



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



i

AURÉLIO SERATO ARAÚJO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
APLICAÇÃO NA MINERAÇÃO DO OURO

UBERLÂNDIA

2023

AURÉLIO SERATO ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
APLICAÇÃO NA MINERAÇÃO DO OURO**

Projeto de Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dra. Miria Hespanhol
Miranda Reis

UBERLÂNDIA

2023

AURÉLIO SERATO ARAÚJO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
APLICAÇÃO NA MINERAÇÃO DO OURO

Projeto de Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química

Uberlândia, 28 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Miria Hespanhol Miranda Reis – Doutora (ICP)

Rubens Gedraite – Doutor (USP)

Kristopher Rodrigues Dorneles – Mestrando (UFU)

Warlen Agnelo Dias – Mestrando (UFU)

A todos os meus familiares, com ênfase em minha mãe, Juliana Pereira Serato, que nunca deixou de acreditar e confiar em meu potencial, me mostrando as verdades da vida com muita ternura e amor.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram em todos os momentos de dificuldade, luta e glória, aos quais me ensinaram que o companheirismo e fidelidade engrandecem o ser humano que reside em nós.

Aos meus queridos professores e professoras que me auxiliaram nessa jornada do conhecimento, principalmente a minha incrível orientadora Miria Hespanhol, que teve o carinho de me acompanhar em mares desconhecidos com muita calma e paciência, fico eternamente grato por seu suporte e atenção.

RESUMO

Este documento tem como objetivo expor o impacto ambiental das indústrias de mineração e processamento mineral, utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta, na qual propõem técnicas com metodologia que permite uma melhor compreensão dos problemas e propõem soluções sustentáveis. As áreas de urgência para melhoria indicam onde devem ser direcionados os esforços das indústrias de mineração e processamento mineral para obter um futuro sustentável. O uso de equipamentos pesados que consomem uma grande quantidade de energia elétrica, mecânica e calor afetam de forma crucial o ecossistema, os recursos naturais, o aquecimento global e a saúde humana. Com o uso das técnicas da ACV, tem-se uma perspectiva de quais os objetos de estudos geram maior impacto e quais as mudanças necessárias para tornar o sistema mais sustentável. Os impactos fora da mina foram predominantemente encontrados nos processos fora do local da mina, nos três indicadores finais: saúde humana, qualidade do ecossistema e esgotamento de recursos. A integração de energias renováveis no setor de processamento mineral e o aquecimento de processos com fontes de energia verde são áreas emergentes de pesquisa que podem permitir soluções.

Palavras-chave: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA, ACV, MINERAÇÃO, OURO, IMPACTOS AMBIENTAIS

ABSTRACT

This document aims to expose the environmental impact of mining and mineral processing industries using Life Cycle Assessment (LCA) as a tool, in which they propose techniques and methodology that allow a better understanding of the problems and propose sustainable solutions. The areas of urgency for improvement indicate where the efforts of mining and mineral processing industries should be directed to achieve a sustainable future. The use of heavy equipment that consumes a significant amount of electrical, mechanical, and heat energy crucially affects the ecosystem, natural resources, global warming, and human health. By using LCA techniques, we gain insight into which study objects generate the greatest impact and what changes are necessary to make the system more sustainable. Off-mine impacts were predominantly found in off-site processes across the three final indicators: human health, ecosystem quality and resource depletion. The integration of renewable energies in the mineral processing sector and the heating of processes using green energy sources are emerging areas of research that can enable solutions.

Keywords: LIFE CYCLE ASSESSMENT, LCA, MINING, GOLD, ENVIRONMENTAL IMPACTS

RESUMEN

Este documento pretende exponer el impacto ambiental de las industrias de minería y procesamiento de minerales utilizando la Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) como herramienta, en el que proponen técnicas con metodología que permiten una mejor comprensión de los problemas y proponen soluciones sostenibles. Las áreas de urgencia para la mejora indican hacia dónde deben dirigirse los esfuerzos de las industrias de minería y procesamiento de minerales para lograr un futuro sostenible. El uso de equipos pesados que consumen una cantidad significativa de energía eléctrica, mecánica y térmica afecta de manera crucial el ecosistema, los recursos naturales, el calentamiento global y la salud humana. Mediante el uso de técnicas de ECV, obtenemos información sobre qué objetos de estudio generan el mayor impacto y qué cambios son necesarios para hacer que el sistema sea más sostenible. Los impactos fuera de la mina se encontraron predominantemente en los procesos fuera del sitio en los tres indicadores finales: salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de los recursos. La integración de energías renovables en el sector de procesamiento de minerales y el calentamiento de procesos mediante fuentes de energía verde son áreas emergentes de investigación que pueden permitir soluciones.

Keywords: EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA, ECV, MINERÍA, ORO, IMPACTOS AMBIENTALES

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	4
2	METODOLOGIA.....	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	História da avaliação do ciclo de vida.....	6
3.2	Definições, mensuração e como fazer ACV	10
3.3	Mineração do ouro.....	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5	CONCLUSÃO.....	29
6	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

Há uma constante mudança, seja nos processos, forma de pensar, agir e até mesmo produzir. Observa-se, a partir da renovação regular, uma necessidade contemporânea de evolução para progressão da humanidade, todavia não se deve fazer a todo custo, forçando as engrenagens sociais, culturais e ambientais a se desgastarem de forma a se macular.

Com o foco nesses cofatores, e com a análise aprofundada nos problemas gerados no fator ambiental foram propostas diversas soluções e ferramentas as quais tendem a minimizar os problemas gerados por esse progresso tecnológico, sendo uma delas a avaliação do ciclo de vida (ACV), na qual propõem técnicas com metodologia que permite uma melhor compreensão dos problemas e propõem soluções com pegada verde.

A ACV se desenvolveu de modo rápido nos últimos 50 anos tendo em vista a necessidade dos países de conseguirem técnicas que quantificassem os impactos do consumo de produtos, como por exemplo o uso de plástico, papelão ou vidro no armazenamento de alimentos vendidos pela indústria alimentícia. (GUINÉE *et al.*, 2011)

Países como Estados Unidos, Canadá, Japão e União Europeia trabalham em prol de reduzir os impactos no meio ambiente com o uso de ferramentas de ACV. Quanto maior a procura por essa ferramenta, mais ela se expande pelos caminhos de solução de problemas. Como, análise de barulho gerado na produção de bens e serviços, mudança na biodiversidade de um ecossistema e até mesmo análise econômica de viabilidade do projeto. (GUINÉE *et al.*, 2011)

Os primeiros estudos de ACV derivam dos anos 1960, quando problemas com poluição, eficiência energética e desperdício vieram a público. Um dos primeiros estudos feitos em ACV veio do *Midwest Research Institute (MRI)*, que analisava o engarrafamento para a Coca Cola e seus impactos ambientais, porém este trabalho nunca foi publicado. (JEROEN *et al.*, 2011)

Com o aumento de pesquisas na área por volta dos anos 80 foi necessário estipular métricas para conseguir mensurar as análises, então somente no início dos anos 90 ela foi desenvolvida pela *ISO (International Organization for Standardization)* e desde então tem sido utilizada por empresas e governos para identificar e minimizar os impactos ambientais de seus produtos.

A ACV é composta por quatro etapas: planejamento, análise do inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados. Durante a etapa de planejamento, é definido o objetivo e o escopo da avaliação, selecionando-se quais etapas do ciclo de vida do produto devem ser avaliadas. Na etapa de análise do inventário, são coletados dados sobre as entradas e saídas de materiais e energia associadas a cada etapa do ciclo de vida do produto. Na etapa de avaliação dos impactos, os dados coletados na etapa anterior são usados para avaliar os impactos ambientais associados a cada etapa do ciclo de vida do produto. Por fim, na etapa de interpretação dos resultados, os impactos ambientais são interpretados e são sugeridas medidas para minimizá-los (FALUDI, 2020).

Exemplos práticos de uso da ACV incluem a avaliação do impacto ambiental de um automóvel, comparando diferentes tipos de combustíveis, ou a avaliação do impacto ambiental de uma embalagem, comparando diferentes materiais de embalagem. A ACV também é frequentemente usada para avaliar o impacto ambiental de edifícios, sistemas de transporte e sistemas industriais. A informação gerada pela ACV pode ser usada para desenvolver produtos mais sustentáveis, para informar as decisões de compra e para comunicar informações ambientais para o público em geral.

Sabendo disso pode-se analisar os impactos que, por exemplo, a mineração pode exercer no meio ambiente a fim de encontrar meios para reduzi-los. Sobre os impactos ambientais da mineração e do processamento mineral, é possível classificá-los em gerenciamento de resíduos, drenagem ácida de minas, sedimentação, deposição de metais e perda de biodiversidade. Os processos de mineração e processamento mineral geram uma quantidade significativa de resíduos, que varia de acordo com o tipo de mineral extraído e do depósito mineral em questão. A disposição desses resíduos é um

desafio considerável, pois é prejudicial para o meio ambiente aquático e para os ecossistemas. A poluição da água causada pelos resíduos da mineração provoca a drenagem ácida de minas, sedimentação e deposição de metais. A erosão resultante da pilha de rochas e o escoamento de água após chuvas aumentam ainda mais a sedimentação. A mineração muitas vezes envolve o uso intensivo de água, o que pode levar à escassez de recursos hídricos e a impactos negativos sobre as comunidades locais que dependem desses recursos para suas necessidades diárias. (FARJANA *et al.*, 2019a)

Além disso, a mineração pode levar à erosão do solo e à degradação do terreno, que pode ser exacerbada pela remoção da cobertura vegetal. A exposição do solo resultante pode levar a um aumento na quantidade de partículas em suspensão na água, o que pode afetar a qualidade da água e prejudicar a vida aquática. Outro impacto ambiental significativo da mineração é a emissão de gases de efeito estufa, que ocorre durante o processo de extração e processamento de minerais, transporte e queima de combustíveis fósseis para alimentar as máquinas e equipamentos usados na mineração. Essas emissões contribuem para o aquecimento global e mudanças climáticas, que podem ter impactos significativos em todo o planeta. (YAO *et al.*, 2020)

Portanto, é essencial que a indústria da mineração trabalhe para minimizar esses impactos ambientais, implementando práticas sustentáveis, responsáveis e adotando tecnologias inovadoras que possam ajudar a reduzir o consumo de energia, água e a quantidade de resíduos produzidos. Isso não só beneficiará o meio ambiente, mas também ajudará a garantir a saúde e segurança das comunidades locais e trabalhadores da indústria.

No contexto específico da mineração de ouro, essas considerações ganham ainda mais importância devido às características particulares desse setor. A extração de ouro muitas vezes envolve processos intensivos em termos de recursos e energia, além de apresentar desafios específicos na gestão de substâncias químicas tóxicas, como o cianeto, que é frequentemente utilizado na extração do metal precioso. Ao adotar abordagens sustentáveis a indústria do ouro pode desempenhar um papel fundamental

na mitigação dos impactos ambientais negativos historicamente associados à mineração. Ao fazer isso, não apenas preservará os ecossistemas frágeis muitas vezes afetados por essa atividade.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo apresentar os métodos de avaliação do ciclo de vida (ACV) como escopo geral, comparar o uso das técnicas da ACV no contexto da mineração com foco na mineração do ouro conforme relatado na literatura.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Revisão bibliográfica dos métodos da ACV, de modo a definir o foco da aplicação da metodologia escolhida, sendo: os impactos da mineração, a unidade funcional como uma referência quantitativa de produto para se obter comparação com diferentes alternativas, o inventário como coleta e quantificação de dados de entrada necessários para se obter o produto, a avaliação computacional-comparativa visando obtenção de vários resultados para um mesmo produto e interpretação dos resultados.
- Compreensão dos procedimentos derivados da mineração do ouro, como: criação da mina, procedimentos para começar a extração e refino, fluxo de operações da produção do ouro.
- Apresentação dos resultados obtidos através da análise dos 5 artigos definidos como amostra para este trabalho.

2 METODOLOGIA

Este estudo trata-se de uma revisão integrativa da literatura, que objetiva demonstrar, através dos estudos encontrados, a aplicação da avaliação do ciclo de vida (ACV) com foco na indústria de mineração, especificamente na extração de ouro. Os critérios de inclusão abrangem estudos nos idiomas inglês e português, publicados nos últimos 5 anos e que abordassem o tema desse estudo. Os cruzamentos entre os descritores foram realizados nas seguintes plataformas: *Google Academic*, *ScienceDirect* e *Springer Link*.

No total, foram identificados aproximadamente 40 artigos nessas plataformas. Após a aplicação rigorosa dos critérios de inclusão, uma seleção criteriosa resultou em 5 artigos que formam a amostra deste trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da leitura e análise dos materiais disponíveis encontrados na literatura que abordavam a avaliação do ciclo de vida (ACV), sua história, suas técnicas e as devidas aplicações gerais e específicas com foco na mineração do ouro, assim como, avaliação dos impactos ambientais que possibilitou a quantificação e avaliação dos impactos ambientais gerados durante a extração e processamento do minério. Além disso, a comparação de processos de extração proporcionou o conhecimento dos diferentes modos de se extrair o minério, a identificação de pontos críticos que consiste em analisar e quantificar os impactos dos pontos críticos do processo e promoveu a tomada de decisão sustentável através de informações relevantes como o uso de fonte de energia renovável.

3.1 História da avaliação do ciclo de vida

A década de 1960 foi marcada por um despertar global em relação à degradação ambiental e à crescente preocupação com a sustentabilidade. Nesse período, as atividades humanas estavam se expandindo rapidamente, impulsionadas pelo desenvolvimento industrial e tecnológico pós-Segunda Guerra Mundial. No entanto, à medida que as sociedades se tornavam cada vez mais dependentes de recursos naturais, começaram a surgir questões sobre os impactos ambientais dessas atividades e a disponibilidade limitada desses recursos. Por conta disso surgiram várias iniciativas que contribuíram para o desenvolvimento da ACV como uma abordagem sistemática de avaliação dos impactos ambientais (BJØRN *et al.*, 2018). Algumas dessas iniciativas incluem:

- Desenvolvimento do conceito de análise de fluxo de materiais: O economista Georgescu-Roegen, em seu livro "*The Entropy Law and the Economic Process*" publicado em 1971, introduziu o conceito de análise de fluxo de materiais. Esse conceito foi fundamental para o entendimento dos ciclos de materiais na economia e na natureza, fornecendo a base teórica para a ACV.
- Ecologia de sistemas: A ecologia de sistemas, desenvolvida principalmente por cientistas como Howard T. Odum, focava na análise dos sistemas ecológicos como um todo, considerando as interações entre os componentes bióticos e abióticos. Essa abordagem sistêmica influenciou o desenvolvimento da ACV, que busca avaliar o ciclo de vida de um produto considerando todos os aspectos ambientais relevantes.
- Desenvolvimento de métodos de contabilidade ambiental: Na década de 1960, houve avanços no desenvolvimento de métodos de contabilidade ambiental, como a Análise de Impacto Ambiental (*Environmental Impact Analysis*). Essas abordagens forneceram a base metodológica para a

avaliação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, que posteriormente foi incorporada à ACV.

Paralelamente ao aumento da conscientização ambiental, os avanços em ciência e tecnologia, especialmente nas áreas de química, engenharia de processos e economia ambiental, proporcionaram as bases teóricas e metodológicas necessárias para a implementação da ACV, destacando-se:

- Avanços na química analítica: A evolução da química analítica permitiu a quantificação mais precisa de substâncias químicas presentes no ambiente, tanto em termos de concentração quanto de toxicidade. Esses avanços forneceram a base para a identificação e avaliação dos impactos ambientais das substâncias ao longo do ciclo de vida.
- Desenvolvimento de técnicas de modelagem e simulação: O desenvolvimento de técnicas de modelagem e simulação, permitiram uma compreensão mais aprofundada dos fluxos de materiais e energia em sistemas produtivos. Essas técnicas foram essenciais para a quantificação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida e para a tomada de decisões informadas.
- Avanços em ciência de dados e computação: Os avanços na ciência de dados e na capacidade computacional abriram novas possibilidades para a coleta, análise e interpretação de grandes conjuntos de dados. Isso permitiu a realização de estudos mais abrangentes e detalhados sobre os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, contribuindo para o desenvolvimento da ACV como uma ferramenta robusta.

No final da década de 1960 e início da década de 1970, esses estudos pioneiros se concentraram principalmente no uso de energia e em algumas emissões relacionadas à produção e descarte de embalagens, sendo um dos primeiros feitos pela *Midwest Research Institute* (MRI) para a Coca Cola, onde a preocupação com o impacto ambiental dos materiais de embalagem e a eficiência energética despertaram o interesse por uma abordagem mais abrangente de avaliação (GUINÉE *et al.*, 2011).

No entanto, nessa fase inicial, o desenvolvimento de métodos para a ACV ocorreu de maneira não coordenada nos Estados Unidos e no Norte da Europa. Diferentes pesquisadores e instituições adotaram abordagens variadas, resultando em uma falta de concordância e padronização nos procedimentos e nas métricas utilizadas. Cada estudo de ACV era realizado de forma independente, sem uma estrutura metodológica unificada (BJØRN *et al.*, 2018).

Esses estudos iniciais eram predominantemente realizados para empresas, que os utilizavam internamente para avaliar seus próprios produtos e processos. A divulgação dos resultados e a comunicação com os interessados externos eram limitadas nessa época, com pouca conscientização pública sobre a ACV e seus benefícios potenciais.

Após um período de pouco interesse na década de 1970, as décadas de 1980 e 1990 foram marcadas por uma crescente quantidade de publicações e discussões da ACV (GUINÉE *et al.*, 2011). Houve um aumento significativo no desenvolvimento metodológico, conforme apresentado abaixo:

- Desenvolvimento de inventários de ciclo de vida que consistem em compilar dados sobre os inputs e outputs de materiais e energia em todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. A disponibilidade de inventários de ciclo de vida padronizados e abrangentes permitiu uma avaliação mais consistente e comparável dos impactos ambientais;
- Integração de impactos em categorias de avaliação que agrupam os diferentes impactos ambientais em áreas temáticas específicas. Essas categorias de avaliação permitem a agregação dos impactos em indicadores mais compreensíveis e fornecem uma base para a tomada de decisões informadas em termos de sustentabilidade.
- Adoção de abordagens de avaliação de impacto do ciclo de vida que são conjuntos de métodos e modelos usados para quantificar e avaliar os impactos ambientais identificados na ACV. Isso envolveu a definição de

fatores de caracterização, normalização e ponderação para atribuir valores numéricos aos diferentes impactos e facilitar sua comparação e agregação.

- Introdução da análise de incerteza, que, através da identificação de incertezas nos dados e nas estimativas utilizadas na ACV, permite avaliar a confiabilidade dos resultados da ACV e fornece informações sobre a variabilidade e os intervalos de incerteza associados a eles. A análise de incerteza contribui para aprimorar a robustez e a credibilidade dos resultados da ACV.

Para que esses desenvolvimentos ocorressem, a participação ativa da *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)* e da Organização Internacional para Padronização (ISO) foram de suma importância na década de 1990, impulsionando a padronização e a coordenação das atividades relacionadas à ACV (GUINÉE *et al.*, 2011).

A SETAC, por meio de suas filiais na América do Norte e na Europa, desempenhou um papel fundamental ao reunir profissionais, usuários e cientistas da ACV para colaborar na melhoria contínua e na harmonização do quadro, terminologia e metodologia da ACV. A organização foi responsável por organizar uma série de *workshops* e fóruns durante a década, criando espaços de discussão e troca de conhecimentos entre os envolvidos na ACV. Como resultado desses esforços, o "Código de Prática" da SETAC foi desenvolvido, fornecendo diretrizes e orientações para a aplicação consistente e de alta qualidade da ACV (GUINÉE *et al.*, 2011).

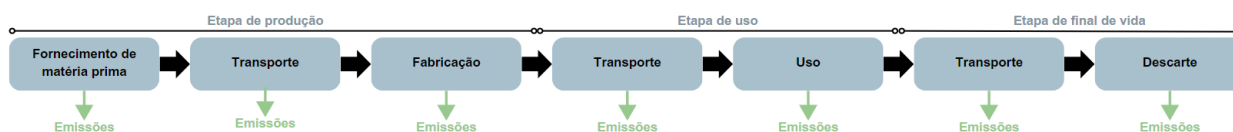
Além disso, a ISO, a partir de 1994, também desempenhou um papel importante na ACV. A ISO se envolveu na padronização dos métodos e procedimentos da ACV, adotando a tarefa formal de desenvolver normas internacionais. Duas normas-chave foram desenvolvidas nesse período: a ISO 14040, que estabelece os princípios e a estrutura da ACV, e a ISO 14044, que define os requisitos e diretrizes para a ACV. Essas normas forneceram uma base sólida e reconhecida internacionalmente para a condução da ACV e contribuíram para a sua adoção mais ampla em diversos setores.

Além dos trabalhos de padronização, a década de 1990 também testemunhou a publicação dos primeiros artigos científicos sobre ACV em várias revistas renomadas, como o *Journal of Cleaner Production*, *Resources, Conservation and Recycling*, *International Journal of LCA*, *Environmental Science & Technology*, *Journal of Industrial Ecology*, entre outras. Essas publicações científicas contribuíram para o avanço do conhecimento e a disseminação das melhores práticas em ACV, permitindo o compartilhamento de pesquisas e experiências entre os profissionais da área (GUINÉE *et al.*, 2011).

3.2 Definições, mensuração e como fazer ACV

ACV é uma metodologia amplamente reconhecida e utilizada para quantificar os impactos ambientais associados a produtos, serviços ou sistemas ao longo de todo o seu ciclo de vida. A ACV proporciona uma compreensão abrangente das implicações ambientais desde a extração de matérias-primas até a disposição final, abrangendo etapas cruciais apresentadas na Figura 3.2.1 como a transformação de matérias-primas em produtos acabados, processos de fabricação, transporte, utilização pelo consumidor, consumo de recursos como eletricidade e água, bem como as emissões resultantes, como dióxido de carbono (CO₂), partículas, poluentes hídricos e impactos na terra (FALUDI, 2020).

Figura 3. 2. 1 – Etapas do produto na ACV



Fonte: Autor

Essa abordagem sistemática da ACV visa a quantificar de maneira precisa e cientificamente fundamentada todos os aspectos relevantes ao longo do ciclo de vida de

um produto ou serviço. Embora a ACV não seja uma ciência perfeita, ela representa uma das melhores ferramentas disponíveis para a análise e avaliação ambiental.

No entanto, é importante compreender que a implementação da ACV pode variar em profundidade e especificidade, dependendo dos objetivos pretendidos. A determinação do propósito específico da ACV no início do estudo é crucial, pois permite estabelecer limites adequados e determinar o grau de detalhamento necessário. Essa definição prévia ajuda a evitar que a ACV se torne um processo interminável, oferecendo uma orientação clara sobre até que ponto se deve explorar os diferentes aspectos envolvidos (FALUDI, 2020).

Um exemplo que pode ser utilizado é a análise inicial das opções disponíveis, como a utilização de plástico ABS ou polietileno em um dado produto, a escolha de uma fonte específica de eletricidade, como energia hidrelétrica, energia nuclear ou outra fonte alternativa. Essa análise preliminar pode ser realizada de forma ágil, em poucos minutos, horas, ou em alguns casos dias, dependendo da complexidade do produto (FALUDI, 2020).

A ACV permite investigar aspectos relevantes, como se a etapa de fabricação é a de maior importância, ou se as emissões de eletricidade durante a vida útil do produto são mais significativas. Também é possível avaliar se os materiais plásticos ou os componentes eletrônicos internos têm maior influência nos impactos ambientais. Além disso, estabelecer uma linha de base, compreendendo os impactos totais do produto ou serviço, e estabelecer metas de melhoria para o futuro, como para o próximo ano ou para um período de cinco anos (FALUDI, 2020).

Faz-se necessário mencionar que a ACV pode ser mais abrangente, como a obtenção de uma certificação ambiental, a certificação de acordo com a norma ISO 14000 ou a elaboração de uma Declaração Ambiental de Produto (EPD), demandam consideravelmente mais tempo e esforço. Essas etapas podem levar de três a seis meses para serem concluídas e podem envolver custos de mão de obra de até cem mil dólares (FALUDI, 2020).

Além disso, é importante ressaltar que essas etapas mais abrangentes só podem ser realizadas na fase final do processo de projeto, quando se tem informações precisas sobre a quantidade de cada material utilizado, a distância de transporte e outros aspectos relevantes. A realização de uma ACV completa certificada demanda um comprometimento maior, mas é essencial para atender a certas exigências, obter certificações reconhecidas e fornecer informações precisas sobre o desempenho ambiental de um produto ou serviço (FALUDI, 2020).

Abordando sobre a realização de ACV, é importante considerar sua aplicação em diferentes estágios de um projeto. Durante as fases iniciais, a ACV não pode ser precisa devido à falta de dados específicos, como a quantidade exata de materiais a serem utilizados. Nesse momento, estimativas e intuições são utilizadas para limitar as opções e direcionar o projeto. Esse tipo de ACV mais rápida e simplificada é adequada para a fase inicial de projeto.

Por outro lado, para uma ACV mais detalhada, como aquelas exigidas por certificações ISO 14000, é necessário esperar até o final do ciclo de projeto do produto, quando todos os detalhes são conhecidos. Porém, é importante ressaltar que, nesse ponto, a ACV não pode mais influenciar as decisões de projeto, pois estas já foram tomadas. Logo se torna fundamental compreender que a ACV é uma ferramenta de análise retrospectiva, utilizada para avaliar o desempenho ambiental de um produto ou serviço (FALUDI, 2020).

Quanto à confiabilidade da ACV, é essencial considerar alguns aspectos. Primeiro, a quantidade de dados específicos do produto em comparação com dados médios da indústria. Quanto mais dados específicos forem utilizados, maior será a precisão da análise. Além disso, é importante avaliar se a ACV foi realizada por um profissional experiente e se a metodologia adotada é reconhecida e confiável. Certificações como a ISO 14000 podem conferir maior confiabilidade à análise, mas mesmo assim é possível haver suposições incorretas. Nesses casos, contar com uma verificação realizada por uma terceira parte imparcial pode ajudar a identificar possíveis erros e aprimorar a ACV (FALUDI, 2020).

Com o exemplo do professor Jeremy Faludi da universidade *Technische Universiteit Delft (TU Delft)* em seu curso *LCA lecture*, no uso de secadores de cabelo, nota-se na análise dos componentes que o plástico mesmo sendo o componente de maior tamanho e mais visto no sistema não é o componente com maior impacto ambiental. De fato, o componente eletrônico interno de segurança afeta muitas vezes mais o sistema. Porém, ao se observar o sistema como um todo, com todas as etapas, matéria prima de produção, transporte (estudo feito com produção na China e uso do produto os Estados Unidos), uso e descarte, encontra-se que o maior impacto ambiental gerado entre todas as etapas é durante o uso do produto com o consumidor final, mais de sete vezes maior que o impacto proporcionado durante a produção de matéria prima e produção do produto final.

Para isso, torna-se necessário a compreensão do que pode ser medido com o uso de ACV. A ACV não mensura impactos sociais nem impactos econômicos.

O cálculo da energia incorporada no produto e em sua fabricação não é uma medida ideal, uma vez que um quilowatt-hora de energia proveniente de carvão tem impactos ambientais significativamente diferentes de um quilowatt-hora de energia solar. O foco principal dos impactos ambientais reside em questões como emissões de dióxido de carbono, dióxido de enxofre para acidificação da água e do solo, bem como material particulado que contribui para problemas de saúde e poluição da água (FALUDI, 2020).

É importante ressaltar que diferentes esquemas de medição avaliam aspectos distintos. Por exemplo, o Potencial de Aquecimento Global do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) mede apenas as mudanças climáticas e utiliza uma normalização e ponderação para converter gases, como metano, óxido nitroso e clorofluorcarbonetos (CFCs), em equivalentes de CO₂ (FALUDI, 2020).

Por outro lado, padrões mais abrangentes, como a Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts (TRACI) da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, consideram o esgotamento de recursos, de combustíveis fósseis (por serem recursos finitos), a saúde do ecossistema (incluindo

mudanças climáticas, chuva ácida, ecotoxicidade, eutrofização da água, radiação ionizante, camada de ozônio estratosférica e destruição do habitat), bem como a saúde humana.

O sistema *Plastics design innovative (ReCiPe)*, desenvolvido pela empresa *Prey*, utilizado em estudos como o de *Chen et al. (2018)* e *Yao et al. (2020)*, baseia-se em diversos métodos de diferentes sistemas europeus ao longo das últimas três décadas. Ele amplia a abrangência das medições, incluindo a diminuição mineral, não se limitando apenas ao esgotamento de combustíveis fósseis. Esse sistema é capaz de distinguir entre a mineração de ouro e a mineração de ferro, além de oferecer três medidas diferentes para a eutrofização, três medidas diferentes para a ecotoxicidade, bem como considerar a acidificação e três tipos diferentes de mudanças no uso do solo. Além disso, o sistema também incorpora considerações sobre a saúde humana.

Seus pontos intermediários de categorias impactadas são mudanças climáticas, depleção do ozônio, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, radiação ionizante, ocupação de terras agrícolas, ocupação de terras urbanas, transformação de terras naturais, esgotamento de água, esgotamento de metais e esgotamento de combustíveis fósseis. Seus pontos finais de categorias impactadas são esgotamento de recursos, qualidade do ecossistema e saúde humana.

Em diversos produtos pode-se utilizar mais de uma metodologia para comparação de dados de saída, sendo válido o senso crítico de qual a melhor metodologia para certificar de que os resultados encontram maior grau de confiabilidade sobre o processo.

É ainda válido ressaltar que existem diferentes bancos de dados disponíveis nos quais é possível buscar informações sobre a produção de um quilo de aço ou qualquer outro produto final, como a quantidade de CO₂ e dióxido de enxofre necessários. Não é necessário realizar medições por conta própria, pois essas informações podem ser consultadas nos bancos de dados disponíveis (FALUDI, 2020).

Alguns dos principais softwares de ACV com bancos de dados disponíveis, amplamente utilizados são:

- SimaPro 7: Software popular e amplamente utilizado para a realização de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Ele oferece uma ampla gama de funcionalidades, incluindo a coleta de dados, modelagem de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados. O software SimaPro possui vários métodos de avaliação de impacto, como CML 1992, Eco-indicator 99, *Environmental Priority Strategies in product design* (EPS2000), entre outros, e conta com diversos bancos de dados, como BUWAL 250, ecoinvent, IVAM LCA Data, entre outros, que podem ser editados e ampliados sem limitação. Ele é especialmente útil para comparar e analisar produtos com ciclos de vida complexos, como equipamentos elétricos e eletrônicos. Desde sua introdução em 1990, o SimaPro tem sido amplamente utilizado na análise ambiental de produtos, auxiliando na tomada de decisões relacionadas ao desenvolvimento de produtos e políticas ambientais (CAMPOLINA *et al.*, 2015).
- GaBi: Software amplamente utilizado para realizar a avaliação de aspectos ambientais, sociais, econômicos, processos e tecnologias associados ao ciclo de vida de um produto, sistema ou serviço. Ele oferece recursos semelhantes ao SimaPro e é especialmente útil na construção de balanços de ciclo de vida, permitindo o manuseio de grande quantidade de dados. Com o banco de dados Gabi, que possui cobertura mundial, e o banco de dados do ecoinvent integrado, o GaBi oferece uma ampla gama de informações para análise. Sua interface intuitiva facilita a modelagem detalhada do ciclo de vida de produtos e processos, além de permitir a personalização dos modelos de avaliação de acordo com as necessidades específicas. Com isso, o GaBi se destaca como uma ferramenta poderosa na realização de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (CAMPOLINA *et al.*, 2015).

- OpenLCA: Software de ACV de código aberto, o que significa que é gratuito e tem uma comunidade ativa de desenvolvedores. Oferece recursos básicos para a modelagem e análise de ciclo de vida, incluindo a criação de inventários, avaliação de impacto e interpretação dos resultados. O OpenLCA também permite a integração de diferentes bancos de dados e é altamente personalizável.
- Umberto: Software de ACV que fornece uma abordagem integrada para análise de ciclo de vida e otimização de processos industriais. Além das funcionalidades típicas de ACV, o Umberto permite a modelagem de fluxos de materiais e energia, a identificação de pontos quentes de impacto e a análise de eficiência e custos (CAMPOLINA *et al.*, 2015).

De fato, a ACV consiste de um processo iterativo, ao qual precisa ser feito diversas vezes para se atingir o resultado estimado. Pode-se classificar como etapas para a execução da mesma: definições do objetivo e do escopo, unidade funcional, inventário, avaliação computacional-comparativa e interpretação dos resultados.

Escopo da ACV define o que está incluído e excluído da análise e estabelece os limites para avaliar os impactos ambientais de um produto, processo ou sistema ao longo de todo o seu ciclo de vida. Um escopo completo de ACV significa que a avaliação abrange todas as etapas do ciclo de vida, incluindo extração de matérias-primas, fabricação, distribuição, uso e descarte ou reciclagem no final da vida útil. Considera todas as entradas, saídas e impactos ambientais relevantes associados a cada etapa. O escopo completo da ACV leva em consideração vários fatores, como consumo de energia, depleção de recursos, emissões para o ar, água e solo, geração de resíduos e outros ônus ambientais. Ele considera impactos diretos e indiretos, incluindo processos e cadeias de suprimentos a montante e a jusante (FALUDI, 2020).

Já na unidade funcional da ACV refere-se a uma unidade de referência quantificável que representa a função ou benefício entregue por um produto, processo ou sistema sendo analisado. Ela serve como base para comparar diferentes alternativas e avaliar seu desempenho ambiental ao longo de seu ciclo de vida. A unidade funcional

é um componente crucial de um estudo de ACV, pois define o propósito e o contexto da avaliação. Ela fornece uma medida padronizada que permite comparações significativas entre diferentes produtos ou sistemas que cumprem a mesma função. A unidade funcional deve ser definida de maneira a capturar os atributos essenciais e o desempenho do produto ou sistema em estudo. Pode ser expressa em termos físicos ou funcionais, como peso, volume, energia, distância percorrida ou serviço prestado. Por exemplo, no caso de um carro, a unidade funcional pode ser definida como "1.000 quilômetros percorridos" ou "transporte de quatro passageiros por uma hora" (FALUDI, 2020).

Ao utilizar uma unidade funcional consistente, a ACV possibilita a avaliação dos impactos ambientais associados a diferentes alternativas e oferece entendimento sobre sua eficiência e sustentabilidade relativas. Ela permite uma comparação justa de diferentes opções, mesmo que tenham tamanhos, composições ou tecnologias diferentes. A seleção de uma unidade funcional apropriada requer uma consideração cuidadosa dos objetivos e limites específicos do estudo. Ela deve refletir com precisão o uso pretendido e os benefícios do produto ou sistema, levando em conta fatores relevantes, como vida útil esperada, demanda esperada e preocupações ambientais específicas associadas à função (FALUDI, 2020).

Uma unidade funcional bem definida em ACV permite que os tomadores de decisão avaliem o desempenho ambiental de produtos e sistemas, identifiquem áreas para melhoria e orientem processos de design e tomada de decisão sustentáveis. Ela facilita a identificação de oportunidades para reduzir os impactos ambientais e apoia o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis (FALUDI, 2020).

O inventário em ACV é uma etapa essencial que consiste na coleta, organização e quantificação de dados sobre os fluxos de entrada e saída de materiais, energia e outros recursos ao longo do ciclo de vida de um produto, processo ou sistema. O objetivo do inventário é obter uma visão abrangente e detalhada dos aspectos ambientais relevantes associados ao objeto de estudo. Isso inclui identificar e registrar todas as entradas de recursos naturais, como matérias-primas, energia e água, bem como as

saídas, como resíduos, emissões e poluentes. O inventário em ACV geralmente é realizado usando uma abordagem de "berço ao túmulo", que abrange todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até a disposição final do produto ou resíduos. Isso permite uma avaliação completa dos impactos ambientais ao longo de todas as etapas, incluindo produção, transporte, uso e descarte (FALUDI, 2020).

Durante o processo de inventário, os dados são coletados de várias fontes, como bancos de dados especializados, literatura científica, relatórios de empresas e informações fornecidas por fornecedores. Esses dados são então organizados e categorizados em diferentes fluxos de entrada e saída, como energia consumida, emissões atmosféricas, resíduos sólidos, consumo de água, entre outros. É importante ressaltar que o inventário em ACV deve ser realizado com base em dados precisos e atualizados, garantindo a confiabilidade e a representatividade dos resultados. Por isso, é fundamental utilizar fontes confiáveis e aplicar métodos consistentes e transparentes para a coleta e a manipulação dos dados. Os resultados do inventário são apresentados geralmente em forma de tabelas e gráficos, fornecendo uma visão quantitativa das entradas e saídas de recursos ao longo do ciclo de vida. Esses resultados podem ser utilizados como base para a próxima etapa da ACV, que é a avaliação computacional e comparativa, na qual os dados do inventário são interpretados e avaliados em relação aos potenciais impactos ambientais (FALUDI, 2020).

A avaliação computacional e comparativa em ACV consiste em analisar e interpretar os dados do inventário para avaliar os potenciais impactos ambientais associados a um produto, processo ou sistema. Nessa etapa, os dados coletados no inventário são processados e calculados com o uso de modelos e métodos específicos. São aplicados fatores de caracterização e de avaliação de impacto para quantificar e avaliar os efeitos ambientais de diferentes categorias, como mudanças climáticas, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, entre outros (FALUDI, 2020).

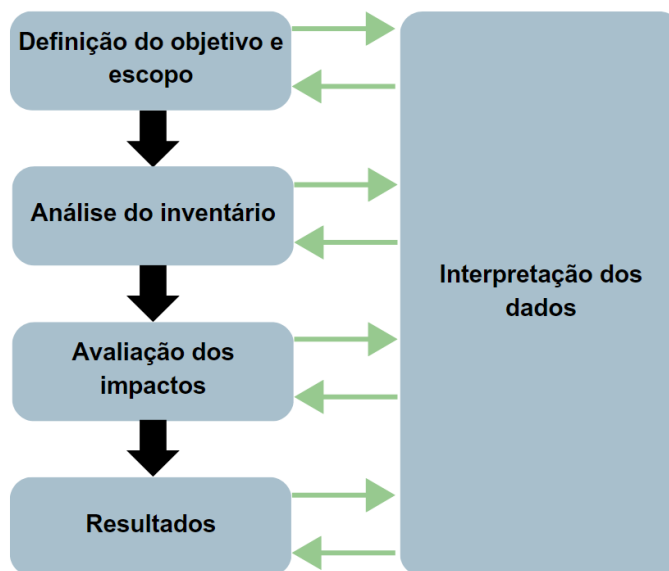
A avaliação computacional e comparativa permite comparar diferentes alternativas e identificar os principais impulsionadores dos impactos ambientais. Por meio de técnicas de modelagem e análise, é possível quantificar e visualizar as

contribuições relativas de cada etapa do ciclo de vida para os impactos totais. Além disso, essa avaliação também pode incluir a avaliação de incertezas e sensibilidades, levando em consideração a variabilidade dos dados e a influência de diferentes suposições e parâmetros. Isso ajuda a identificar as fontes de incerteza mais significativas e a tomar decisões informadas com base nos resultados. A avaliação computacional e comparativa é realizada por meio de software especializado em ACV, aos quais foram citados alguns acima que facilita o processamento dos dados, a aplicação de métodos de avaliação de impacto e a visualização dos resultados (FALUDI, 2020).

Os resultados são apresentados em forma de gráficos, tabelas e índices, permitindo a interpretação e a comunicação dos impactos ambientais associados a cada alternativa avaliada. Esses resultados podem ser utilizados para embasar decisões estratégicas, apoiar o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis e identificar oportunidades de melhoria ao longo do ciclo de vida. Na Figura 3.2.2 é apresentado de modo resumido, esse fluxo iterativo dos processos que necessitam ser executados para se obter uma ótima análise (FALUDI, 2020).

Na fase de comunicação dos resultados, usa-se barras de incerteza pois não há como se ter garantia plena do valor de impacto final, este pode ser afetado por diversos cofatores externos. É de suma importância o uso delas mostrando os pontos mais duvidosos da análise e quais locais têm-se maior certeza (FALUDI, 2020).

Figura 3. 2. 2 – Estrutura de estudo para ACV



Fonte: Autor

3.3 Mineração do ouro

Neste trabalho é avaliada a aplicação da ACV no processamento do minério ouro. Para tanto, é importante entender as principais etapas deste processo, conforme apresentado na sequência.

A exploração de uma mina de ouro segue um conjunto de etapas bem definidas, desde a identificação e prospecção do depósito até a produção efetiva do ouro. O processo envolvido na exploração de uma mina de ouro começa com a prospecção na qual são realizados estudos geológicos, geofísicos e geoquímicos para identificar áreas com potencial de depósitos de ouro (ADAMS, 2016).

Uma vez identificado um depósito promissor, é conduzido um estudo de viabilidade para avaliar a viabilidade econômica do projeto. Nessa etapa, são considerados fatores como os custos de extração, estimativas de recursos minerais, análise do mercado de ouro e impactos ambientais e sociais. Com base nos resultados do estudo de viabilidade, decide-se se o projeto é viável para prosseguir.

Se o projeto for considerado viável, passa-se para o desenvolvimento detalhado do projeto de mineração. Nessa etapa, são planejadas a infraestrutura necessária, as instalações de processamento, as estratégias de extração e os métodos de controle ambiental. Todo o projeto é meticulosamente planejado e projetado para garantir a eficiência operacional e a conformidade com as regulamentações aplicáveis (ADAMS, 2016).

Após o planejamento e desenvolvimento, são obtidas as licenças e autorizações necessárias das autoridades governamentais. O processo de licenciamento envolve a conformidade com regulamentações ambientais, de saúde e segurança, além da consulta e participação das partes interessadas locais.

Com as licenças em mãos, inicia-se a construção da mina. Essa fase envolve a preparação do local, a instalação de infraestrutura, como estradas, instalações de energia e abastecimento de água, e a construção de estruturas de suporte, como túneis, poços e galerias. A construção é executada de acordo com os planos e especificações previamente estabelecidos (ADAMS, 2016).

Após a conclusão da construção, a mina entra em operação e a extração do minério de ouro tem início. Isso pode envolver a perfuração, detonação e remoção do minério para transporte até as instalações de processamento.

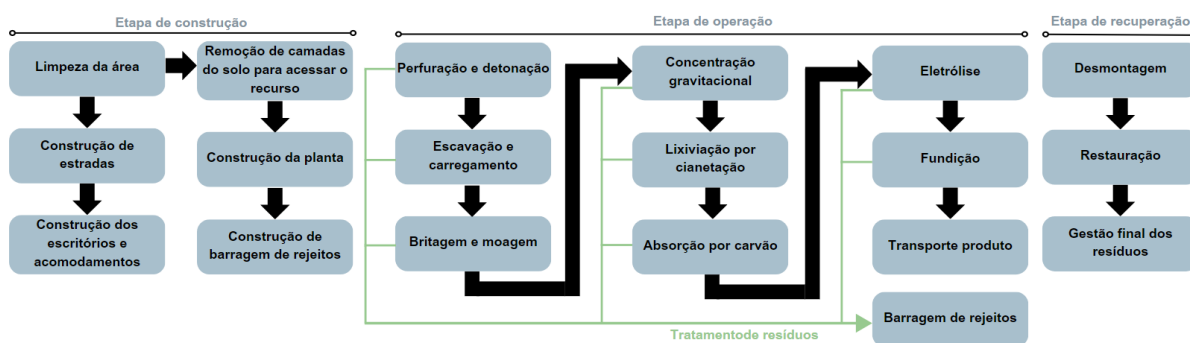
No processamento há o minério de ouro não refratário sendo um tipo de minério em que o ouro está presente em forma livre e é facilmente separado dos outros minerais. Esse tipo de minério, em geral, é processado por métodos convencionais, como britagem, moagem e concentração gravitacional. Os processos de lixiviação por cianetação também são comumente usados para extrair o ouro do minério não refratário. Esses métodos são relativamente simples e eficientes, permitindo altas taxas de recuperação do ouro (FARJANA *et al.*, 2019a).

No processamento do minério de ouro refratário, onde são encontrados minerais refratários, como pirita, arsenopirita e outros sulfetos de ferro, e que podem ser encontrados associados ao ouro, estes formam uma camada protetora ao redor das

partículas de ouro, dificultando sua extração e recuperação usando os métodos convencionais. Dessa forma, é necessário o uso de técnicas mais avançadas e complexas de processamento que resultam na liberação do ouro dos minerais refratários. Os processos inclusos são: lixiviação química em condições especiais, absorção por carvão, eletrólise, uso de oxidantes e tratamento térmico como fundição da matéria prima (CHEN *et al.*, 2018).

O minério refratário demanda 50% mais consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa em relação ao não refratário. Grande parte dos depósitos de ouro contem a combinação de minério não refratário e refratário, sendo assim é adaptado o uso das técnicas acima de acordo com a necessidade local de extração (CENIA, *et al.*, 2018).

Figura 3. 3. 1 – Etapas criação da mina e etapas de operação.



Fonte: Autor

Após a extração e concentração do ouro, segue-se o processo de refino para remover impurezas e obter um produto final de alta pureza. Durante todo o processo, é crucial gerenciar adequadamente os resíduos e minimizar os impactos ambientais. Medidas como o tratamento de águas residuais e a implementação de programas de reabilitação e restauração ambiental são adotadas.

Por fim, quando o depósito de ouro é esgotado, a mina passa por um processo de encerramento. Isso envolve a desativação das instalações, o fechamento de poços e a recuperação da área afetada, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais e sociais resultantes da operação (ADAMS, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho fez-se uma análise dos artigos listados no Quadro 4.1. onde são apresentados os principais elementos do estudo, a saber: o objetivo do estudo; a unidade funcional como parâmetro quantitativo de produção usado para comparação com outros estudos e as categorias impactadas, que representam os principais aspectos ambientais analisados em cada estudo.

Quadro 4. 1 – Síntese dos principais estudos.

Autor	Objetivo do estudo	Fronteiras do sistema	Unidade funcional	Categorias impactadas
Blanco <i>et al.</i> (2018)	Comparar os impactos de dois sistemas de abastecimento de água usados na indústria de mineração do Chile.	Extração da água subterrânea; Dessalinização da água do mar	1 m ³ de água fornecida a um local de mineração	Serviços ecossistêmicos.
Cenia <i>et al.</i> (2018)	Quantificar as emissões em CO ₂ e a energia inserida para pequena escala de mineração de ouro nas Filipinas.	Mineração do minério; Operações unitárias de trituração e moagem; Processamento e refino do minério.	100 g ouro	Emissões de CO ₂ ; Consumo de energia no processo.
Chen <i>et al.</i> (2018)	Avaliar os impactos ambientais da produção de ouro na China utilizando a avaliação do ciclo de vida.	Matérias-primas; Produção de energia; Transporte; Emissões diretas de todas as etapas de produção do ouro.	1 kg ouro produzido	Categoria de pontos médios do ReCiPe; Categoria de pontos finais do ReCiPe.
Farjana <i>et al.</i> (2019b)	Analisar os impactos ambientais do ciclo de vida decorrentes do processo de beneficiamento da produção combinada de ouro, prata, chumbo, zinco e cobre.	Extração do minério com foco no beneficiamento do metal.	1 kg de cada metal do estudo	Mais significantes: Ecotoxicidade, mudanças climáticas, toxicidade humana, eutrofização, acidificação e depleção da camada de ozônio.
Yao <i>et al.</i> (2020)	Avaliar os impactos ambientais da mina de ouro e determinar a importância dos efeitos externos com base na responsabilidade territorial em termos de impactos ambientais.	Local da mina, todas as fases da mina: exploração, construção, operação e reabilitação; Fora do local da mina: transporte de materiais, tratamento de resíduos, produção de energia.	1 kg ouro produzido	Categoria de pontos médios do ReCiPe; Categoria de pontos finais do ReCiPe.

Fonte: Autor

Blanco *et al.* (2018) foram os únicos autores das comparações os quais não abordavam a mineração do ouro, mas sim o uso de água na mineração do cobre no Chile, que envolve processos unitários de extração com alto consumo de água, é frequentemente realizada em regiões áridas. Portanto, é crucial implementar medidas de controle e gestão dos recursos hídricos para garantir o abastecimento das populações locais e a preservação do ecossistema. Para tal, fez-se ACV do sistema para extração de água do mar com dessalinização e a extração de água subterrânea, juntamente com análise econômica dos impactos gerados.

Conforme relatado por Blanco *et al.* (2018) a utilização de água do mar dessalinizada na indústria de mineração ocasiona uma perda substancial na comercialização de moluscos e algas, visto que a extração da água para uso na mineração arrasta as larvas dos moluscos que acabam por morrer no processo, além do arraste das algas. Ambos são utilizados como produto de exportação, principalmente os moluscos que são de suma importância, afetando os produtos locais.

Por outro lado, a água de extração subterrânea afeta outros grupos, como área de terra a ser usada, turismo nacional e estrangeiro. Além disso, a utilização de água subterrânea não atende o processo de mineração, sendo necessário misturar com a água do mar. Para ambos os processos citados anteriormente, Blanco *et al.* 2018 realizaram análise do CO₂ sequestrado, sendo o processo de extração de água subterrânea com maior impacto, com $1,56 \times 10^{-1}$ kg de CO₂.

Cenia *et al.* (2018) estimaram que a extração de cada tonelada de minério resultou em uma produção de 3 a 18 gramas de ouro, demandando um tempo de trabalho que variou de 57 a 159 horas, desde a etapa de mineração até a fase de refinação. Ao analisar os diferentes processos envolvidos no refino do ouro, observou-se que a combinação de amalgamação e cianetação com o processo de carbono em lixiviação foi a opção menos intensiva em termos de consumo de energia e emissões de CO₂, enquanto a cianetação com o processo de carbono em lixiviação foi a mais intensiva, pois a amalgamação possui alta eficiência na extração do ouro e possui sinergia com os outros dois processos. Esses resultados destacam a importância de considerar os tipos

de processos utilizados na mineração do ouro, não apenas em relação à eficiência de extração do ouro, mas também em termos de impacto ambiental, como consumo de energia e emissões de CO₂.

As emissões totais de CO₂ foram dominadas pela eletricidade, representando de 95% a 100% do total, com exceção da cianetação com carbono em lixiviação, onde o querosene contribuiu com 77%. O consumo estimado de energia variou de 3.501 MJ/100 g de ouro a 67.325 MJ/100 g de ouro, enquanto as emissões de CO₂ variaram de 398 kg CO₂/100 g de ouro a 5.340 kg CO₂/100 g de ouro.

Para reduzir os impactos ambientais, Cenia *et al.* (2018) propõem algumas medidas, como o uso de bombas e compressores mais eficientes em termos energéticos e a adoção de energia limpa no processo de amalgamação. Além disso, é importante investigar a possibilidade de reduzir o tempo de operação da cianetação com carbono em lixiviação, bem como explorar alternativas menos impactantes, como a flotação e a bio-lixiviação. É relevante ressaltar que cerca de 80% do ouro produzido nas Filipinas em 2014 foi proveniente de pequenas minas de ouro, o que torna fundamental a avaliação de melhorias nesse sistema de extração e refino do ouro.

Chen *et al.* (2018) perceberam a falta de análises com a metodologia da ACV nos processos de mineração de ouro na China, sendo curioso pois a China é um dos principais países em mineração do ouro no mundo. As categorias de impacto analisadas em seu estudo foram mudanças climáticas, acidificação terrestre, toxicidade humana, formação de material particulado, ecotoxicidade marinha, exaustão de combustíveis fósseis e esgotamento de metais, sendo feitas as análises pelo método ReCiPe.

No estudo de Chen *et al.* (2018), foi identificado que a mineração de ouro na China tem um impacto significativo na categoria de esgotamento de metais, resultando na diminuição das reservas de metais ao longo do ciclo de vida do produto. A pesquisa também destacou que a substituição da energia elétrica proveniente do carvão por energia hidrelétrica poderia reduzir em mais de 50% os impactos relacionados à mudança climática e à exaustão de combustíveis fósseis. Observou-se que a eletricidade

e o diesel desempenharam um papel importante nos impactos relacionados à mudança climática.

Ao comparar a mineração do ouro com a mineração de zinco e chumbo na China, utilizando as mesmas unidades funcionais, os resultados revelaram que os impactos ambientais relacionados à mudança climática, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, esgotamento de metais e esgotamento de combustíveis fósseis são muito maiores no caso do ouro. Esses impactos chegam a uma ordem de grandeza superior em comparação aos outros dois materiais. Por exemplo, o impacto na mudança climática, medido em kg de CO₂, é de $5,55 \times 10^7$ para o ouro, enquanto para o zinco e o chumbo é de $6,12 \times 10^3$ e $1,54 \times 10^3$, respectivamente, por tonelada de metais produzidos. Esses resultados destacam a relevância dos impactos ambientais associados à mineração do ouro em comparação com os outros materiais analisados pelo autor.

Farjana *et al.* (2019b) conduziram uma análise dos impactos do processo de beneficiamento combinado de ouro, prata, chumbo, zinco e cobre. Dentre as categorias avaliadas, foram identificadas as principais categorias de impacto, incluindo ecotoxicidade, mudanças climáticas, toxicidade humana, eutrofização, acidificação e depleção do ozônio. O método *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) foi utilizado para coletar, organizar e compartilhar os dados de inventário da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), e revelou que a radiação ionizante é a categoria de maior impacto no processo de beneficiamento, com o ouro apresentando um impacto maior e que o chumbo e o zinco apresentaram menor impacto para a categoria de radiação ionizante. Além disso, o método *Impact Assessment of Chemical Toxics* (IMPACT 2002+) indicou um impacto global mais significativo nos ecossistemas e na saúde humana associados ao beneficiamento do ouro, destacando o consumo de eletricidade como um dos principais impulsionadores dos impactos ambientais, considerando o tipo de produção envolvida.

No Tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos por Farjana *et al.* (2019b) com o método IMPACT 2002+ aos quais é possível observar que o ouro chega a ter ordem superior de grandeza nas categorias de danos:

Tabela 4. 1 – Resultados comparativos de ACV do processo de beneficiamento - método IMPACT 2002+.

Danos de categoria	Unidade	Cobre	Ouro	Chumbo	Prata	Zinco
Saúde Humana	AVAI*	$5,32 \times 10^{-6}$	0,018	$1,46 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$2,23 \times 10^{-6}$
Qualidade do ecossistema	FDP x m ² x ano**	18,463	64.910.84	5,064	1108,453	7,743
Mudanças climáticas	Kg CO ₂	0,935	3.501,226	0,256	59,739	0,392
Recursos	MJ primário***	$2,41 \times 10^{-6}$	$8,59 \times 10^{-3}$	$6,61 \times 10^{-7}$	$1,47 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-6}$

*AVAI: Ano de vida ajustado por incapacidade

**FDP x m² x ano: Fração Potencialmente Desaparecida de espécies em uma determinada área ao longo de um determinado período

***MJ primário: Uso total de energia primária durante o ciclo de vida

Fonte: Farjana et al. (2019b)

Farjana *et al.* (2019b) propõem a substituição da energia proveniente de combustíveis fósseis por fontes de energia renovável na geração de eletricidade, juntamente com a implementação da integração energética em todas as etapas de produção. No entanto, ressalta-se que a integração energética na indústria de mineração ainda enfrenta desafios, como altos custos iniciais de capital, o que limita sua adoção generalizada.

Yao *et al.* (2020) ressaltaram a importância de considerar os impactos tanto no local da mina quanto fora dele. Os impactos na região da mina que mais influenciaram a atividade foram a toxicidade humana como o maior impacto, seguida pelas mudanças

climáticas e a formação de material particulado. Já os impactos fora do local da mina foram principalmente atribuídos às mudanças climáticas devido ao consumo de combustível diesel, resíduos gerados por geradores a combustão, bem como a produção e transporte de explosivos.

Por meio da análise de Yao *et al.* (2020) utilizando o método ReCiPe e seus pontos intermediários e finais, constatou-se que os impactos encontrados nos processos fora do local da mina, predominam nos três indicadores finais: saúde humana, qualidade do ecossistema e esgotamento de recursos. Ao avaliar os estágios da construção da mina, como exploração, construção, operação e recuperação, verificou-se que a operação é o precursor dos três pontos finais do método ReCiPe, enquanto os demais estágios praticamente não afetam o sistema.

Foi realizado um comparativo entre o estudo de Yao *et al.* (2020) e o estudo conduzido por Chen *et al.*, onde foram encontrados valores discrepantes, por exemplo, na categoria de mudança climática com unidade de kg de CO₂. Yao *et al.* registrou um valor de $1,17 \times 10^6$, enquanto Chen *et al.* obteve $5,55 \times 10^4$. Uma das principais razões para essa divergência de valores são os dados de entrada utilizados, uma vez que ambos os estudos foram conduzidos em locais diferentes, o que implica em variações nos recursos energéticos e espaciais disponíveis. Essas diferenças nos parâmetros de entrada resultam em contribuições distintas para uma mesma categoria de impacto, o que influencia os resultados obtidos.

5 CONCLUSÃO

Os métodos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) são amplamente utilizados para quantificar os efeitos ambientais das indústrias de mineração de metais, principalmente do ouro. Esses métodos ajudam a identificar em quais as etapas da mineração e como as mesmas contribuem para os impactos ambientais. O ouro é definitivamente um dos minérios com maior impacto em produção, principalmente por sua escassez.

Para se ter melhor análise do sistema faz-se necessário a análise de fronteiras do mesmo, provando ser um fator decisivo para os resultados obtidos, uma vez que as necessidades inseridas na mineração excedem o sitio de mineração. Grande parte dos contribuintes nos impactos são derivados de transporte no qual é feito fora do sitio de mineração.

A utilização de fontes renováveis de energia para os equipamentos de extração, refinamento e transportes de matéria são fundamentais para a redução dos impactos ambientais nos processos de mineração. Substituir a geração de eletricidade convencional por energias renováveis tais como energia hidrelétrica e solar podem diminuir significativamente os requisitos de energia e mitigar o potencial de aquecimento global. Uma excelente proposta é a partir de integração energética ao qual precisa ser estudada a parte para o sistema em questão.

Faz se necessário que as técnicas e métodos de ACV sejam desenvolvidas e padronizados para melhorar a precisão e comparabilidade dos estudos na indústria da mineração. Isso inclui o desenvolvimento de um método ACV global aplicável a empresas de mineração em todo o mundo e o estabelecimento de bancos de dados específicos focados em conjuntos de dados de inventário de ciclo de vida da indústria de mineração.

O ouro é um minério de suma importância em nossa sociedade e nos mostra o quanto é importante obter-se uma extração dele de forma sustentável.

6 REFERÊNCIAS

ADAMS, D. M., **Gold Ore Processing: Project Development and Operations**, Elsevier, 2016.

BJØRN, A., et al. **LCA History**, Life Cycle Assessment: Theory and practice, p. 17-30, 2018.

BLANCO, C. F., et al. **An integrated framework to assess impacts on ecosystem services in LCA demonstrated by a case study of mining in Chile**, *Ecosystem Services*, 30, p. 211–219, 2018.

CAMPOLINA, J. M., et al. **Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida**, *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 19, p. 735-750, 2015.

CENIA, M. C. B., et al. **Life cycle energy use and CO₂ emissions of small-scale gold mining and refining processes in the Philippines**, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, p. 1928-1939, 2018

CHEN, W., et al. **Life cycle assessment of gold production in China**, *Journal of Cleaner Production*, 179, p. 143-150, 2018.

FALUDI, J. **LCA lecture**, TU Delft – Faculty of Industrial Design Engineering, 2020.

FARJANA, S. H., et al. **A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment**, *Journal of Cleaner Production*, 231, p. 1200–1217, 2019a.

FARJANA, S. H., et al. **Life cycle analysis of copper-gold-lead-silver-zinc beneficiation process**, *Science of the Total Environment*, 659, p. 41-52, 2019b.

GUINÉE, J. B., et al. **Life Cycles Assessment: Past, Present, and Future**, *Environ. Sci. Technol*, 45, p. 90–96, 2011.

SANTERO, N.; HENDRY, J. **A Harmonization of LCA methodologies for the metal and mining industry**, *Int J Life Cycle Assess*, 21, p. 1543–1553, 2016.

YAO, K. A. F. et al. **Mining Impacts Assessment Using the LCA Methodology: Case Study of Afema Gold Mine in Ivory Coast**, *Integrated Environmental Assessment and Management*, v.17, n. 2, p. 465–479, 2020.