte, sendo que pesquisas futuras devem incluir demais materiais de embalagens e os impactos causados pelo transporte dos produtos até o cliente e também o transporte entre as fases do ciclo de vida.

Outra limitação da pesquisa envolve a coleta de dados: todos os dados secundários mencionados durante o artigo são dados já estimados, calculados e/ou medidos pelas respectivas empresas/instituições, logo, não foi verificada a legitimidade de tais dados. Além disso, os dados sobre a realidade de certas empresas limitam a generalização dos resultados desta ACV. Entretanto, buscaram-se empresas e instituições representativas de cada setor referente às etapas do ciclo de vida do fio de cobre trefilado: mineradora Coldeco do Chile (Coldeco, 2021); empresa metalúrgica Paranapanema (2018) (26ª posição em receita no Ranking da Revista Exame (2025a)); Portal de Resíduos Sólidos (2023) referente à embalagem de papelão; etapa de uso do fio de cobre pela empresa Enel Brasil (2022), sendo representativa por atuar em várias fases da geração de energia (geração, distribuição, transmissão e comercialização de energia elétrica) e por utilizar fontes renováveis (eólica, solar e hídrica) e ocupar a 7ª posição em receita no setor de energia no ranking geral da Revista Exame (2025b).

No entanto, os resultados desta ACV evidenciaram as etapas do ciclo de vida mais críticas com maiores cargas ambientais. Pesquisas futuras podem expandir o inventário de dados sobre aspectos ambientais (mais dados secundários ou até dados primários de medição *in loco* e/ou de cálculo) e realizar estudos mais aprofundados sobre os impactos ambientais potenciais (determinando categorias e modelos de referência para realizar a associação entre aspectos e impactos ambientais e realizar a quantificação dos próprios impactos ambientais) e comparar com os resultados da ACV alcançados por este artigo.

Pesquisas futuras devem incluir dados sobre a etapa de Reciclagem do cobre, expandir a etapa de Embalagem e Expedição (incluir mais materiais de embalagens e os transportes até o cliente e entre as fases do ciclo de vida) e ainda podem incluir mais produtos cuja composição contenha cobre e comparar com outros metais para verificar quais produtos são mais impactantes ao meio ambiente.

Referências.

ABCOBRE - Associação Brasileira do Cobre. **Cartilha ‘Reciclagem Consciente’**. 16 p. São Paulo, 2016. Disponível em: <https://abcobre.org.br/cartilha-reciclagem-consciente/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

ABNT. **NBR ISO 14040:2009**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009, 21p.

ABNT. **NBR ISO 14044:2009**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009, 46p.

ASSUMPÇÃO, Jairo José; CAMPOS, Lucila de Souza. Gestão da Cadeia de Suprimentos Verde (GSCM): o estado-da-arte a partir da revisão de literatura de Srivastava. **XVI ENGEMA**, São Paulo, 2014, 17 p. Disponível em: <https://www.engema.org.br/XVIENGEMA/160.pdf>.

BARBIERI, J.C; CAJAZEIRA, J. E. R; BRANCHINI, O. Cadeia de suprimento e avaliação do ciclo de vida do produto: revisão teórica e exemplo de aplicação. **O Papel**, v. 70, n. 09, pg. 52-72 – setembro, 2009.

BARBIERI, José Carlos. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. 4. Ed. – São Paulo: Saraiva, 2016. 312 p.

BEAMON, B. M. *Designing the green supply chain*. **Logistics Information Management**, v. 12, n. 4, 1999.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (Brasil), **Indústria do Cobre**, 1997. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15688/1/Ind%C3%BAstria%20do%20cobre_P_BD.pdf. Acesso em 23 de Abr. 2023.

CARVALHO, C. M. B. de; XAVIER, L. H. **Gestão de resíduos eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

CEPAL (Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe)/ONU. **América Latina y el Caribe ante la pandemia del COVID-19: Efectos económicos y sociales**. 2020. Disponível em: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/82414c93-33bf-4a64-af1eb26e28e1437e/content>. Acesso em: 30 jun. 2025.

CORDOVA NUÑEZ, Alvaro Daniel; ROMERO TELLO, Maria Fernanda; TAPIA GUTIERREZ, Marco Antonio Salvattore. Los Efectos de la Demanda Agregada de China sobre las Exportaciones Peruanas de Cobre, en el período 2004-2019. **Trabalho de conclusão de curso de licenciatura em Economia e Negócios Internacionais**. UNIVERSIDAD ESAN, FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y ADMINISTRATIVAS, ECONOMÍA Y NEGOCIOS INTERNACIONALES. Outubro de 2024. Disponível em: <https://repositorio.esan.edu.pe/server/api/core/bitstreams/7301638f-4e84-4098-ae0b-5d7ddd08cf15/content>. Acesso em: 30 jun. 2025.

Corporación Nacional del Cobre de Chile (Coldeco). **Reporte de Sustentabilidad 2021**, Santiago, 2021. Disponível em: https://www.codelco.com/memoria2021/site/docs/20220219/20220219165716/reporte_sustentabilidad_codelco_2021__1_.pdf. Acesso em: 23 Abr. 2023.

DÍAZ, Gabriel Ríos. Cobre. **Panorama global de los mercados de cobre. El rol clave de América del Sur y el potencial de la minería cuprífera Argentina**. Dirección Nacional de Promoción y Economía Minera, Subsecretaría de Desarrollo Minero, Secretaría de Minería. Gobierno da Argentina. Março de 2025. Disponível em: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_cobre_2.pdf. Acesso em: 30 jun. 2025.

ENEL BRASIL. **Relatório Anual de Sustentabilidade 2021**. 170 p., 2022. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Sustentabilidade/relatorios-anuais.html>. Acesso em: 23 abr. 2023.

FERREIRA, Hélio. Aplicação metodologia de avaliação do ciclo de vida na produção de polpa de concentrado de minério de ferro. 2014. 125 f. **Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade)** – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3508>.

FREITAS, Felipe Tomaz; MARCHESINI, Márcia Maria Penteado. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos. **PRODUTO & PRODUÇÃO**, vol. 23, n.3, p. 1-20. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.22456/1983-8026.121904>

GRAEDEL, T.E., ALLENBY, B.R. **Industrial Ecology**, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, Inc., 1995.

HINOJOSA FRANCO, Antoni Willian. ANÁLISIS DE MERCADO PARA LA VIABILIDAD DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO DE COBRE, QUE PERMITA PROCESAR MINERALES CUPRÍFEROS PROVENIENTES DE LA MAPE – TACNA. **Tese de Doutorado. UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN, Escuela de Posgrado, MAESTRÍA EN PROYECTOS DE INVERSIÓN**, Peru, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unjbg.edu.pe/server/api/core/bitstreams/51d6b934-d142-4b46-860a-d901f6f92105/content>. Acesso em 30 jun. 2025.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **2º Inventário de Gases de Efeito Estufa do Setor Mineral**. 112 p. Brasília, 2014. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/00005153.pdf>.

INTERNATIONAL COPPER STUDY GROUP (ICSG). **The World Copper Factbook 2024**, 68 p. Lisbon, 2024. Disponível em: <https://icsg.org/copper-factbook/>. Acesso em 20 jun. 2025.

INTERNATIONAL COPPER STUDY GROUP (ICSG). **A organização. A Reciclagem do cobre**. 2025. Disponível em: <https://icsg.org/>. Acesso em 02 jul. 2025.

LINS, Luiz dos S. **Introdução à Gestão Ambiental Empresarial: Abordando Economia, Direito, Contabilidade e Auditoria**. Grupo GEN, 2015. 9788597001082. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597001082/>. Acesso em: 21 mar. 2022.

LINTON, J. D.; KLASSEN, R.; JAYARAMAN, V. *Sustainable supply chains: an introduction*. **Journal of Operations Management**, v. 25, 2007.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de Caso na Engenharia de Produção: Estruturação e Recomendações para sua Condução. **Revista Produção**. V. 17, n. 1, p. 16-229, jan./abr. 2007.

Ministério de Minas e Energia - MME. Estudo da Reciclagem de Metais no País. 168 p., São Paulo. nov. 2009. Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/450079/P57_RT83_Reciclagem_de_Metais_no_Paxs.pdf/2c11b09c-fa95-cf3d-2699-5a2efc59cb5b?version=1.0. Acesso em 24 abr. 2023.

MORIGI, J. de B. A Importância das Cooperativas de Reciclagem na Consolidação dos Canais Reversos de Resíduos Eletroeletrônicos: Um Estudo Sobre Uma Cooperativa de Reciclagem Localizada em Maringá-PR. **Perspectivas Contemporâneas**, v. 13, n. 1, p. 135–154, 2018. Disponível em: <https://revista2.grupointegrado.br/revista/index.php/perspectivascontemporaneas/article/view/2575>.

OMETTO, Aldo Roberto; SAAVEDRA, Yovana M. B. Gestão e Engenharia do Ciclo de Vida: conceitos e aplicações no contexto legal e empresarial brasileiro. In: Ometto, Aldo Roberto; Peres, Renata Bovo; Saavedra, Yovana M. B. (organizadores). **Ecoinovação para a Melhoria Ambiental de Produtos e Serviços – experiências espanholas e brasileiras nos setores industrial urbano e agrícola**. São Carlos: Diagrama Editorial, 2012, 196p, capítulo 2.

Paranapanema (metalúrgica). **Relatório de Sustentabilidade da empresa Paranapanema de 2018**. Disponível em: <https://ri.paranapanema.com.br/perfil/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 23 abr. 2023.

PEREIRA, Sibeli Warmling. Análise ambiental do processo produtivo de pisos cerâmicos: aplicação de avaliação do ciclo de vida. 2004. 121 p. **Dissertação (Mestrado)** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis., 2004. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87886>.

Portal de Resíduos Sólidos. Reciclagem de Papel. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-papel-2/>. Acesso em 23 abril. 2023.

REVISTA EXAME (2025a). **Ranking das Melhores e Maiores Empresas de 2025 no setor de Siderurgia, Mineração e Metalurgia**, com dados referentes a 2024. Disponível em: <https://exame.com/mm/melhores/?ano=2024§or=siderurgia%2c+minera%2c+a7%2c+a3o+e+metalurgia&pagina=4>. Acesso em 26 jun. 2025.

REVISTA EXAME (2025b). **Ranking das Melhores e Maiores Empresas de 2025 no setor de Energia**, com dados referentes a 2024. Disponível em: <https://exame.com/mm/melhores/?ano=2024§or=energia&pagina=11>. Acesso em 26 jun. 2025.

ROCIO, Marco Aurélio Ramalho et al. Perspectivas atuais da indústria de cobre no Brasil. **BNDES Setorial**, n. 36, p. 397-428 set. 2012. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1481/1/A%20Set.36_Perspectivas%20atuais%20da%20ind%2c%20bateria%20de%20cobre_P.pdf.

RODRIGUES, Mônica Aparecida, SILVA, Priscila Pereira, GERRA, Wendell. Cobre. **Revista Química Nova na Escola**, Minas Gerais, Vol. 34, Nº 3, p. 161-162, agosto, 2012. Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc34_3/10-EQ-37-10.pdf.

SANTOS, G.P; ALVES, D. F.: A cadeia do papel/papelão comum e o reciclado: uma análise comparativa na indústria de embalagens. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP**, 2010, São Carlos-SP. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_121_788_15572.pdf.

SEURING, S.; MÜLLER, M. *From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management*. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, 2008.

SILVA, Abel Garcia Gonçalves da. Cadeia Produtiva do Cobre. **Monografia da Escola de Engenharia da UFMG**, Belo Horizonte, 89 p., março, 2011.

SILVA, Diogo A. Lopes et al. *Life Cycle Assessment in automotive sector: A case study for engine valves towards cleaner production*. **Journal of Cleaner Production**. Oxford: Elsevier Sci Ltd, v. 184, p. 286-300, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/160246>. Acesso em: 29 mar. 2023.

SOUZA, Sabrina Rodrigues; SANCHES, Roberta; OMETTO, Aldo Roberto; Pacca, Sergio Almeida. A utilização da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gestão ambiental: modelos de aplicação. **Revista INGEPRO – Inovação, Gestão e Produção**, Junho de 2010, vol. 02, no. 06, ISSN 1984-6193.

UNEP (*United Nations Environment Programme*); SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*). *Life Cycle Management: how business uses it to decrease footprint, create opportunities and make value chains more sustainable*, 2010.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2ª edição, 2001, 205p.