

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ADVALDO DE OLIVEIRA JÚNIOR

TAINAH JAYNY PRIMOM

**AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA DE CICLO DE VIDA: UMA ANÁLISE COMPARATIVA
ENTRE AS FERRAMENTAS EXISTENTES E ESTUDO DE CASO**

PONTA GROSSA

2025

**ADVALDO DE OLIVEIRA JÚNIOR
TAINAH JAYNY PRIMOM**

**AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA DE CICLO DE VIDA: UMA ANÁLISE COMPARATIVA
ENTRE AS FERRAMENTAS EXISTENTES E ESTUDO DE CASO**

**Simplified life cycle assessment: a comparative analysis between existing
tools and case study**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Dr. Fabio Neves Puglieri
Co-orientador(a): Dr. Oscar Regis Junior

**PONTA GROSSA
2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ADVALDO DE OLIVEIRA JÚNIOR

TAINAH JAYNY PRIMOM

**AVALIAÇÃO SIMPLIFICADA DE CICLO DE VIDA: UMA ANÁLISE COMPARATIVA
ENTRE AS FERRAMENTAS EXISTENTES E ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 20 de fevereiro de 2025.

Fabio Neves Puglieri

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gilberto Zammar

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Micaela Ines Castillo Ulloa

Mestrado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus porque sem ele nada seria possível.

Aos nossos pais, pelo carinho e apoio, e por serem nossa base e nos fornecer todos os meios necessários para podermos estar ao final da nossa graduação.

Aos nossos familiares e amigos, por nos darem apoio e incentivo.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Fabio Neves Puglieri, que apesar da intensa rotina aceitou nos orientar, conduzindo o trabalho com paciência e dedicação, sempre disponível a compartilhar seu conhecimento.

Aos membros da banca e ao co-orientador, pelo tempo dedicado à avaliação do nosso trabalho.

A todos os pesquisadores que contribuíram diretamente ou indiretamente nesta pesquisa.

E por último, mas não menos importante, a UTFPR e aos professores da nossa graduação, essenciais no nosso processo de formação profissional.

RESUMO

Com os avanços tecnológicos gerados pelas revoluções industriais, houve um uso desenfreado de recursos naturais, gerando grandes impactos ambientais. O setor industrial, visando diminuir estes efeitos e adotar práticas mais sustentáveis, começou a adotar a ferramenta de gestão denominada avaliação do ciclo de vida (ACV). A ACV é uma técnica que avalia os potenciais impactos ambientais de produtos e sistemas de produção gerados durante todo seu ciclo de vida. Apesar dos seus benefícios, esta ferramenta possui limitações, como a dificuldade para criação do inventário e o longo tempo necessário para análise. Surgiram, então, as ferramentas simplificadas de avaliação do ciclo de vida (S-LCA), objetivando facilitar e difundir a aplicação de uma ACV. Este trabalho consistiu na investigação das ferramentas simplificadas existentes através de revisão bibliográfica, analisando-as a partir de critérios de aplicabilidade, definidos por investigação, a fim de determinar qual é a mais vantajosa e aplicá-la em um caso real. Para realização do estudo de caso, foi escolhida uma indústria de pequeno porte do setor metalúrgico, onde um dos produtos é o cabeçote fresador com haste. Aplicada a metodologia escolhida, as etapas consideradas mais críticas foram a própria produção da liga de aço 4140, a segunda usinagem e o banho químico de níquel. Após, foi possível propor sugestões de melhorias no processo, de acordo com essas etapas mais impactantes ambientalmente. Ao aplicar as melhorias, espera-se que haja redução nos custos de operação, diminuição dos impactos ambientais e maior conscientização a respeito das práticas sustentáveis. Com relação as implicações práticas, a pesquisa buscou contribuir para a popularização das ferramentas simplificadas de ACV, especialmente em pequenas e médias empresas, a busca por novas abordagens e, ao identificar limitações, a abertura de caminhos para o desenvolvimento de novas metodologias ou aperfeiçoamento das existentes.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida (ACV); ferramentas simplificadas; impactos ambientais.

ABSTRACT

With the technological advances generated by the industrial revolutions, there was an unbridled use of natural resources, generating major environmental impacts. The industrial sector, aiming to reduce these effects and adopt more sustainable practices, began to adopt the management tool called life cycle assessment (LCA). LCA is a technique that assesses the potential environmental impacts of products and production systems generated throughout their life cycle. Despite its benefits, this tool has limitations, such as the difficulty in creating an inventory and the long time required for analysis. Then, simplified life cycle assessment tools (S-LCA) emerged, aiming to facilitate and disseminate the application of LCA. This work consisted of investigating the existing simplified tools through a bibliographic review, analyzing them based on applicability criteria, defined by research, in order to determine which is the most advantageous and apply it in a real case. To carry out the case study, a small industry in the metallurgical sector was chosen, where one of the products is the milling head with shank. Once the chosen methodology was applied, the steps considered most critical were the production of the 4140 steel alloy itself, the second machining and the chemical nickel bath. Afterwards, it was possible to propose suggestions for improvements in the process, according to these most environmentally impactful steps. By applying the improvements, it is expected that there will be a reduction in operating costs, a reduction in environmental impacts and greater awareness regarding sustainable practices. Regarding practical implications, the research sought to contribute to the popularization of simplified LCA tools, especially in small and medium-sized companies, the search for new approaches and, by identifying limitations, opening paths for the development of new methodologies or improvement of existing ones.

Keywords: life cycle assessment (LCA); simplified tools; environmental impacts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Etapas do ciclo de vida	20
Figura 2- Fases da ACV	22
Figura 3- Modelo para condução da revisão bibliográfica sistemática	30
Figura 4- Grau de obediência	33
Figura 5- EcoAudit	37
Figura 6- OpenLCA	41
Figura 7- Etapas da produção do cabeçote	47
Figura 8- Ciclo de vida do cabeçote fresador com haste	49
Fotografia 1- Cabeçote fresador com haste	47
Gráfico 1- Comparação de quantidade de artigos	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Histórico das Revoluções Industriais	16
Quadro 2- Marcos brasileiros na questão ambiental	18
Quadro 3- Descrição das etapas	29
Quadro 4- Comparação de quantidade de artigos	35
Quadro 5- Comparação de metodologias	41
Quadro 6- Ranqueamento das ferramentas simplificadas de ACV	45
Quadro 7- Consumo Total de Energia	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- <i>Strings</i> de busca e bases de dados	30
Tabela 2- Compilação dos métodos	36
Tabela 3- Compilação dos critérios	43
Tabela 4- Notas e descrição	43
Tabela 5- Compilação dos dados	53
Tabela 6- Atribuição de notas	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do ciclo de vida
AALO	Avaliação ambiental dos locais e organizações
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AICV	Avaliação do impacto do ciclo de vida
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ICV	Inventário do ciclo de vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCI	Análise do inventário do ciclo de vida
MCDM	Método de Avaliação Multicritério
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONG	Organização Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
PDCA	<i>Plan-do-check-act</i>
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>
SETAC	<i>Society of Environmental Technology and Chemistry</i>
SGA	Sistema de gestão ambiental
S-LCA	<i>Simplified life cycle assessment</i> ou <i>streamlined life cycle assessment</i>
UICN	União Internacional para Conservação da Natureza
UNEP	<i>UN Environment Programme</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Dióxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrogênio
SO_x	Óxidos de enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Histórico da questão ambiental	16
2.1.1	Histórico da questão ambiental no Brasil	17
2.2	Avaliação de impactos ambientais	18
2.3	ABNT NBR ISO 14000	19
2.4	Avaliação do ciclo de vida (ACV)	20
2.4.1	Definição do objetivo e escopo	22
2.4.2	Análise do inventário	23
2.4.3	Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)	23
2.4.4	Interpretação dos resultados	24
2.4.5	Aplicações da técnica	24
<u>2.4.5.1</u>	<u>Identificação de oportunidades de melhoria ambiental</u>	<u>24</u>
<u>2.4.5.2</u>	<u>Comparação ambiental entre produtos com finalidades correspon-</u>	<u>25</u>
	<u>dentes</u>	
2.4.6	Limitações	25
2.5	Avaliação simplificada do ciclo de vida (S-LCA)	26
3	METODOLOGIA	29
3.1	Etapa 1 e etapa 2	29
3.2	Etapa 3	31
3.3	Etapa 4	33
3.4	Etapa 5	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Etapa 1	35
4.1.1	Carbon Footprint Calculator	36
4.1.2	EcoAudit	37
4.1.3	Eco-It	38
4.1.4	Eco Indicator 99	38

4.1.5	Matriz ERPA	38
4.1.6	Matriz MECO	39
4.1.7	Matriz MET	39
4.1.7	OpenLCA	40
4.1.8	Comparação entre as ferramentas	41
4.2	Etapa 2	42
4.3	Etapa 3	44
4.4	Etapa 4	46
4.4.1	Descrição das etapas de produção	47
4.4.2	Ciclo de vida da peça	48
4.4.3	Aplicação da ferramenta escolhida no caso real	50
<u>4.4.3.1</u>	<u>Estimativa do consumo energético</u>	<u>50</u>
<u>4.4.3.2</u>	<u>Matriz MECO aplicada no estudo</u>	<u>53</u>
4.5	Etapa 5	54
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial, iniciada no século XVIII na Inglaterra, foi um marco para a história da humanidade. Pautada no desenvolvimento tecnológico, trouxe muitos benefícios para a sociedade ao promover transformações no processo produtivo, nas relações de trabalho e na economia mundial. Contribuiu também para a mudança nos padrões de consumo das pessoas, fortalecendo o sistema capitalista, e na relação entre o ser humano e o ambiente (SILVA, 2023).

Com o grande avanço, países ricos começaram a se desenvolver e criar polos industriais, apropriando-se desenfreadamente de recursos naturais a fim de viabilizar suas produções, visando somente o lucro e sem se preocupar com os danos que poderiam ser causados ao meio ambiente, já que acreditavam que os problemas ambientais seriam solucionados por possíveis tecnologias futuras (SILVA, 2023).

A preocupação com os impactos ambientais gerados foi colocada em discussão apenas a partir da década de 1970, por meio da Conferência das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente, realizada em Estocolmo pela Organização das Nações Unidas (ONU) (RETAMOZO, 2022). Desde então, essa pauta vem sendo cada vez mais debatida, até que, em 2012, ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável no Rio de Janeiro, onde foram propostos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) presentes na Agenda 2030. Seu principal intuito foi estabelecer metas a fim de conduzir a sociedade para um mundo mais sustentável e inclusivo (ONU).

Com relação ao setor industrial, o reconhecimento do impacto que as práticas industriais podem causar fez com que muitas empresas tomassem medidas visando diminuir a pegada ambiental e adotassem práticas mais sustentáveis (RETAMOZO, 2022). Como principal problema, pode-se citar a emissão de gases do efeito estufa, destacando o dióxido de carbono (CO₂) gerado a partir da queima de combustíveis fósseis para geração de energia, que contribuem para as mudanças climáticas. Outras preocupações envolvem a poluição do ar, da água e do solo, onde estão sendo implementadas ações como a redução da geração de resíduos e do uso da água.

Para mensurar os impactos ambientais causados durante todas as etapas de ciclo de vida de um produto, foi criada a ferramenta de gestão chamada de

avaliação do ciclo de vida (ACV). Conhecida internacionalmente, segue os padrões estabelecidos pelas normas da International Organization for Standardization (ISO) 14040 e 14044 (LIMA, 2013). Ela é utilizada para determinar em qual ou em quais trajetos do ciclo de vida há maior degradação ambiental. Ainda, consegue avaliar o custo de possíveis mudanças e como essa alteração impactará. Assim, a ACV ajuda a promover uma abordagem mais sustentável para a indústria, visto que considera todos os aspectos ambientais de um produto ou serviço, incluindo produção, uso e descarte (PRYSHLAKIVSKY; SEARCY, 2021).

A primeira etapa da ACV é a definição de objetivos e do escopo. A segunda etapa envolve a criação do inventário de ciclo de vida (ICV), com a coleta de dados de todas as etapas do ciclo de vida. A avaliação de impacto ocorre na terceira etapa, onde é analisado o potencial de impacto das atividades analisadas na segunda etapa. Já na quarta etapa, os dados são interpretados e ações de melhorias podem ser propostas (FILHO; JUNIOR; LUEDEMANN, 2016).

São várias as dificuldades ao se realizar a avaliação de ciclo de vida. A falta de dados precisos e confiáveis, a complexidade de sistemas a serem analisados e a seleção e a aplicação de métodos de avaliação de impactos adequados são algumas delas (ALVARENGA; QUEIROZ; RENOFIO, 2012). Deste modo, foram criadas as ferramentas simplificadas de avaliação do ciclo de vida (S-LCA), também chamadas de *simplified life cycle assessment* ou *streamlined life cycle assessment*, com o objetivo de facilitar e difundir a aplicação de uma ACV. Estas oferecem uma lista limitada de indicadores que são pré-selecionados e padronizados, não exigindo uma técnica avançada (ALVARENGA; QUEIROZ; RENOFIO, 2012). Apesar de serem aplicadas mais facilmente, são várias as técnicas que podem ser empregadas, possuindo maior ou menor aplicabilidade em cada caso.

Desta forma, a realização de estudos aprofundados sobre sua aplicabilidade e utilização é essencial para melhorar a compreensão da eficácia de integração dessas ferramentas em processos de tomada de decisão, especialmente em casos onde a complexidade da ACV pode ser um obstáculo. Estes estudos podem contribuir para o aprimoramento destas ferramentas, tornando-as mais robustas e aplicáveis em uma gama maior de setores, além de incentivar a adoção de práticas mais sustentáveis e com baixo impacto ambiental. Além disso, ferramentas simplificadas oferecem abordagens mais acessíveis e menos custosas, permitindo que até mesmo pequenas e médias empresas possam realizar estudos de avaliação

de impactos ambientais de seus produtos. Porém, também é necessário a investigação de suas respectivas limitações e adequações, a fim de garantir que a análise seja realizada de forma precisa.

Em resumo, as ferramentas simplificadas de avaliação do ciclo de vida podem ajudar na superação das dificuldades da ACV, tornando-a mais acessível, menos dispendiosa e mais fácil de ser realizada, mas será que, com base em uma combinação de fatores, existe alguma que possa ser amplamente recomendada?

Este estudo desempenha um papel importante na divulgação de informações sobre ferramentas simplificadas de avaliação de ciclo de vida, ajudando a esclarecer algumas metodologias, aplicações práticas e benefícios. Também identifica limitações e áreas de melhorias, tornando possível o aperfeiçoamento dessas ferramentas. Como resultado, este trabalho não apenas dissemina o conhecimento sobre essas metodologias, mas também estimula a adoção delas e encoraja práticas sustentáveis no contexto empresarial.

1.1 Justificativa

Para tornar a avaliação do ciclo de vida mais acessível e difundida é fundamental que sejam utilizadas as ferramentas simplificadas, pois as mesmas oferecem alternativas para questões difíceis de serem resolvidas pela ACV, como a falta de informações na composição do inventário. Ainda, é possível perceber a existência de várias destas ferramentas simplificadas, porém há uma falta de estudos aprofundados sobre sua aplicabilidade e utilidade. Este trabalho visa analisar essas ferramentas, avaliar sua eficácia e promover a disseminação das informações, facilitando a aplicação e permitindo novas abordagens para avaliação de impactos ambientais.

A importância deste estudo está na relevância para o meio acadêmico, sociedade e empresas. Em relação ao meio acadêmico, contribui no avanço de pesquisas e aprimoramento de metodologias de ACV. Para a sociedade, facilita o estudo de impactos e a adoção de práticas mais sustentáveis, promovendo maior conscientização e redução de impactos ambientais. Já para as empresas, oferece soluções práticas de implementação, oportunizando a redução de impactos, a busca por estratégias sustentáveis eficientes e o ganho de vantagem no mercado, pois ao mesmo tempo que atendem exigências regulatórias, também atendem às expectativas de consumidores que buscam por práticas mais verdes. Além dos

benefícios mencionados, esta pesquisa pode gerar o desenvolvimento ou aprimoramento de políticas públicas relacionadas à sustentabilidade, ao desenvolvimento de tecnologias verdes e à implementação de práticas empresariais responsáveis ambientalmente, além da promoção de colaboração entre as instituições (universidades, empresas e centros de pesquisa), resultando em outros estudos aplicados.

Este estudo também traz à tona um problema relevante: a complexidade e o alto custo de uma ACV, que dificultam a aplicação especialmente em pequenas e médias empresas, além de cenários onde dados sobre o ciclo de vida do produto não estão disponíveis. Com isso, e aliado à necessidade de ferramentas mais acessíveis, rápidas e fáceis de usar (e que não comprometam a qualidade da análise), as ferramentas simplificadas de avaliação de ciclo de vida surgem como uma alternativa que pode ser utilizada de forma eficaz.

As implicações deste trabalho são amplas. Proporciona melhor compreensão sobre a aplicabilidade das ferramentas simplificadas, permitindo que cada vez mais empresas e pessoas adotem práticas mais eficientes e sustentáveis, resultando também no fortalecimento da imagem da marca. Também inclui benefícios como: maior conscientização sobre questões ambientais, contribuindo para a mitigação dos impactos, e expansão do campo de estudo sobre este tema, podendo acarretar em inovações metodológicas futuras.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são apresentados a seguir, divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo analisar e recomendar ferramentas simplificadas baseadas na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), a partir de critérios de aplicabilidade definidos a partir de estudos encontrados.

1.2.2 Objetivos específicos

Especificamente, o estudo tem como objetivos:

- identificar as principais ferramentas de avaliação simplificada de ciclo de vida;
- definir os critérios de aplicabilidade para ferramentas simplificadas de avaliação de ciclo de vida;
- avaliar a aplicabilidade de cada ferramenta e determinar qual a mais vantajosa;
- aplicar a ferramenta simplificada de avaliação de ciclo de vida, selecionada a partir dos critérios de aplicabilidade, em um caso real, e;
- ao final do trabalho, recomendar oportunidades de melhoria(s) no ciclo de vida do produto analisado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Histórico da questão ambiental

No início do século XVIII, quando ainda não existiam indústrias, a produção ocorria de forma manual, caracterizada por ser caseira, artesanal e descentralizada. O artesão comprava a matéria-prima e ele mesmo confeccionava o produto, muitas vezes com ajuda dos filhos, para então vender ao comerciante (MEDEIROS; PRADO, 2019). Com o crescimento descontrolado da população, percebeu-se a necessidade de uma produção mais rápida e em maior quantidade, fator que influenciou a Primeira Revolução Industrial. Depois dela, vários acontecimentos sucederam-se até chegar ao que os estudiosos denominam de Quarta Revolução Industrial.

A seguir, consta um quadro apresentando as Revoluções Industriais, suas principais características e fatos históricos importantes.

Quadro 1 - Histórico das Revoluções Industriais

Revolução	Características	Acontecimentos Importantes
Primeira Revolução Industrial (1760-1860)	Iniciou-se na Inglaterra e depois expandiu-se para a França, Bélgica, Holanda, Rússia, Alemanha e Estados Unidos (BOETTCHER, 2015). Foi marcada por transformações no processo produtivo, principalmente na substituição da energia humana por outras fontes, como o carvão, e da manufatura pela maquinofatura, além do fortalecimento da existência de duas classes sociais: a burguesia e a classe trabalhadora (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2023). O uso de novas tecnologias era um fator essencial para o crescimento e modernização (BOETTCHER, 2015), necessitando de mudanças no modelo industrial inicial, que culminou na segunda Revolução Industrial (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2023).	Surgimento de dois economistas importantes na discussão da questão ambiental: Thomas Malthus e David Ricardo. <ul style="list-style-type: none"> • Malthus pontuou que a população iria crescer em progressão geométrica, enquanto os meios de subsistência cresceriam de forma aritmética (FRAZÃO, 2018); • David Ricardo, argumentou que era necessário que os preços das mercadorias originadas da terra, teriam que ser altos o suficiente para viabilizar a produção em condições menos favoráveis, já que haveria uma redução da produtividade do trabalho, gerado pela escassez de terras férteis (ARAÚJO JÚNIOR, 2020).
Segunda Revolução Industrial (1850-1945)	Destacada pela busca pelo lucro, a especialização do trabalho e a ampliação da produção (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2023).	Descoberta da eletricidade, a transformação do ferro em aço, o aparecimento e a inovação dos meios de transporte, o avanço dos meios de comunicação, e o crescimento da indústria química e de outros setores (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2023).

Quadro 1 Continuação - Histórico das Revoluções Industriais

Revolução	Características	Acontecimentos Importantes
Terceira Revolução Industrial (1950-2010)	Marcada pelos avanços na informática, robótica, telecomunicações, transportes, biotecnologia, química fina e nanotecnologia (BOETTCHER, 2015), teve como características o uso de várias fontes de energia e de recursos informáticos, aumento da discussão e consciência ambiental, aumento do desemprego, ampliação de direitos trabalhistas, globalização, surgimento de potências industriais e a popularização de produtos tecnológicos (JONCK, 2019).	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da União Internacional para Conservação da Natureza (UICN) em 1947; • Surgimento das primeiras leis ambientais destinadas às empresas; • Criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), em 1972; • Em 1987, foi publicado o relatório “Nosso Futuro Comum”, trazendo o primeiro conceito de desenvolvimento sustentável; • Criação do Protocolo de Montreal, em que os países participantes se comprometeram a eliminar a produção e o consumo de substâncias responsáveis pela destruição da camada de ozônio (IBAMA, 2021); • Na década de 90, ocorreram dois eventos importantes: a ECO-92 e a Conferência de Estocolmo. A ECO-92 abriu caminho para a realização da Conferência de Kyoto (1997); • Em 1991 foi criada a série ISO 14000, pela Organização Internacional de Normalização (ISO), sendo que as primeiras normas foram publicadas em 1996 (ISO, 1997).
Quarta Revolução Industrial (2011-dias atuais)	Seu fundamento está baseado no fato de que conectando as máquinas, os sistemas e ativos, pode ser criado redes inteligentes para controlar os módulos de produção de forma autônoma (SILVEIRA, 2017). As tecnologias mais utilizadas são a Internet das coisas, transmissão de dados por wi-fi, Big Data e a inteligência artificial (SEBRAE, 2018).	Em 2012 ocorreu a Rio+20, também chamada de Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, onde foram criados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) presentes na Agenda 2030.

Fonte: Autoria própria (2025)

Apesar dos esforços com relação à sustentabilidade, ainda hoje são muitas empresas e processos que geram impactos ao meio ambiente, seja em pequena ou grande escala.

2.1.1 Histórico da questão ambiental no Brasil

Alguns marcos importantes para a questão ambiental no Brasil são descritos no quadro a seguir:

Quadro 2 - Marcos brasileiros na questão ambiental

Ano	Marco
1981	Criação da Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), através da lei nº 6.938, cujo objetivo é preservar, melhorar e recuperar a qualidade ambiental, assegurando condições de desenvolvimento socioeconômico, interesses da segurança nacional e proteção da dignidade da vida humana (BRASIL, 1981).
1986	Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), que dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impactos ambientais (BRASIL, 1986).
1988	Publicação da Constituição de 1988, onde é citado no capítulo VI que todos têm direito a um meio ambiente equilibrado e que é dever do poder público e da coletividade protegê-lo e preservá-lo (BRASIL, 1988).
1998	Criação das leis de crimes ambientais, que dispõe sobre sanções administrativas e penais aos que cometerem crimes contra o meio ambiente (FACHINI, 2022).
2010	Originada a Política Nacional de Resíduos Sólidos, onde são apresentados instrumentos para manejo e destinação correta de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

Fonte: Autoria própria (2025)

2.2 Avaliação de impactos ambientais

Em situações cotidianas, muitas vezes interpreta-se impactos ambientais como algo danoso ao meio ambiente, porém a NBR ISO 14001:2015 define como a “modificação no meio ambiente, tanto adversa como benéfica, total ou parcialmente resultantes dos aspectos ambientais de uma organização” (ABNT, 2015). Isso quer dizer que pode-se ter um impacto positivo também, como obras de revitalização de áreas degradadas e a construção de áreas de preservação ambiental.

Além de serem divididos em positivos ou negativos, os impactos também podem ser classificados, segundo Barbosa (2017) em:

- Impacto direto: resultante de uma relação de causa e efeito, como a poluição das águas devido ao derramamento de petróleo;
- Impacto indireto: impactos secundários que ocasionam outras reações em cadeia, como os impactos na economia e no desemprego, causados pelo derramamento de petróleo;
- Impacto local: quando o efeito acontece no próprio local onde foi gerado ou em imediações;

- Impacto regional: quando o efeito ocorre em uma região ou área específica;
- Impacto estratégico: quando afeta um recurso ambiental de importância coletiva, como incêndios em importantes áreas de preservação ambiental;
- Impacto imediato: quando o impacto surge no mesmo momento da ação;
- Impacto a médio ou longo prazo: quando o efeito se manifesta após certo tempo que a ação ocorreu;
- Impacto temporário: quando o efeito permanece em um determinado período;
- Impacto permanente: quando não há perspectiva de cessar os impactos da ação, e;
- Impacto irreversível: quando não há como contornar o efeito causado pelo impacto ambiental.

Ainda, pode-se subentender que o impacto ambiental negativo é causado por uma ação humana que cause: supressão de alguns componentes do meio ambiente, inserção de certos elementos ao ambiente e a sobrecarga resultante da colocação de fatores de estresses além do que o meio suporta (SÁNCHEZ, 2020). Assim, os principais impactos ambientais são descritos por Barbosa (2017) como: poluição do solo e erosão, poluição das águas, poluição atmosférica, degradação da biodiversidade, poluição sonora, esgotamento de recurso natural não-renovável, desmatamento, além da subsidência do terreno e a geração de rejeitos radioativos que podem vir a causar acidentes ambientais futuros.

Para avaliar estes potenciais impactos ambientais surgiu a técnica denominada avaliação do ciclo de vida (ACV). Normatizada pelas ISO 14040 e 14044, atualmente, é o método mais completo de gestão ambiental empresarial.

2.3 ABNT NBR ISO 14000

A ISO 14000 é uma série de normas e diretrizes criadas pela *International Organization for Standardization* (ISO), organização internacional não governamental independente, voltadas para a gestão ambiental de empreendimentos (ISO, 1997). Seu objetivo é a criação de um Sistema de Gestão Ambiental para auxiliar as empresas a honrarem suas responsabilidades em relação ao meio ambiente (ALENCAR *et al.*, 2015). Segundo a definição ISO, o Sistema de Gestão Ambiental (SGA) é um conjunto composto por estrutura organizacional,

responsabilidades, práticas, procedimentos, processos e recursos necessários na implantação e manutenção do gerenciamento ambiental (ISO, 1997).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a responsável pela normalização técnica (LEMOS, 2015). Apesar disso, a norma deixa que cada organização identifique as possibilidades de controle dos aspectos ambientais, para gerenciar seu processo, buscando a melhoria contínua (ALENCAR *et al.*, 2015).

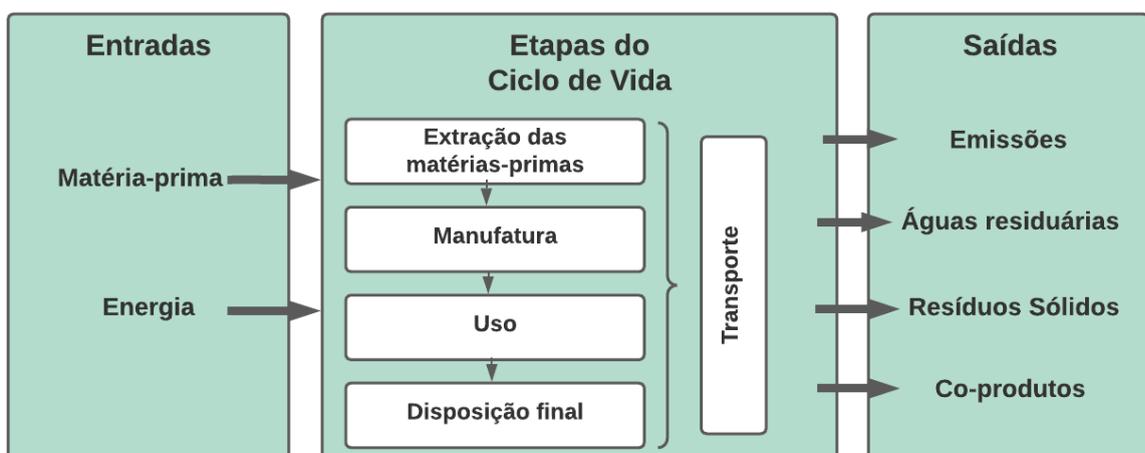
Dentre elas, apenas a norma ISO 14001 é certificável, enquanto a norma 14004 é um guia de implementação da ISO 14001 (SILVEIRA; FARIA, 2020).

No presente trabalho será dado enfoque maior nas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044.

2.4 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Para entender sobre a avaliação do ciclo de vida, é necessário primeiramente compreender o conceito de ciclo de vida. O ciclo de vida pode ser definido como um conjunto de etapas essenciais para que o produto cumpra sua finalidade, etapas estas que vão desde a obtenção dos recursos naturais até o descarte (SILVA; SANTOS 2024). A figura a seguir mostra as cinco etapas gerais que constituem o ciclo de vida de um produto. São elas: extração de recursos, manufatura, uso, disposição final e transporte (WILLERS; RODRIGUES; SILVA, 2013).

Figura 1 - Etapas do ciclo de vida



Fonte: Adaptado de Willers, Rodrigues e Silva (2013, p. 437)

Entendido o conceito de ciclo de vida, parte-se para o conceito de avaliação

do ciclo de vida (ACV). A ACV é uma ferramenta que avalia potenciais impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida de um produto (SILVA; SANTOS 2024). Esta avaliação é feita identificando todas as interações que ocorrem nas etapas do ciclo e o meio ambiente, além da avaliação dos impactos ambientais que podem estar associados a estas interações (WILLERS; RODRIGUES; SILVA, 2013).

. Conhecida internacionalmente, a avaliação do ciclo de vida segue os padrões estabelecidos pela ISO 14040:2009 e a ISO 14044:2009 e tem como objetivo melhorar o desempenho ambiental dos processos produtivos, além de auxiliar na criação de produtos sustentáveis (FIRMINO *et al.*, 2022).

As primeiras pesquisas focadas em questões ambientais remontam à década de 1960, quando algumas das maiores empresas da época decidiram fazer o levantamento do consumo de energia decorrente da produção de seus produtos, visando reduzir seus gastos operacionais (PETRONI; CAMPOS; AZEVEDO, 2015). O estudo realizado por Franklin & Associates em 1969 a pedido da Coca-Cola Co., no qual foi analisado o consumo de matérias-primas e energia nos processos de produção dos materiais de embalagem da empresa, ficou marcado como um dos exemplos mais notáveis dentro dessa classe de iniciativas (PETRONI; CAMPOS; AZEVEDO, 2015).

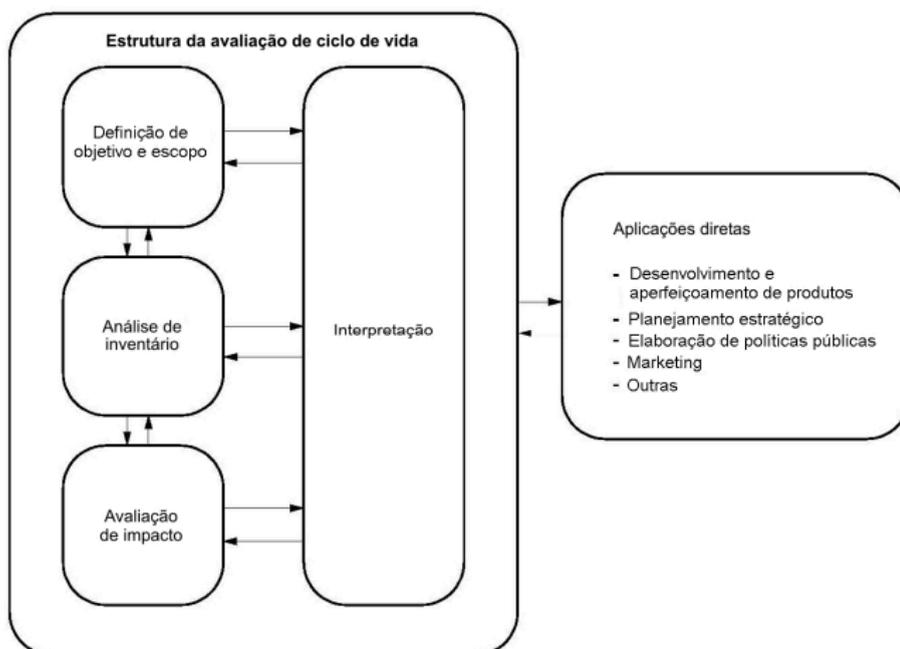
Durante a década de 1990, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) atraiu muita atenção. A ACV era amplamente valorizada na época, mas seus resultados também eram frequentemente questionados. A série de normas internacionais ISO 14040 da Organização Internacional de Normalização (ISO), junto com várias recomendações e livros-texto, são o resultado do forte desenvolvimento e harmonização de técnicas impulsionadas por essa abordagem. A maturidade e a robustez metodológica da ACV aumentaram como resultado das operações de desenvolvimento e harmonização de métodos. Ainda nos dias atuais, a metodologia está em constante desenvolvimento e, por isso, vários projetos internacionais estão em andamento para consolidar e fornecer recomendações (PETRONI; CAMPOS; AZEVEDO, 2015).

Segundo a NBR ISO 14044:2009, o estudo da ACV é dividido em quatro fases:

1. Definição do objetivo e escopo;
2. Análise de inventário;
3. Avaliação de impactos, e;
4. Interpretação.

Conforme mostra a figura a seguir, as fases são interligadas e podem necessitar de revisão com o andamento da avaliação. Ainda, os resultados da ACV podem ser empregados em diversos processos de tomada de decisão, podendo ter aplicações diretas no desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos, no planejamento estratégico, na elaboração de políticas públicas e no marketing, a depender do objetivo e do escopo definidos (ABNT, 2009).

Figura 2 - Fases da ACV



Fonte: ABNT (2009)

2.4.1 Definição do objetivo e escopo

Nesta primeira fase são identificadas as razões para realizar tal estudo, a aplicação pretendida, o público-alvo e se há intenção de divulgar publicamente os resultados (ABNT, 2009). Ainda segundo a mesma norma, no escopo devem estar contidos parâmetros como função, unidade funcional, fluxo de referência, fronteiras do sistema, critérios para alocação de cargas ambientais, metodologia de Análise do Inventário do Ciclo de Vida e tipos de impactos, requisitos de dados, limitações e o tipo e formato do relatório que é requerido no estudo.

De forma geral, a norma ISO 14040 estipula que o escopo mínimo de um

estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) deve abranger três dimensões: a extensão da ACV, sua largura (quantidades de subsistemas) e a profundidade da ACV (ISO, 2006).

2.4.2 Análise do inventário

A análise do inventário do ciclo de vida (LCI) consiste em coletar informações a respeito dos recursos naturais consumidos e das emissões geradas ao longo das etapas do ciclo de vida do produto. A condução do inventário é um processo iterativo, onde os procedimentos devem ser sempre checados para garantir que os requisitos de qualidade estabelecidos no escopo estejam sendo atendidos (SILVA; FRANCISCO, 2022).

O inventário mostra-se um procedimento difícil e trabalhoso, assim a NBR ISO 14040:2009, recomenda que a organização da fase de LCI seja feita da seguinte forma:

1. preparação para coleta de dados;
2. coleta de dados;
3. validação;
4. correlação dos dados aos processos elementares;
5. correlação dos dados à unidade funcional;
6. agregação dos dados, e;
7. refinamento da fronteira do sistema.

2.4.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

A avaliação do impacto do ciclo de vida consiste em compreender e avaliar a magnitude e a significância dos potenciais impactos ambientais do sistema. A análise transforma os dados do inventário em um conjunto específico de impactos selecionados (SILVA; FRANCISCO, 2022).

Segundo a NBR ISO 14044:2009, os elementos obrigatórios da AICV são:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização: momento em que são identificadas as preocupações ambientais, além das categorias e indicadores;
- Classificação: etapa em que os dados do inventário são classificados e agrupados nas categorias selecionadas, e;

- Caracterização: onde ocorre a permutação dos aspectos ambientais em impactos ambientais correspondentes, aplicando os fatores de equivalência (índice de conversão).

2.4.4 Interpretação dos resultados

Na fase de interpretação, os resultados obtidos nas fases anteriores são avaliados com relação aos objetivos e ao escopo, gerando conclusões e recomendações. Esta fase compreende os seguintes elementos (ABNT, 2009):

- identificação de questões significativas com base na ICV e na AICV;
- avaliação do estudo;
- conclusões, limitações e recomendações sobre as questões ambientais mais significativas.

2.4.5 Aplicações da técnica

Conforme simpósio realizado pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC)- entidade precursora no desenvolvimento da ACV-, os princípios para desenvolvimento desta análise são (SETAC, 1993):

- fornecimento de uma imagem, mais fiel possível, de quaisquer interações que ocorram com o meio ambiente;
- contribuição no âmbito do entendimento da natureza global e independente das consequências ambientais geradas por atividades humanas;
- geração de subsídios aptos a definir os efeitos ambientais destas atividades, e;
- identificação de oportunidades para melhoria ambiental.

Assim, as aplicações da ACV podem ser divididas em dois principais aspectos: a identificação de oportunidades para melhorar o desempenho ambiental e a comparação ambiental entre produtos com finalidades correspondentes (SETAC, 1993).

2.4.5.1 Identificação de oportunidades de melhoria ambiental

Neste primeiro aspecto, a ACV busca os principais focos de impactos ambientais que um produto pode apresentar. Depois de aplicada, o responsável terá

determinado a contribuição do sistema em estudo para várias categorias de impacto ambiental. Com base nesse diagnóstico, será possível estabelecer planos de ação para reduzir esses impactos (SILVA; FRANCISCO, 2022).

2.4.5.2 Comparação ambiental entre produtos com finalidades correspondentes

Neste caso, na aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para fins de comparação de produtos, são analisados os aspectos ambientais e seus impactos associados em diferentes formas de cumprir a mesma função. O uso da ACV com essa abordagem é mais atraente para organizações empresariais que desejam demonstrar a superioridade ambiental de seus produtos em relação aos de seus concorrentes diretos, a fim de conquistar novos mercados. Além disso, quando comparado o desempenho ambiental de um ou mais produtos com um determinado padrão pré-estabelecido, a ACV pode ser utilizada para a criação de rótulos e declarações ambientais (AMARAL, 2020).

O fato de a ACV ser uma técnica eficiente para realizar diagnósticos ambientais permite sua aplicação em atividades estratégicas de uma organização, como o projeto de novos produtos e a reavaliação de produtos já estabelecidos. Nesse contexto, a ACV é útil na seleção de opções de projeto, especialmente no que diz respeito à busca por novos materiais, formas de energia alternativas e implementação de melhorias de processo para minimizar perdas e conceber produtos menos prejudiciais ao meio ambiente (SILVA; FRANCISCO, 2022).

2.4.6 Limitações

Apesar de não ser uma técnica tão recente, a ACV ainda possui algumas limitações, como a elevada quantidade de dados que são necessários para executá-la (DALMORA; LUZZI; HEMKEMEIER, 2023). Ainda, não pode ser considerada como um bom instrumento de análise quando os impactos ambientais que estão envolvidos são multicausais e os fluxos do sistema em questão são de médio e longo prazo ou complicados de serem expressos (FILHO; JUNIOR; LUEDEMANN, 2016). Assim sendo, às vezes a ACV pode favorecer benefícios de curto prazo em vez dos de longo prazo.

Algumas empresas também possuem certo receio de divulgar informações acerca do seu processo produtivo, seja por causa da concorrência, plágio ou a

criação de uma imagem negativa da empresa (MIYAZATO, 2009 *apud* FILHO; JUNIOR; LUEDEMANN, 2016), que dificulta a obtenção de informações confiáveis e bases de dados completas (FILHO; JUNIOR; LUEDEMANN, 2016).

Ainda, a avaliação do ciclo de vida de um produto não possui uma metodologia única, gerando a possibilidade de resultados e interpretações diferentes, mesmo na aplicação da metodologia para o mesmo caso (HAUSCHILD *et al.*, 2013).

Tendo em visto estas limitações, houve a criação de uma alternativa: a avaliação simplificada do ciclo de vida (S-LCA).

2.5 Avaliação simplificada do ciclo de vida (S-LCA)

Nos anos 1990, a ideia de uma abordagem simplificada da ACV foi estabelecida na literatura científica internacional. Isso envolve reduzir o escopo, os custos e os esforços necessários para realizar um estudo de ACV (HUARACHI *et al.*, 2023).

Muitos profissionais possuem um grande obstáculo ao atender aos requisitos de recursos e dados das metodologias da ACV que seguem as recomendações da ISO 14040. A ACV detalhada ou completa necessita de muito tempo e recursos, o que acaba se tornando uma enorme barreira para a sua implementação generalizada, especialmente entre pequenas empresas. Além disso, à medida que os profissionais procuram técnicas menos custosas que forneçam informações úteis mais rápido e facilmente, o uso de procedimentos simplificados da ACV parece ser uma boa opção, visto que o desempenho ambiental de um produto pode ser determinado em muito menos tempo e por um custo muito menor (KIEMEL *et al.*, 2022).

As empresas precisam de expertise técnica para avaliar como produtos e serviços afetam o meio ambiente. Essa exigência está se expandindo à medida que cada empresa se esforça para atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Então, essas ferramentas simplificadas chamam bastante a atenção de empresas que estão empenhadas em cumprir os compromissos com os ODS, pois oferecem uma maneira descomplicada de comparar rapidamente diferentes tipos de itens ou serviços (ZAMAGNI *et al.*, 2008).

A ACV em escala total geralmente é quantitativa. No entanto, preocupações qualitativas podem, e devem, ser levadas em conta se a quantificação não for

possível (por motivos de tempo ou custo, por exemplo). Por outro lado, a ACV simplificada é uma ferramenta destinada a identificar “pontos críticos” ambientais e destacar o potencial significativo de mudanças ambientais (KIEMEL *et al.*, 2022).

Três categorias de técnicas simplificadas foram definidas: quantitativa, que se refere a metodologias de ACV simplificadas; semiquantitativa, que se refere a matrizes parcialmente quantificadas; e qualitativa, que se refere a matrizes, listas de verificação e painéis de especialistas (RIONDET *et al.*, 2024). A definição de Guinée *et al.* (2001) dessa técnica simplificada é fornecida na página 95 de sua publicação original: “uma ACV simplificada é uma variedade simplificada de ACV detalhada realizada de acordo com diretrizes que não estão totalmente em conformidade com as normas ISO 14040/44 e representa estudos que geralmente requerem de 1 a 20 dias de trabalho”.

O inventário do ciclo de vida, que é uma das etapas mais demoradas do processo, frequentemente é o alvo de esforços para aprimorar a metodologia. Esse objetivo tem sido possível devido à disponibilidade de softwares especializados e bancos de dados da ACV cada vez mais robustos. No entanto é necessária uma certa cautela para a compreensão completa dos sistemas (RUIZ-MÉNDEZ; GÜERECA, 2019).

Ao abranger todo o ciclo de vida de maneira superficial (por exemplo, usando dados genéricos qualitativos e/ou quantitativos), seguido de uma avaliação simplificada, o objetivo de simplificar a ACV é produzir resultados essencialmente equivalentes aos de uma ACV detalhada. Boas justificativas podem, em alguns casos, substituir o tratamento intensivo de dados e a coleta de dados que consomem recursos, embora todos os componentes pertinentes ainda devam ser incluídos. A análise deve fornecer uma avaliação completa da confiabilidade dos resultados, concentrando-se nas questões ambientais mais significativas, nas potenciais consequências ambientais, nos estágios do ciclo de vida e nas fases da ACV (GUINÉE; HEIJUNGS, 2017).

É simples aplicar avaliações quantitativas e abrangentes do ciclo de vida em produtos simples. Como a maioria dos produtos possui apenas algumas partes e tipos de materiais diferentes, as informações sobre os materiais frequentemente utilizados estão facilmente acessíveis. A situação é diferente para produtos complexos, no entanto, quando uma avaliação completa do ciclo de vida pode exigir um investimento significativo de tempo, dinheiro e um banco de dados de elementos

"menos comuns". Nessas situações, uma ACV simplificada é mais útil, especialmente nas fases iniciais do desenvolvimento do produto (HEIDARI *et al.*, 2019).

Tendo estas informações em mente, verifica-se a necessidade de conhecer estas ferramentas alternativas, pois as mesmas facilitam a análise dos impactos, além de gerar resultados em conformidade com a ACV completa.

3 METODOLOGIA

Para a realização do projeto, os objetivos específicos foram divididos em etapas, conforme consta resumidamente no quadro a seguir. No mesmo quadro, está apresentado também a metodologia e o método que foram adotados em cada etapa.

Quadro 3 - Descrição das etapas

Etapa	Objetivo Específico	Metodologia	Método
1	Identificar as principais ferramentas de avaliação simplificada de ciclo de vida	Pesquisa bibliográfica	RBS <i>Roadmap</i>
2	Definir critérios de aplicabilidade para ferramentas simplificadas de avaliação de ciclo de vida	Pesquisa bibliográfica	RBS <i>Roadmap</i>
3	Avaliar a aplicabilidade de cada ferramenta e determinar qual a mais vantajosa	Ranqueamento	SAW (<i>Simple Additive Weighting</i>)
4	Aplicar a ferramenta simplificada de avaliação de ciclo de vida selecionada em um caso real	Estudo de caso	Levantamento de dados e análise
5	Recomendar oportunidades de melhoria(s) no ciclo de vida do produto analisado	Estudo de caso	Levantamento de dados e análise

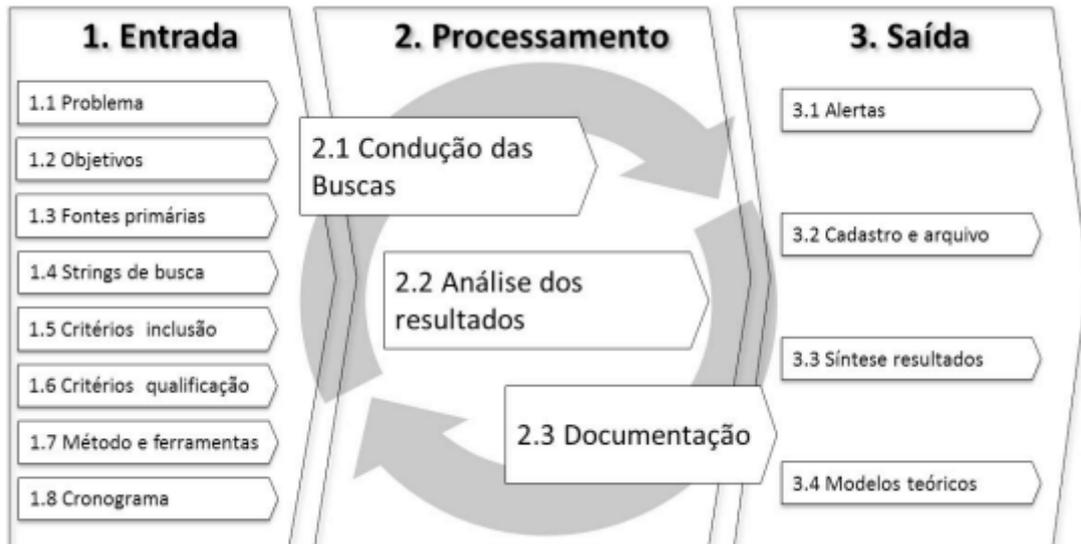
Fonte: Autoria própria (2025)

Para melhor entendimento, cada etapa será detalhada em seguida. As etapas 1 e 2 estão descritas junto, pois seguiram o mesmo procedimento e ocorreram ao mesmo tempo, visto que artigos utilizados para a segunda etapa foram os mesmos utilizados para a primeira etapa.

3.1 Etapa 1 e etapa 2

Nesta primeira etapa o objetivo foi identificar quais são as principais ferramentas de S-LCA. Para isso, adotou-se a metodologia de pesquisa bibliográfica, utilizando o método de revisão bibliográfica sistemática (RBS) *Roadmap*. Um esquema simplificado do método utilizado encontra-se na imagem a seguir.

Figura 3 - Modelo para condução da revisão bibliográfica sistemática



Fonte: Conforto, Amaral e Silva (2011)

O primeiro passo para realizar a revisão bibliográfica sistemática foi definir as entradas, como os objetivos e o problema de pesquisa, que já foram descritos anteriormente no presente projeto. Em seguida, escolheu-se as bases de dados onde foram feitas as buscas. Após, foi necessário determinar as *strings* de buscas e os operadores booleanos que foram utilizados para gerar apenas resultados pertinentes à pesquisa. Na tabela a seguir, constam as *strings* de buscas e as bases de dados escolhidas para esta pesquisa.

Tabela 1 - *Strings* de buscas e bases de dados

String de busca	Base de dados
("simplified life cycle assessment" OR "streamlined life cycle assessment" OR "simplified LCA" OR "streamlined LCA") AND "tools"	Web of Science Science Direct Scopus SciELO

Fonte: Autoria própria (2025)

Como critério de qualificação, selecionou-se apenas artigos publicados nos últimos 10 anos.

Para começar a fase de processamento, aconteceu a inserção das *strings* de busca e os filtros de qualificação nas bases de dados, onde registrou-se a quantidade de resultados obtidos. Para registro de referências, o software utilizado foi o Excel, onde os dados foram analisados e as duplicatas excluídas. Em seguida, ocorreu a leitura dos títulos e palavras-chaves dos artigos selecionados. Os artigos

que passaram neste primeiro filtro, foram para a próxima etapa, onde realizou-se a leitura do resumo e da introdução, elegendo os estudos considerados pertinentes, priorizando aqueles cujos temas e abordagens apresentavam maior relação com o objetivo deste projeto. Logo após, os mesmos foram lidos completamente e os artigos escolhidos foram documentados, também utilizando o Excel.

Na última fase, a fase da saída, foi feita a síntese crítica do conteúdo dos artigos, elencando autor(es), objetivos, resultados e conclusões. Nesta etapa também foi catalogado qual ferramenta simplificada de ciclo de vida é citada em cada estudo, concluindo o objetivo.

Para que o estudo pudesse ser melhor direcionado, foram selecionadas oito ferramentas encontradas, considerando a frequência associada a elas na literatura. Algumas também se destacaram pela relevância e difusão de estudos aplicados, sendo escolhidas por garantir análises fundamentadas em abordagens mais consolidadas e conhecidas pela comunidade científica.

A segunda etapa consistiu em definir os critérios ambientais e operacionais para as ferramentas simplificadas de avaliação de ciclo de vida. Para definir estes critérios foi utilizada a mesma revisão sistemática da bibliografia descrita na Etapa 1, ou seja, os mesmos artigos, buscando identificar estes requisitos nos artigos.

Com base nesses estudos encontrados, foi selecionado os critérios e elencado em ordem decrescente de importância, ou seja, atribuído o maior valor ao critério que deve ser o “mais importante” e o menor valor para o “menos importante”, utilizando os mesmos critérios de frequência e importância destacados pelos autores.

3.2 Etapa 3

Tendo em vista os critérios definidos na etapa anterior, e seu devido grau de importância, foi utilizado o método de avaliação multicritério (MCDM) denominado SAW (*Simple Additive Weighting*) para concluir o objetivo específico desta etapa, que é avaliar a aplicabilidade de cada ferramenta e determinar qual a mais vantajosa.

Segundo Chou *et al.* (2008) e Zanakis *et al.* (1998), citados por Rezende

(2012), o método apresenta resultados aceitáveis para a maioria dos problemas de seleção que possuem uma única dimensão. Além disso, de acordo com Tzeng e Huang (2011), o SAW é amplamente utilizado devido a sua simplicidade e facilidade de aplicação. Por estes motivos, foi o método de avaliação multicritério escolhido.

A ferramenta consiste em definir quais serão os critérios e as alternativas avaliadas, atribuir pesos aos critérios, atribuir notas para cada alternativa, normalizar os valores para ser possível compará-los (quando necessário), multiplicar o peso pela nota e depois somar os valores (REZENDE, 2012), conforme fórmula a seguir:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot r_{ji}$$

Onde:

- S_i representa a pontuação total da alternativa i , sendo $i = 1, 2, \dots, n$;
- w_j é o peso do critério j e $j = 1, 2, \dots, n$;
- r_{ji} é a nota da alternativa i para o critério j , e;
- n é o número total de critérios.

Ao final da aplicação do método, cada alternativa terá uma pontuação de desempenho (S_i) e o maior valor final indicará a preferência da alternativa (REZENDE, 2012).

No estudo, todas as ferramentas encontradas foram colocadas em uma tabela, junto com os requisitos. Para cada ferramenta foi dado um valor de peso entre um e três, de acordo com o grau de obediência a estes requisitos, sendo um atribuído para “insuficiente”, dois para “adequado” e três para “excelente”, conforme mostrado na figura a seguir.

Figura 4 - Grau de obediência

Grau de obediência	Valor atribuído
Excelente	3
Adequado	2
Insuficiente	1

Fonte: Autoria própria (2025)

Para chegar na pontuação final, o valor do peso, atribuído na etapa 2, foi multiplicado pelo valor dado nesta etapa, para cada critério. Ao final, os valores encontrados para cada ferramenta foram somados e a que obteve maior pontuação foi aplicada no estudo de caso.

3.3 Etapa 4

A etapa 4 consiste na aplicação da ferramenta considerada mais vantajosa em um caso real. Para isso, foi realizado um estudo de caso em uma indústria de pequeno porte do setor metalúrgico, localizada no interior do estado de São Paulo.

Durante o estudo, todas as informações que foram necessárias, ou consideradas importantes, foram coletadas com o proprietário do local, operadores, fornecedores e empresas que utilizam o produto, através de questionamentos diretos. Esse método garantiu que as informações fossem obtidas diretamente da fonte, assegurando a confiabilidade para o desenvolvimento do estudo. Feito o levantamento de dados, a ferramenta selecionada foi aplicada e as devidas análises ocorreram, verificando se a ferramenta foi realmente útil, se a resposta está de acordo com o esperado e se possíveis impactos podem ser amenizados de alguma forma.

Todo este processo foi realizado de forma presencial, com visitas na empresa, durou em torno de 6 meses e ocorreu entre julho de 2024 e janeiro de 2025, pois alguns dados precisaram ser revistos e atualizados.

3.4 Etapa 5

A etapa 5 consistiu na proposição de sugestões de melhorias, com base na análise dos resultados obtidos na etapa anterior, que envolveu o mapeamento e a avaliação das fases do ciclo de vida da peça. Observando as etapas mais críticas do desempenho ambiental, foi possível direcionar ações buscando uma maior eficiência no uso de materiais e energia, além da redução de impactos nas operações de produção.

As sugestões propostas também se basearam em estudos e constatações extraídas da literatura, que indicaram práticas que poderiam ser aplicadas para minimizar os efeitos ambientais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos estão divididos de acordo com cada etapa.

4.1 Etapa 1

No quadro abaixo, encontra-se a quantidade de artigos publicados selecionados, divididos em três fases da pesquisa: apenas busca de *strings* nas bases, após filtros de ano e remoção de duplicatas, e após análise crítica.

Quadro 4- Comparação de quantidade de artigos

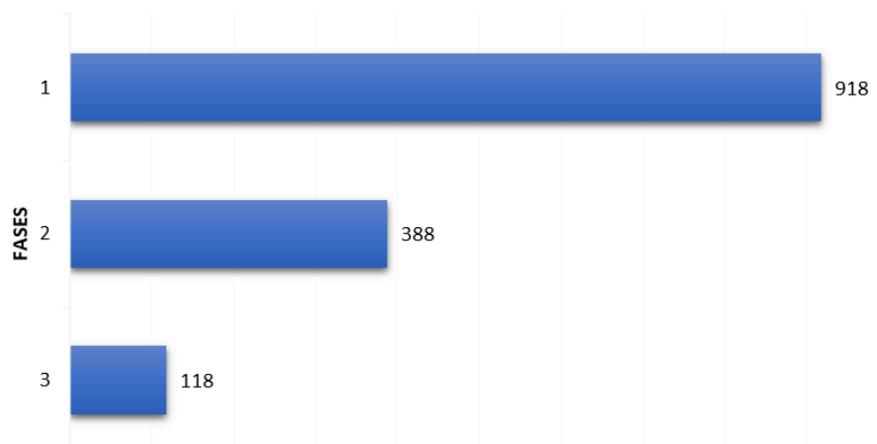
Bases de dados	Fase 1	Fase 2	Fase 3
<i>Web of Science</i>	90	45	10
<i>ScienceDirect</i>	907	358	176
<i>Scopus</i>	1156	315	102
<i>Scielo</i>	600	200.	100

Fonte: Autoria própria (2025)

Nesta etapa, após a inclusão das strings nos bancos de dados, foram obtidos mais de setecentos artigos que incluíam os termos. Após a definição dos anos de publicação (entre 2020 e 2025), catalogação e síntese crítica, a quantidade baixou para cerca de cem, resumidos no gráfico abaixo.

Gráfico 1- Comparação de quantidade de artigos

Aplicação do RBS Roadmap



Fonte: Autoria própria (2025)

Com a leitura dos artigos, identificou-se muitas ferramentas que podem ser consideradas como ferramentas simplificadas de ACV, porém, para que o estudo pudesse ser mais focado, foram catalogadas apenas oito, de acordo com a relevância encontrada. Estas, por sua vez, encontram-se na tabela a seguir, juntamente com o nome do artigo onde foi encontrado, os autores e o ano de publicação do mesmo:

Tabela 2 - Compilação dos métodos

Ferramenta	Ano de publicação	Autor(es)/Entidade(s)	Referência
Carbon Footprint Calculator	2008	World Wide Fund for Nature (WWF)	RAHN; WICKE; WENDE (2023)
EcoAudit	2006	Ansys	MORINI; RIBEIRO; HOTZA (2019)
Eco-It	1998	PRé Consultants	SUPPIPAT, S.; TEACHAVORASINSKUN; HU (2021)
Eco Indicator 99	1999	PRé Consultants	VERBITSKY; PUSHKAR, (2018)
Matriz ERPA	2010	Graedel and Allenby	ROSSI; GERMANI; ZAMAGNI (2016)
Matriz MECO	1997	Wenzel et al.	SUYANTO <i>et al.</i> (2023)
Matriz MET	1997	Brezet and Van Hemel	ZOMER <i>et al.</i> (2024)
OpenLCA	2010	Green Delta	POLLINI; ROGNOLI (2021)

Fonte: Aatoria própria (2025)

Nos tópicos a seguir, encontra-se uma rápida descrição a respeito de cada uma das ferramentas encontradas.

4.1.1 Carbon Footprint Calculator

Este método tem como objetivo calcular as emissões de gases de efeito estufa. Geralmente, o resultado desse cálculo é utilizado para estimar a quantidade de carbono associada a atividades humanas ou empresariais. O surgimento desta aplicação, em meados dos anos 2000, ocorreu em resposta à crescente conscientização a respeito das mudanças climáticas (EARTH.ORG, 2020).

Por se tratar de um tema amplamente discutido, atualmente existem diversas formas de calcular a pegada de carbono, seja por meio de sites de organizações governamentais, ONGs (Organização Não Governamental) ou plataformas gratuitas. Na maior parte dos casos, as ferramentas são intuitivas, basta fornecer algumas informações sobre o tema, o que torna a interação bastante amigável para o usuário. No entanto, por se tratarem de modelos prontos que, na

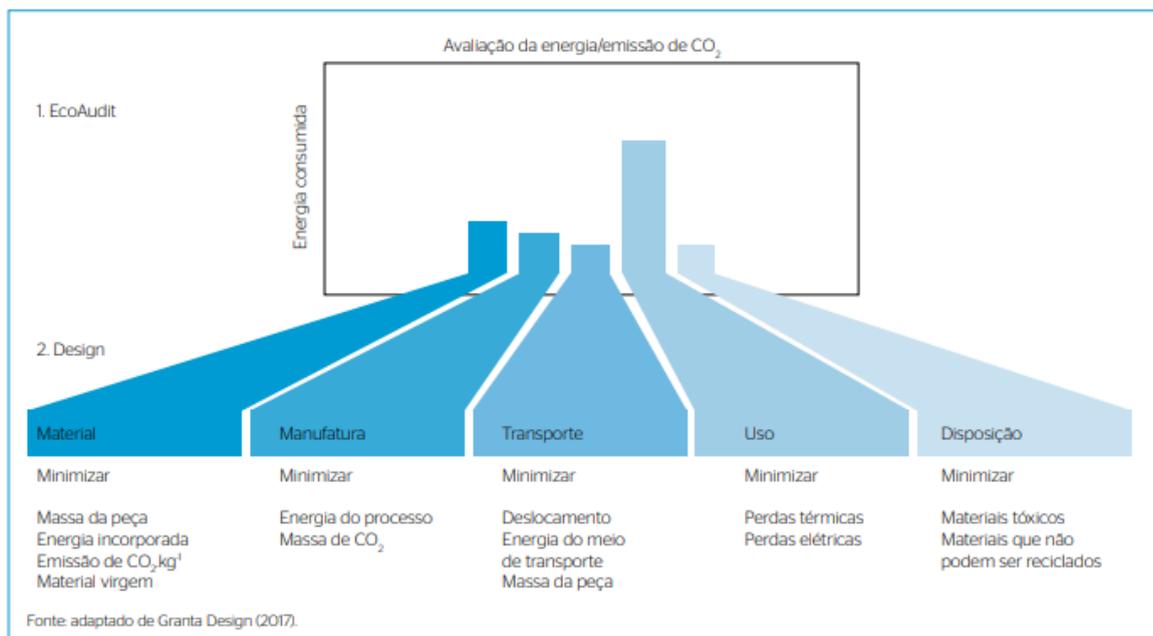
maioria das vezes, utilizam fatores médios de emissão, esse método acaba não levando em consideração outros impactos ambientais e podem retornar resultados imprecisos, caso os dados fornecidos sejam incompletos (SCRUCCA; *et al.*, 2021).

4.1.2 EcoAudit

O EcoAudit deriva da técnica de avaliação de ciclo de vida (ACV), mas o procedimento é simplificado, já que refere-se a quantidades limitada de dados de entrada e dados secundários que vêm de bancos de dados bem estabelecidos (BENEDETTI; *et al.*, 2010). Está incluso no software CES Edu Pack e é fornecido pela Granta Design, da Universidade Cambridge (GRANTA, 2018).

É um programa que considera cinco etapas principais do ciclo de vida de um produto: material (matéria-prima), manufatura (produção), transporte, uso e disposição final. Neste módulo, permite que seja feita uma análise sobre consumo de energia e emissão de CO₂ de cada material, considerando todo o ciclo de vida (MORINI; HOTZA; RIBEIRO, 2019), conforme mostrado na figura a seguir.

Figura 5 - EcoAudit



Fonte: Morini, Hotza e Ribeiro (2019)

Sua principal desvantagem é que a ferramenta utiliza apenas um conjunto customizado de indicadores (energia incorporada e emissões de CO₂), sem que outros parâmetros utilizados no estudo do ciclo de vida sejam incluídos (ASHBY; *et al.*, 2012).

4.1.3 Eco-It

A Eco-It foi desenvolvida na Holanda no final dos anos 1990 pela PRé Consultants (hoje chamada PRé Sustainability), empresa responsável pela criação do SimaPro. Seu objetivo principal é fornecer, de uma maneira simples e objetiva, a comparação e avaliação de impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto. O software utiliza metodologias de ACV padronizadas e banco de dados simplificados, facilitando o uso até mesmo para pessoas com pouco conhecimento no tema. A ferramenta tem como foco para profissionais que desejam incorporar critérios ambientais em suas tomadas de decisão, sem a necessidade de um estudo de ACV completo (SUPPIPAT; TEACHAVORASINSKUN; HU, 2021).

A interface Eco-It é mais simples, quando comparada com outros softwares como SimaPro e OpenLCA por exemplo, levando o usuário a resultados iniciais com pouco investimento de tempo e recursos. No entanto, em casos que são necessários níveis de detalhamento maiores e mais precisos a aplicação deixa a desejar, uma vez que os bancos de dados presentes no software são simplificados e utilizam médias para algumas medidas (SUPPIPAT; TEACHAVORASINSKUN; HU, 2021).

4.1.4 Eco Indicator 99

O Eco Indicator 99 foi desenvolvido pela PRé Consultants (atual PRé Sustainability) e foi lançado oficialmente em 1999. Diferentemente do SimaPro e da Eco-It, o Eco Indicator é, na verdade, um método de avaliação de impactos dentro do contexto de ACV. O método oferece uma forma de pesar (weighting) e agregar diferentes categorias de impacto ambiental para chegar a um indicador único (PRé, 2014).

O método abordado concentra-se em categorias de impacto em nível de danos finais (*endpoint*), como danos à saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos, convertendo esses impactos em uma única pontuação, facilitando a comparação entre diversos produtos ou cenários. Apesar de ser um método clássico e bastante documentado, pode ocultar algumas nuances importantes, visto que o objetivo é um indicador único (VERBITSKY; PUSHKAR, 2018).

4.1.5 Matriz ERPA

A matriz ERPA (*Environmentally responsible product assessment*) foi criada por Graedel e Allenby e baseia-se em um quadro 5 por 5 (5 colunas e 5 linhas), que combina diferentes estágios do ciclo de vida e os impactos ambientais. Inclui as etapas do ciclo de vida: pré-fabricação, manufatura, entrega do produto, uso, reforma e reciclagem, e descarte. Os impactos são divididos em: escolha do material, uso de energia, resíduos sólidos, resíduos líquidos e resíduos gasosos (BEEMSTERBOER; BAUMANN; WALLBAUM, 2020).

Segundo Rossi, Germani e Zamagni (2016), a avaliação ambiental é fornecida após a realização de quatro etapas. São elas: gerar uma pontuação de desempenho ambiental, realizar a ponderação (onde as fases mais críticas foram pontuadas com mais peso), cálculo da responsabilidade ambiental (multiplicação do desempenho ambiental pela ponderação) e prioridade de melhoria, de acordo com valor do impacto. Para cada elemento da matriz é dada uma nota que varia de 0 a 4, onde 4 representa desempenho ambiental superior, de acordo com as perguntas contidas no checklist de verificação.

4.1.6 Matriz MECO

Segundo SUYANTO *et al.* (2023), a Matriz MECO, desenvolvida por Wenzel *et al.* em 1997, é uma metodologia criada para facilitar a análise ambiental de produtos e processos industriais. Trata-se de uma abordagem simplificada da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), permitindo a identificação e classificação dos impactos ambientais ao longo das diferentes fases de um processo produtivo.

A matriz categoriza os impactos ambientais em quatro principais grupos:

- M (Materiais) – Refere-se ao uso de matérias-primas no processo produtivo.
- E (Energia) – Representa a quantidade de energia consumida.
- C (Químicos) – Relaciona-se à liberação de contaminantes e à geração de resíduos.
- O (Outros) – Abrange impactos diversos, como uso da terra, consumo de água e aspectos sociais.

Assim como outros métodos, a matriz MECO possui como principal desvantagem a subjetividade da avaliação.

4.1.7 Matriz MET

A matriz MET, desenvolvida por Brezet e Van Hemel, é uma abordagem qualitativa ou semi qualitativa, onde os critérios de avaliação são o ciclo de vida do material, o uso de energia e as emissões tóxicas (SUPPIPAT; TEACHAVORASINSKUN; HU, 2021). A matriz categoriza os impactos ambientais em três principais grupos:

- M (Materiais) - Representa a utilização de materiais em cada fase do ciclo de vida.
- E (Energia) - Representa a utilização de energia, onde o maior impacto se dá, geralmente, nas etapas de produção e transporte.
- T (Emissões Tóxicas) - Refere-se a saídas como emissões, efluentes e resíduos tóxicos produzidos no processo.

Sua principal desvantagem também se concentra na subjetividade das avaliações e na limitação de abrangência.

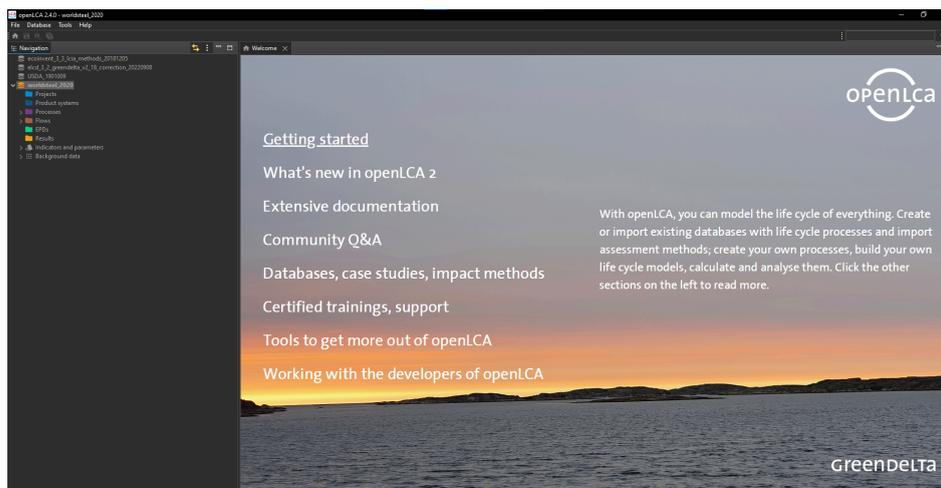
4.1.8 OpenLCA

O OpenLCA surgiu em meados de 2006, idealizado e desenvolvido pela empresa alemã GreenDelta, com o intuito de oferecer uma ferramenta de ACV de código aberto e que fosse acessível tanto ao meio acadêmico quanto a profissionais e empresas. Criado para difundir o acesso a estudos de impacto ambiental, o software funciona por meio de um sistema modular que permite ao usuário construir inventários e avaliar impactos ambientais com base em bancos de dados específicos (ISWARA; *et al.*, 2020).

Para utilizar o OpenLCA basta fazer o download do software, que é gratuito, e instalá-lo. Para seu correto funcionamento é necessário que o usuário tenha algum banco de dados de ACV.

A maior vantagem desse aplicativo é ser gratuito, possuir uma transparência metodológica, ser de código aberto e possuir uma vasta comunidade, que é muito ativa e compartilha atualizações e soluções em fóruns online. Por outro lado, destaca-se o fato que a curva de aprendizado para quem não está acostumado com a metodologia ACV é muito alta. A dependência de banco de dados externos acaba se tornando um fator bem determinante também para a opção desse método (ISWARA; *et al.*, 2020).

Figura 6 - OpenLCA



Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.9 Comparação entre as ferramentas

A fim de garantir uma maior compreensão, as vantagens e desvantagens de cada método foram listados em um quadro.

Quadro 5- Comparação de metodologias

Ferramentas simplificadas de ACV	Vantagens	Desvantagens
Carbon Footprint Calculator	Interface intuitiva e acessível; Amplamente disponível em plataformas; Ótimo para cálculos de emissões de gases do efeito estufa.	Possui escopo limitado, já que ignora outros impactos ambientais; Utiliza fatores médios de emissão, podendo gerar imprecisões; Resultados dependem da precisão dos dados de entrada inseridos pelo usuário.
EcoAudit	Análise rápida com quantidade limitada de dados; Abrange as cinco fases do ciclo de vida do produto; Baseia-se em banco de dados, produzindo dados confiáveis.	Permite a análise restrita de indicadores de energia e CO ₂ , deixando outros parâmetros de fora; Não permite personalização de critérios de avaliação; Requer licença do software.
Eco-It	Interface simples e direta, ideal para iniciantes; Utiliza metodologias padronizadas e bancos de dados simplificados; Resultados rápidos.	Precisão das análises limitadas; Bancos de dados baseados em médias genéricas.

Quadro 5 Continuação- Comparação de metodologias

Ferramentas simplificadas de ACV	Vantagens	Desvantagens
Eco Indicator 99	Gera um indicador único através da consolidação de diversas categorias ambientais, facilitando comparações; Foca em danos finais (saúde humana, ecossistemas e recursos); Método bem documentado e amplamente referenciado.	Simplificação excessiva pode ocultar informações importantes sobre impactos individuais; Menos utilizado em estudos recentes; Não permite análise multicritério detalhada.
Matriz ERPA	Estrutura clara, com <i>checklist</i> de verificação; Visão integrada; Aplicação rápida; Útil para análise inicial de processos industriais.	Alta subjetividade na avaliação; Não fornece dados quantitativos ou indicadores numéricos; Pouco utilizada em estudos complexos; Complexidade na interpretação.
Matriz MECO	Foco nos aspectos essenciais; Útil para análises iniciais; Visão integrada; Aplicação rápida.	Avaliação subjetiva; Pouco utilizada em processos complexos.
Matriz MET	Foco em aspectos essenciais; Abordagem semi-qualitativa; Simplicidade na aplicação.	Limitada a critérios pré-definidos; Subjetividade na avaliação; Limitação de abrangência; Não adequada para análises robustas.
OpenLCA	Código aberto e gratuito; Transparência metodológica, visto que permite a construção de inventários personalizados e análise mais detalhada; Suporte contínuo; Flexibilidade, permitindo adaptações conforme necessidade.	Curva de aprendizado elevada (requer conhecimentos); Dependência de bancos de dados externos; Complexo (requer tempo e dedicação).

Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 Etapa 2

Como mencionado anteriormente, essa etapa consistiu na análise detalhada das pesquisas, que tinha como objetivo definir critérios para serem usados na avaliação das ferramentas simplificadas, e conforme os objetivos do estudo, foi possível identificar seis principais parâmetros e seus respectivos grau de relevância, baseados na importância apontada pelos estudos e pela análise pessoal dos acadêmicos, destacados em ordem decrescente na tabela a seguir:

Tabela 3 - Compilação dos critérios

Ordem de Importância	Critérios	Referência
1	Facilidade de aplicação	CASSON, A.; et al. (2023)
2	Tempo necessário para análise	BUDIG, M.; et al. (2020); ALVIZU-PIÑA, V. A.; et al. (2023)
3	Confiabilidade dos resultados	BECCALI, A.; et al. (2016)
4	Abrangência da avaliação	CASSON, A.; et al. (2023)
5	Disponibilidade de dados	ASKAR, R.; et al. (2025)
6	Custos de implementação	CASSON, A.; et al. (2023)

Fonte: Autoria própria (2025)

O grau de relevância é extremamente importante na etapa 3, visto que quanto mais importante ele for, maior será o seu respectivo peso.

Para cada critério mencionado, houve a divisão de notas dadas de acordo com a descrição de cada critério, explicadas tendo como base as referências que encontram-se na tabela anterior, conforme consta a seguir:

Tabela 4 - Notas e descrição

Critérios	Notas	Descrição
Facilidade na aplicação	1	Pode ser usado por um número limitado de pessoas, especialmente pessoas qualificadas em aspectos ambientais, e/ou possui uma interface complexa
	2	Pode ser usado por grande parte das pessoas, porém pessoas parcialmente qualificadas em aspectos ambientais, e/ou possui uma interface um pouco mais difícil
	3	Pode ser usado por grande parte das pessoas, incluindo pessoas pouco qualificadas em aspectos ambientais, e/ou possui uma interface fácil
Tempo necessário para análise	1	Requer a disponibilização de uma grande quantidade de tempo para aplicação ou análise dos resultados, incluindo tempo para treinamentos e para coleta de dados
	2	Requer a disponibilização de quantidade moderada de tempo para aplicação ou análise dos resultados, incluindo tempo para treinamentos e para coleta de dados

Tabela 4 Continuação- Notas e descrição

Crítérios	Notas	Descrição
Tempo necessário para análise	3	Requer a disponibilização de pouca quantidade de tempo para aplicação ou análise dos resultados, incluindo tempo para treinamentos e para coleta de dados
	1	Confiabilidade limitada, com grandes margens de erros ou incertezas
Confiabilidade dos resultados	2	Confiabilidade moderada, com certa margem de erro que pode ser aceita, a depender do contexto
	3	Confiabilidade alta, com dados e métodos bem validados e precisos
Abrangência da avaliação	1	Abrange poucas etapas do ciclo de vida e/ou avalia impactos ambientais limitados
	2	Abrange parcialmente as etapas do ciclo de vida e/ou avalia parcialmente os impactos ambientais
	3	Abrange grande parte das etapas do ciclo de vida e/ou avalia grande parte dos impactos ambientais
Disponibilidade de dados	1	Disponibilidade de dados baixa ou escassa e/ou dificuldade para obter informações
	2	Disponibilidade de dados razoável e/ou requer um grau moderado de esforço para obter informações
	3	Disponibilidade de dados satisfatória e/ou facilidade para obter informações
Custos de implementação	1	Necessita de um alto custo para baixar a ferramenta ou para aplicá-la (treinamentos e consultorias)
	2	Necessita de um médio custo para baixar a ferramenta ou para aplicá-la (treinamentos e consultorias)
	3	Necessita de um baixo custo para baixar a ferramenta ou para aplicá-la (treinamentos e consultorias), ou não tem custo

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3 Etapa 3

Esta etapa consistiu no ranqueamento das ferramentas com base nos critérios mencionados anteriormente, utilizando o método SAW.

Os pesos dos critérios foram alocados da seguinte forma:

- Peso 1: custos de implementação;
- Peso 2: disponibilidade de dados;
- Peso 3: abrangência da avaliação
- Peso 4: confiabilidade dos resultados;
- Peso 5: tempo necessário;
- Peso 6: facilidade de aplicação.

As características das ferramentas foram analisadas e pontuadas com base nos artigos lidos sobre cada uma delas e, no caso dos softwares, também foi realizada a busca nos sites oficiais, com o objetivo de encontrar o seu respectivo custo.

As pontuações parciais e finais podem ser vistas no quadro abaixo.

Quadro 6- Ranqueamento das ferramentas simplificadas de ACV

Critérios (com respectivo índice)	Ferramentas simplificadas de ACV							
	Carbon Footprint Calculator	EcoAudit	Eco-It	Eco Indicator 99	Matriz ERPA	Matriz MECO	Matriz MET	OpenLCA
Facilidade de Aplicação (6)	3	2	3	2	3	3	2	1
Tempo (5)	2	2	2	2	2	3	3	1
Confiabilidade (4)	2	2	2	2	2	2	2	3
Abrangência (3)	1	2	2	3	2	2	2	3
Disponibilidade de dados (2)	2	2	2	3	2	2	2	3
Custos (1)	3	3	3	2	3	3	3	2
Total (\sum Índice x Grau de Obediência)	46	43	49	47	49	54	48	40

Fonte: Autoria própria (2025)

Das ferramentas citadas, as que menos pontuaram foram a EcoAudit e a OpenLCA. Isso não significa que elas não são boas, apenas não se encaixam tão

adequadamente no objetivo deste trabalho e nos critérios citados. A EcoAudit exige um pouco mais de conhecimento técnico (é mais complexa), o que pode gerar dificuldades para aplicar de forma eficaz e interpretar os resultados. Além disso, pode demorar mais para ser implementada, pois necessita de mais tempo para preenchimento de dados específicos.

Já a ferramenta OpenLCA acaba não se encaixando, visto se tratar de um software. Embora tenha uma interface menos complicada, ainda exige conhecimento técnico mais avançado sobre ACV, fontes de dados e configurações de parâmetros, o que também acaba impactando negativamente no critério de tempo. Pensando em uma abordagem que necessita um nível melhor de detalhamento, ela seria uma ótima opção.

Como pode-se observar pela tabela, com base no método SAW a escolha foi a matriz MECO, visto que obteve a maior pontuação final, apesar de não haver uma diferença tão significativa na comparação. Pode-se elencar como vantagens a análise simplificada e ágil, e com baixos custos, pensando em avaliações mais simplificadas, já que suas abrangências são limitadas. Ela permite que a análise seja realizada de forma rápida, sem utilizar ferramentas complexas ou grande quantidade de dados, o que a torna ótima para situações em que o tempo é restrito e os recursos limitados. Ainda, por ser fácil de aplicar, permite uma visão geral eficiente dos principais impactos ambientais envolvidos, garantindo que seja um recurso útil em casos onde as pessoas não têm conhecimentos mais detalhados das técnicas de ACV ou casos que uma avaliação detalhada não é essencial.

4.4 Etapa 4

Após a escolha da ferramenta (Matriz MECO), a mesma foi aplicada em um estudo de caso em uma indústria do setor metalúrgico de pequeno porte, localizada no interior do estado de São Paulo, que produz cabeçote fresador com haste.

.Fotografia 1 - Cabeçote fresador com haste



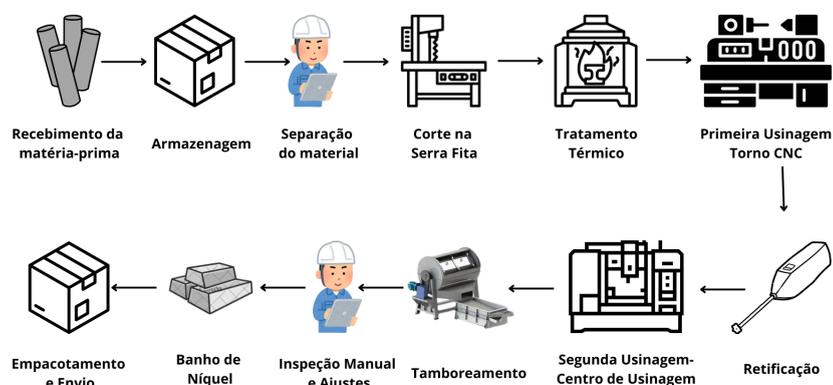
Fonte: Autoria própria (2025)

Para que fosse possível realizar o estudo, foi necessário primeiro conhecer o processo de produção das peças.

4.4.1 Descrição das etapas de produção

O processo de produção do cabeçote está exemplificado na figura a seguir:

Figura 7 - Etapas de produção do cabeçote



Fonte: Autoria própria (2025)

A matéria-prima utilizada é o aço 4140, adquirido de um distribuidor localizado na região de Campinas-SP. O aço chega na indústria e é armazenado em um depósito, junto com outros materiais.

O processo de fabricação se inicia com a separação do material no estoque, feita por um funcionário. O aço é levado até uma serra fita, onde é cortado de acordo com as especificações da ordem de serviço. Após o corte, o material é separado em

caixas conforme a quantidade do pedido, porém para este estudo o foco será a produção de uma única peça.

O material cortado então é enviado para tratamento térmico, onde é submetido a processos para aumento de dureza e resistência ao desgaste. Quando retorna do tratamento, passa pelo torno CNC, que dá à peça o formato inicial.

Depois, a peça é enviada para a retífica, onde as medidas são ajustadas com extrema precisão e volta para o centro de usinagem, momento em que são realizados alojamentos e ajustado o formato final da peça, etapa conhecida como segunda usinagem.

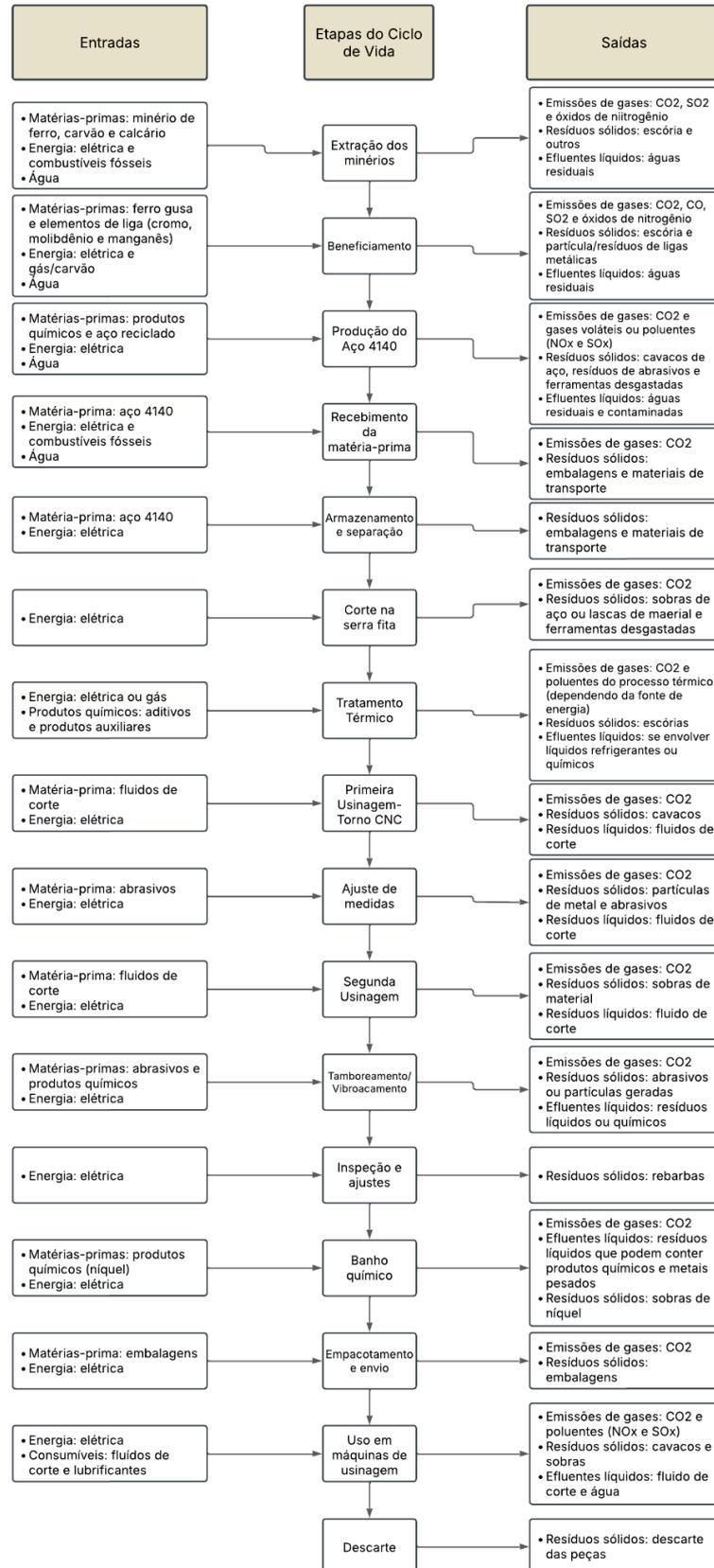
Após a segunda usinagem, a ferramenta passa por um processo de tamboreamento ou vibroacabamento, para melhorar a qualidade da superfície. Então é feita uma inspeção manual e, se necessário, as rebarbas são removidas à mão.

Depois da inspeção e dos reparos necessários, a peça é submetida a um banho químico de níquel, que confere o acabamento final. Enfim a peça está finalizada e é armazenada no estoque. O envio é realizado por uma transportadora, conforme o pedido do cliente.

4.4.2 Ciclo de vida da peça

Para compreender melhor a aplicação da matriz MECO, foi elaborado um fluxograma contendo todo o ciclo de vida do cabeçote, desde a extração dos minérios até o descarte da peça, além das entradas e saídas em cada fase.

Figura 8 - Ciclo de vida do cabeçote fresador com haste



Fonte: Autoria própria (2025)

Pode-se observar que a maioria das entradas incluem o consumo de energia elétrica, assim como está presente na maioria das saídas, a emissão de gases como CO₂.

4.4.3 Aplicação da ferramenta escolhida no caso real

Para começar, foi definido o objetivo da aplicação da ferramenta. A avaliação buscou identificar quais etapas impactavam mais durante o ciclo de vida da peça para que assim pudesse ser proposto melhorias no processo ou estratégias para reduzir. O ciclo de vida do produto foi considerado desde a extração da matéria-prima até o descarte após uso, ou seja, extração, fabricação, distribuição, uso e fim de vida.

Considerou-se os dados para a fabricação e uso de apenas uma peça e referentes à emissões de gases, consumo de energia e geração de resíduos.

4.4.3.1 Estimativa do Consumo Energético

Para mensurar o impacto energético relacionado à fabricação do aço 4140, foram coletados dados sobre o uso e energia em cada etapa do processo produtivo. Os cálculos basearam-se em fontes acadêmicas, referências do setor metalúrgico e na fabricação de uma ferramenta com dimensões de 25 mm de diâmetro e 180 mm de comprimento, pesando aproximadamente 1 kg (peso obtido através de medição na própria empresa, após todo o processo de fabricação da peça). Por este motivo, utilizou-se o consumo energético referente a 1 kg durante todas as etapas, exceto na fase de mineração e beneficiamento, pois para se obter 1 kg de aço é necessário aproximadamente 1,7 kg de minério (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020).

Para melhor compreensão, os consumos estão divididos de acordo com as fases do ciclo de vida, para depois estimar o consumo total.

1. Mineração e beneficiamento: a extração e o beneficiamento do minério de ferro envolvem operações como lavra, britagem, peneiramento e concentração. A fase de mineração apresenta um consumo energético médio de 0,15 MJ/kg, enquanto o beneficiamento, que inclui a fragmentação do minério para aumentar sua pureza, adiciona um consumo estimado de 0,036 MJ/kg. Além disso, a pelletização, etapa utilizada para transformar o minério beneficiado em um formato

apropriado para os altos-fornos, requer cerca de 0,5 MJ/kg. Dessa maneira, o consumo total estimado para a fase de mineração e beneficiamento é de aproximadamente 0,686 MJ/kg. Considerando que, para a produção de 1 kg de aço, são necessários 1,7 kg de minério, estima-se que o consumo energético para produção de 1 kg de aço seja de 1,17 MJ (JONUSAN, 2017; ROSA, 2019; ABM, 2020).

2. Produção do aço: A transformação do minério de ferro em aço abrange diversas etapas, incluindo a redução em alto-forno, refino e adição de elementos de liga. Durante a redução no alto-forno, onde o ferro-gusa é obtido por meio da fusão do minério com coque e calcário, o consumo energético estimado é de 13,8 MJ/kg. Na etapa de refino siderúrgico, onde o ferro-gusa é convertido em aço por meio da remoção de impurezas e ajuste da composição química, o consumo médio é de 2,5 MJ/kg. Além disso, a incorporação dos elementos de liga necessários para a produção do aço 4140 acrescenta um consumo energético de aproximadamente 0,5 MJ/kg. Após a produção da liga, o material passa por processos de conformação mecânica, como laminação ou forjamento, que consomem cerca de 1,2 MJ/kg. Por fim, tratamentos térmicos como têmpera e revenimento são aplicados para assegurar as propriedades mecânicas desejadas, adicionando um consumo estimado de 1,5 MJ/kg. Assim, na fase de produção do aço, o consumo total estimado é de 19 MJ/kg (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020).
3. Processos Industriais: Após a obtenção do aço 4140, a fabricação da peça envolve diversas operações industriais. Para estimar o impacto energético dessa fase, foram utilizadas medições diretas sempre que possível, bem como estimativas baseadas nas especificações dos equipamentos e no tempo de operação.
 - Corte do Material: O corte é realizado em uma serra fita com potência de 1,3 kWh. Considerando o tempo médio de corte, o consumo energético dessa etapa é de 0,78 MJ;
 - Tratamento Térmico: O aço passa por um processo de aquecimento a 855°C, seguido de têmpera e revenido a 200°C. O consumo energético para essa etapa é de 2,5 MJ;

- Primeira Usinagem: A peça é usinada no torno CNC Romi Centur 30D, que possui um motor principal de 9 kW. Como a usinagem dura 10 minutos, o consumo energético é de 3,24 MJ;
- Retífica: A retificação ocorre em uma máquina de 5 kW operando por aproximadamente 20 minutos, resultando em um consumo de 6 MJ;
- Segunda Usinagem: O centro de usinagem ROMI DCM 620-5X opera com um motor de 18 kW. Considerando que a peça permanece na máquina por 20 minutos, o consumo energético dessa etapa é de 21,6 MJ;
- Tamboreamento e Acabamento Manual: O tamboreamento ocorre em um equipamento de pequeno porte com potência de 1 kW, operando por 30 minutos. O consumo energético dessa etapa é de 1,8 MJ;
- Banho Químico de Níquel: O processo de banho químico requer controle térmico e movimentação de fluido, resultando em um consumo estimado de 1,8 MJ;
- Armazenamento e Envio: O transporte médio ocorre em um raio de 200 km, representando um consumo energético de 0,06 MJ por peça.

Para os equipamentos de usinagem e corte, o consumo foi obtido a partir das especificações dos motores elétricos e o tempo médio de operação para a etapa. Já o consumo energético para o tratamento térmico foi calculado com base na potência do forno e no tempo necessário para atingir e manter as temperaturas especificadas para a têmpera e o revenido. E para o banho químico de níquel, o consumo foi estimado a partir da potência dos sistemas de aquecimento e movimentação do fluido de banho e o tempo de operação.

Assim, o consumo total estimado para o processo produtivo da peça é de 37,78 MJ.

Somando todas as fases do ciclo produtivo, têm-se:

Quadro 7 - Consumo Total de Energia

Fases	Consumo de Energia	Referência
Mineração e Beneficiamento	1,17 MJ/kg	JONUSAN, 2017; ROSA, 2019; ABM, 2020
Produção do Aço	19 MJ/kg	WORLD STEEL ASSOCIATION, 2020
Processamento Industrial	37,78 MJ/kg	Medições
Total (Σ Consumo de Energia)	57,95 MJ/kg	-

Fonte: Autoria própria (2025)

4.4.3.2 Matriz MECO aplicada no estudo

Ao passo que os dados foram coletados, distribuiu-se na matriz MECO que encontra-se a seguir:

Tabela 5 - Compilação dos dados

Fase do Processo	Materials	Energy (MJ/kg)	Chemicals	Others
Mineração e Beneficiamento	Obtenção do minério	1,17	Explosivos e floculantes	Resíduos de mineração e consumo de água
Produção do Aço	Transformação do ferro-gusa em aço e inclusão de ligas	19	Carbono e gases redutores	Emissões de gases como CO ₂ e poluentes como NO _x e SO _x , além de resíduos sólidos
Corte do material	Nenhuma adição ou perda significativa de material	0,78	Lubrificante para corte	Lascas de material
Tratamento Térmico	Nenhuma adição ou perda significativa de material	2,5	Óleos de têmpera	Emissões térmicas no ambiente e de gases
Primeira Usinagem	Perda de aproximadamente 5% do material em cavacos	3,24	Óleos de corte e fluidos refrigerantes	Cavacos metálicos
Retífica	Ajuste final com remoção mínima de material	6,0	Fluidos de retificação	Descarte de pó metálico
Segunda Usinagem	Perda de aproximadamente 3% do material em cavacos	21,6	Óleos de corte e fluidos refrigerantes	Cavacos metálicos
Tamboreamento e Acabamento	Pequeno desgaste superficial	1,8	Aditivos abrasivos	Resíduos abrasivos

Tabela 5 Continuação- Compilação dos dados

Fase do Processo	Materials	Energy (MJ/kg)	Chemicals	Others
Banho químico de níquel	Camada de níquel	1,8	Ácidos (sulfato de níquel, cloreto de níquel e ácido bórico)	Efluentes químicos
Armazenamento e Envio	Nenhuma adição ou perda significativa de material	0,06	Combustível para transporte	Emissões de gases no transporte
Uso da Ferramenta	Desgaste progressivo da peça	0,5	Lubrificantes industriais	Desgaste de materiais e resíduos metálicos
Descarte	Nenhuma adição ou perda significativa de material	0,1	-	Resíduos finais

Fonte: Autoria própria (2025)

Após a elaboração, utilizou-se uma nova matriz MECO, com a mesma base, porém atribuindo notas para os impactos ambientais referentes à cada etapa. A escala utilizada foi de 1 a 3, onde 1 representa um baixo impacto e 3 um alto impacto.

Tabela 6- Atribuição de notas

Fase do Processo	Materials	Energy	Chemicals	Others	Pontuação
Mineração e Beneficiamento	2	1	2	2	7
Produção do Aço	3	3	3	3	12
Corte do material	1	1	2	1	5
Tratamento Térmico	1	2	2	2	7
Primeira Usinagem	2	2	1	2	7
Retífica	1	2	1	1	5
Segunda Usinagem	2	3	1	2	8
Tamboreamento e Acabamento	1	1	2	2	6
Banho químico de níquel	1	2	3	2	8
Armazenamento e Envio	1	1	1	1	4
Uso da Ferramenta	1	1	2	1	5
Descarte	1	1	1	2	5

Fonte: Autoria própria (2025)

4.5 Etapa 5

A avaliação ambiental do processo produtivo do cabeçote fresador com haste, baseada na matriz MECO (Matéria, Energia, Químicos e Outros), identificou três etapas críticas: produção da liga de aço 4140, segunda usinagem e banho químico de níquel.

A produção da liga de aço 4140, etapa externa à empresa devido à aquisição de tarugos prontos, destacou-se pelo consumo energético elevado (aproximadamente 19 MJ por kg), uso intensivo de agentes químicos (como carbono e gases redutores) e emissões associadas ao refino e composição da liga metálica. Essa fase obteve pontuação máxima (3) em todas as categorias analisadas, consolidando-se como o principal vetor de impactos indiretos no ciclo de vida do produto.

Dentre as etapas internas, a segunda usinagem apresentou o maior consumo energético direto (21,6 MJ por peça), além de gerar resíduos metálicos e utilizar fluidos de corte, resultando em classificação máxima (3) para energia e moderada (2) para químicos e resíduos. Paralelamente, o banho químico de níquel obteve alta pontuação devido ao uso de soluções eletrolíticas, consumo energético moderado para aquecimento do banho e necessidade de tratamento especializado de efluentes químicos, com destaque para o risco associado à toxicidade do níquel.

Apesar de não conseguir interferir diretamente na etapa da produção da liga, pode se buscar a integração de tecnologias limpas e colaboração com fornecedores alinhados à economia circular.

Considerando o controle operacional sobre as etapas internas, são propostas as seguintes ações estratégicas:

1. Adoção de Fontes Renováveis: A instalação de painéis solares para suprir parte da demanda energética dos processos de usinagem e aquecimento do banho químico reduziria a dependência de fontes não renováveis.
2. Modernização de Equipamentos: A substituição de máquinas CNC por modelos com maior eficiência energética e sistemas de recuperação de energia diminuiria o consumo na segunda usinagem. Ainda, a implementação de fluidos de corte biodegradáveis e a reciclagem sistemática de cavacos metálicos mitigariam impactos químicos e residuais.
3. Gestão Sustentável do Banho de Níquel: A implantação de sistemas de filtragem em circuito fechado permitiria a reutilização da solução eletrolítica, reduzindo o consumo de água e insumos. Adicionalmente, a pesquisa por alternativas menos tóxicas, como revestimentos à base de zinco-níquel, minimizaria riscos ambientais e ocupacionais.

5 CONCLUSÃO

A busca por identificar ferramentas simplificadas de avaliação de ciclo de vida (ACV) tem se tornado cada vez mais importante no contexto atual, onde empresas e indústrias buscam estratégias sustentáveis mais eficientes, aliadas a ferramentas sem a complexidade dos métodos tradicionais. Com a crescente demanda por sustentabilidade e pelo entendimento dos impactos ambientais, a ACV simplificada se torna fundamental, visto que é uma maneira capaz de fazer a integração entre a avaliação ambiental e o cotidiano das pessoas. Assim, ferramentas, como a Matriz MECO, são uma alternativa acessível e útil, que permitem que organizações menores realizem a avaliação sem necessitar de especialistas e uso de softwares complexos. Baseado nos critérios definidos, como facilidade de aplicação, tempo, confiabilidade de resultados, abrangência da avaliação, disponibilidade de dados e custo de implementação, este projeto recomenda a Matriz MECO em casos que não há uma necessidade de avaliação complexa.

Em relação ao estudo de caso, a aplicação da matriz MECO se mostrou uma forma muito eficaz de realização de análise dos impactos ambientais, já que forneceu uma visão clara, simplificada, de forma rápida e sem custo, dos impactos do processo de produção do cabeçote fresador com haste, podendo se estender à outros processos de usinagem. Ao facilitar a identificação das etapas do ciclo de vida do produto que são mais prejudiciais (produção da liga de aço, segunda usinagem e banho químico de níquel) e que poderiam ter melhorias, diminuindo assim o impacto que causam, foi possível propor a adoção de estratégias como fontes de energia renováveis, a modernização de equipamentos e a gestão sustentável do processo.

Apesar das suas limitações, como em relação a abrangência, a matriz MECO pode ser bastante útil em pequenas empresas, que não possuem recursos para realização de uma ACV completa. Além disso, ela permite que estas empresas identifiquem oportunidades de melhoria ambiental, sem a complexidade da análise de uma avaliação completa, que demanda tempo, custo e pessoal especializado. Assim, essa metodologia pode ser a porta de entrada para implementação de ações sustentáveis, melhorando sua competitividade de mercado e reduzindo possíveis impactos ambientais causados.

Como a MECO é limitada, ou seja, não considera todos os aspectos ambientais possíveis durante o ciclo de vida de um produto ou processo, como impactos sobre a biodiversidade e efeitos de longa duração, para trabalhos futuros é interessante a aplicação de outras ferramentas simplificadas, a título de comparação de resultados, o desenvolvimento de uma versão mais robusta da ferramenta e a possível integração com outras metodologias, aprimorando assim a análise.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, J. L. S. de; *et al.* Sistema de gestão ambiental e ISO 14000 na indústria têxtil- A sustentabilidade como tendência. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v.19, n. 2, p. 575-586, mai-ago. 2015.

ALVARENGA, R. P.; QUEIROZ, T. R.; RENOFIO, A. Avaliação do ciclo de vida simplificada: um levantamento bibliográfico sobre as mais recentes publicações nacionais e internacionais. *In: XXXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Anais [...]* Bento Gonçalves, 2012. p. 01-13.

AMARAL, T. O. de. **Avaliação Comparativa do Ciclo de Vida entre rótulos de papel e polipropileno para embalagens descartáveis utilizando a abordagem do berço ao portão de fábrica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)- Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ARAGÓN, A.; ALBERTI, M. G. Limitations of machine-interpretability of digital EPDs used for a BIM-based sustainability assessment of construction assets. **Journal of Building Engineering**, v. 96, Art 110418, 1 nov. 2024.

ARAUJO JUNIOR, E. A. S. de. Debate sobre a teoria da renda da terra no contexto agrícola, urbano e atual no Brasil. **Cad. Metrop.**, São Paulo, v. 22, p.705-728, 2020.

ARVIZU-PIÑA, V. A.; *et al.* An open access online tool for LCA in building's early design stage in the Latin American context. A screening LCA case study for a bioclimatic building. **Energy & Buildings**, v. 295, Art 113269, 2023.

ASHBY, M.F.; MILLER, A.; RUTTER, F.; SEYMOUR, C.; WEGST, U.G.K. (2012a) **CES-EduPack for Eco Design - A whitepaper.** Cambridge: Granta. Disponível em: <<https://grantadesign.com/education/ces-edupack/editions/>>. Acesso em: 08 fev. 2025.

ASHBY; M.; *et al.* The CES EduPack Eco Audit Tool- A White Paper. Cambridge: Granta. Disponível em: <https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Material_de_referencia/Ashby%20-%20ecoaudit.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14001:** Sistemas de gestão ambiental- Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:** Gestão ambiental- Avaliação do ciclo de vida- Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044:** Gestão ambiental- Avaliação do ciclo de vida- Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BANIYA, B. *Circularity in Facility Management: Concencptualisation and Potential Areas for Circullarity-Oriented Actions*. **Sustainable**, v. 15, Art 8460, 2023.

BARBOSA, P.B. *Avaliação de Risco e Impacto Ambiental*. São Paulo: Saraiva Educação, 2017. E-book. Disponível em: https://play.google.com/store/books/details?id=EYywDwAAQBAJ&rdid=book-EYywDwAAQBAJ&rdot=1&source=gbs_atb&pcampaignid=books_booksearch_atb. Acesso em 09 maio 2023.

BBC NEWS BRASIL. **Da Eco-92 à Rio+20**: Duas décadas de debate ambiental. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2012/06/120612_grafico_eco92_rio20_pai. Acesso em: 9 maio. 2023.

BEEMSTERBOER, S.; BAUMANN, H.; WALLBAUM, H. *Ways To Get Work Done: a review and systematisation of simplification practices in the LCA literature*. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**. v. 25, p. 2154-2168, 2020.

BOETTCHER, M. **Revolução Industrial- Um pouco de história da Indústria 1.0 até a Indústria 4.0**. LinkedIn. 26 nov. 2015. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-um-pouco-de-hist%C3%B3ria-da-10-at%C3%A9-boettcher>. Acesso em: 05 maio 2023.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, de 05 de outubro de 1988**. Brasília: Casa Civil, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 11 maio 2023

BRASIL. **Lei n.6938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9610.htm. Acesso em: 11 maio 2023.

BRASIL. **Lei n.12305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Casa Civil, 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 11 maio 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA n. 1, de 23 de janeiro de 1986**. Considerando a necessidade de se estabelecerem as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília: Casa Civil, 1986. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9610.htm. Acesso em: 11 maio 2023.

CAJAZEIRA, J. E. R. **ISO 14001**: manual de implementação. Rio de Janeiro, 1998.

CARVALHO, T. U. da S.; *et al.* *Caracterização do aço SAE-4140 temperado em água, salmoura e óleo e, posteriormente, revenido*. *In*: 15º ENEMET- Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia metalúrgica, de materiais e de Minas.15, 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro, 2015. p. 3034-3040.

CASSON, A.; *et al.* Simplified environmental impact tools for agri-food system: A systematic review on trends and future prospective. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 102, Art 107175, 2023.

CHRISTIANSEN, K; *et al.* **Simplifying LCA**: Just a cut? SETAC, 1997.

CLAUDINO, E. S.; TALAMINI, E. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio- Uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p.77-85, 2013.

CONFORTO, E. C.; SILVA, S. L. da. Roteiro para Revisão Bibliográfica Sistemática: Aplicação no Desenvolvimento de Produtos e Gerenciamento de Projetos. *In: VIII Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto*. V. 8, 2011, Porto Alegre. **Anais [...]** Porto Alegre, 2011.

CORRÊA, F. J.; SCHAEFFER, L. Comparação das propriedades mecânicas do aço AISI 4140 no estado recozido e no estado normalizado. **Revista FORGE**, Porto Alegre, 2013

CURRAN, M. A. Environmental Life-Cycle Assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Nova Iorque, v. 1, p. 179-179, 1996.

DALMORA, G.; LUZZI, K.; HEMKEMEIER, M. A contribuição da análise do ciclo de vida (ACV) para a minimização dos impactos ambientais de processos produtivos: uma abordagem teórica. **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 4, n. 2, 2023.

DE BENEDETTI, B.; TOSO, D.; BALDO, G.L.; ROLLINO, S. EcoAudit: a renewed simplified procedure to facilitate the environmental informed material choice orienting the further Life Cycle Analysis for ecodesigners. **Materials Transactions**, v. 51, n. 5, p. 832-837, 2010.

EARTH ORG. Explainer: What Is the Carbon Footprint and Why Does It Matter in Fighting Climate Change? **Climate Change**. 9 fev. 2023. Disponível em: <https://earth.org/what-does-carbon-footprint-mean/>. Acesso em: 08 fev. 2025.

FABI, A.R.; ENSINAS, A.V.; MACHADO, I.P.; BIZZO, W.A. Uso da avaliação de ciclo de vida em embalagens de plástico e de vidro na indústria de bebidas no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 47-54, agosto 2005.

FACHINI, T. **Lei de Crimes Ambientais: tipos e penas previstas na Lei 9605/98**. Disponível em: <https://www.projuris.com.br/blog/lei-de-crimes-ambientais/#:~:text=Qual%20é%20a%20Lei%20de,crimes%20contra%20o%20meio%20ambiente.>>. Acesso em: 11 maio. 2023.

FAHIMI, A.; *et al.* Evaluation of the sustainability of technologies to recycle spent lithium-ion batteries, based on embodied energy and carbon footprint. **Journal of Cleaner Production**, v. 338. Art 130493, 1 mar. 2022.

FARIAS, A. R.; CASTRO, B. T. P.; FERREIRA, W. S. Impactos Ambientais ocasionados pelos processos produtivos de minério de ferro. **Scientia Amazonia**, v. 8, n. 1, p. 20-33, 2019.

FAVA, J. A. A technical framework for life-cycle assessments. **Society of Environmental Toxicology and Chemistry: SETAC Foundation for Environmental**, Vermont, p. 134, 1991.

FILHO, O. C.; JUNIOR, N. L. S.; LUEDEMANN, G. A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para formulação de políticas públicas no Brasil. **Texto para discussão-Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)**, Brasília, v. 2205, jun. 2016.

FINNVEDEN, G.; POTTING, J. Life Cycle Assessment. **Encyclopedia of Toxicology**, v. 3, p. 74-77, 2014.

FRANÇA, B.; OSATO, T. **Rachel Carson, a primeira ambientalista a alertar sobre os impactos do DDT**. Revista Galileu, 2021. Disponível em: Rachel Carson, a primeira ambientalista a alertar sobre impactos do DDT - Revista Galileu | História (globo.com). Acesso em: 07 maio 2023.

FRAZÃO, D. Thomas Malthus. **Biografia**, 2018. Disponível em: https://www.ebiografia.com/thomas_malthus/. Acesso em: 07 maio 2023.

FREITAS JÚNIOR, G. A. de. **Recursos naturais e desenvolvimento econômico: uma revisão do debate teórico**. 2012. Dissertação (Mestrado em Economia Política) - Programa de Pós-Graduação em Economia Política, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2012.

GRAEDEL, T.; SAXTON, E. Improving the Overall Environmental Performance of Existing Telecommunications Facilities. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.7, p. 219-224, 2002.

GRANTA DESIGN. (2018) *Granta's Eco Audit methodology*. **Granta Design**. Disponível em: <http://www.grantadesign.com/eco/audit.htm>. Acesso em: 09 fev 2025.

GUINÉE, K. A.; *et al.* Considerations and a report on the state of practice. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.1, p. 79-85, 1996.

GUINÉE, J.; *et al.* Life cycle assessment an operational guide to the ISO standards. **Journal of Environmental Science**, 2001.

GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R. **Introduction to Life Cycle Assessment**, Sustainable Supply Chains. Springer Series in Supply Chain Management. Springer, v. 4, 2017. Disponível em: link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-29791-0_2. Acesso em 20 jun 2023.

HAUSCHILD, M. Z.; *et al.* Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 683-697, 2013.

HEIDARI, M. D.; *et al.* Streamlined Life Cycle Assessment of an Innovative Bio-Based Material in Construction: A Case Study of a Phase Change Material Panel. **Forests, MDPI Journal**, v. 10, p. 160, 2019.

HOCHSCHORNER, E.; FINNVEDEN, G. Evaluation of two simplified Life Cycle assessment methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.8, p. 119-128, 2003.

HUARACHI, D. A. R.; *et al.* Life Cycle Thinking for a Circular Bioeconomy: Current Development, Challenges, and Future Perspectives. **Sustainability**, v. 15, art 8543, 2023

HUR, T.; *et al.* Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system. **Journal of Environmental Management**, v. 75, p. 229-237, 2005.

IBAMA. **Protocolo de Montreal**. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/notas/115-emissao-e-residuos/emissoes/2254-protocolo-d-e-montreal>>. Acesso em: 10 maio. 2023.

IBEAS (Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento). Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **Normas ISO 14000**. 25 nov. 2015. Disponível em: https://www.ibeas.org.br/Haroldo%20Mattos%20-%20Normas_ISO_14000_Final.pdf. Acesso em: 08 maio 2016.

INGRAO, C; WOJNAROWSKA, M. Findings from a streamlined life cycle assessment of PET-bottles for beverage-packing applications, in the context of circular economy. **Science of the Total Environment**, v. 892, Art 164805, 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**: Environmental management – Life cycle assessment: Principles and framework. Genebra: ISO, 2006.

IPAM Amazônia. **O que é protocolo de quioto** Disponível em: <<https://ipam.org.br/entenda/o-que-e-o-protocolo-de-quioto/>>. Acesso em: 09 maio. 2023.

ISWARA, A.P., *et al.* A comparative Study of Life Cycle Impact Assessment using Different Software Programs. In: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 506, 2020. IOP Publishing: Indonesia 2020.

JENSEN, A. A.; *et al.* **Life Cycle Assessment**: a guide to approaches, experiences and information sources. TEKNIK Energy & Environment, 1997.

JONCK, A. V. **A quarta revolução industrial**: tecnologia e geopolítica. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Relações Internacionais)- Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

JONUSAN, R. A. S. **Estudo de Planejamento Energético para o setor de Mineração de Minério de Ferro no estado de Minas Gerais no Horizonte 2014/2035, utilizando o modelo ENPEP**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares)- Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

KIEMEL, S.; *et al.* How to Simplify Life Cycle Assessment for Industrial Applications—A Comprehensive Review. **Sustainability MDPI Journal**, v. 14, 2022.

KULAY, L.A.; SEO, E.S.M. Orientações conceituais para elaboração de inventários de ciclo de vida. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, São Paulo, v. 5, n. 1, 2010.

LIMA, E. Embrapa oferece treinamento em avaliação de ciclo de vida. Informativo Embrapa Meio Ambiente, 24 out. 2013. Disponível em: <http://goo.gl/t9bxFD>. Acesso em: 02 abril 2023.

LINTON, J. D.; *et al.* Sustainable supply chains: an introduction. **Journal of Operations Management**, v. 25, n. 6, p. 1075-1082, nov. 2007.

LUZ, L. M. da. **Integração da avaliação do ciclo de vida ao processo de desenvolvimento de produto: uma proposta metodológica**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

MEDEIROS, F. L. de; PRADO, L. C. D. A Teoria Protoindustrial: origem, desenvolvimento e atualidade. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v. 49, n. 1, p. 131-161, jan./mar. 2019.

MORINI, A.A.; HOTZA, D.; RIBEIRO, M.J.P.M. Avaliação da energia incorporada e da emissão de CO₂ em recipientes para refrigerantes: PET versus vidro. **Engenharia Sanitária Ambiental**. Florianópolis, v. 24, n. 5, p 1027-1036., set. 2019.

MORINI, A. A.; RIBEIRO, M. J.; HOTZA, D. Early-stage materials selection based on embodied energy and carbon footprint. **Materials and Design**, v. 178, art 107861, 2019.

NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 28 mar. 2023.

NAHUZ, M. A. R. O sistema ISO 14000 e a certificação ambiental. **Revista de Administração de Empresas (RAE)**, São Paulo, v. 35, n. 6, p. 55-66, nov./dez. 1995.

PAROLIN, G.; *et al.* A tool for aircraft eco-design based on streamlined Life Cycle Assesment and Uncertainty Analysis. **Procedia CIRP**, v. 98, p. 565-570, 2021.

PASSUELLO, A. C. B.; *et al.* Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: um estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7-20, out./dez. 2014.

PEREIRA, L. H. C. S. **Considerações sobre o procedimento de beneficiamento de minério de ferro**: Beneficiamento, pelletização e análise online de teores. 2013. Monografia (Pós- Graduação em Engenharia de Recursos Minerais)- Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PETRONI, A.; CAMPOS, M. C.; AZEVEDO, F. de S. **Avaliação de ciclo de vida (ACV)**. 2015. Trabalho de Gestão Ambiental, Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2015.

POLLINI, B.; ROGNOLI, V. Early-stage material selection based on life cycle approach: tools, obstacles and opportunities for design. **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 1130-1139, 2021.

PRéSustainability. Eco-Indicator 99. **Articles**. 4 fev. 2014. Disponível em: <https://pre-sustainability.com/articles/eco-indicator-99-manuals/>. Acesso em 08 fev. 2025.

PRYSHLAKIVSKY, J.; SEARCY, C. Life Cycle Assessment as a decision-making tool: Practitioner and managerial considerations. **Journal of Cleaner Production**, v. 309, Art 127344, 2021.

RAHN, A.; WICKE, K.; WENDE, G. A Comparison of Temporally Dynamic Life Cycle Assessment Methods for Ecological Evaluation in Aviation. **Procedia CIRP**, v. 116, p. 149-154., 2023.

RETAMOZO, J. L. M. **Análise das estratégias de sustentabilidade no setor de laticínio colombiano através da aplicação da ferramenta triple layered business model canvas**. 2022. Dissertação (Mestrado em Administração)- Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas, Limeira, 2022.

RIBEIRO, W. A.; *et al.* Impactos e repercussões da Revolução Industrial para saúde do trabalhador: contributos para ótica da Medicina. **Ciências da Saúde**, v. 122, 2023.

RIONDET, L.; *et al.* Emerging technologies upscaling: a framework for matching LCA practices with upscaling archetypes. **Sustainable Production and Consumption**, v. 50, p. 347-363, 2024.

ROSSI, M.; GERMANI, M.; ZAMAGNI, A. Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 361-373, 2016.

RUY, M.; ALLIPRANDINI, D. Métodos para avaliação ambiental de produtos no projeto conceitual: uma revisão da literatura. *In: XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Maturidade e desafios da Engenharia de Produção: competitividade das empresas, condição de trabalho e meio ambiente.* 30., 2010, São Carlos. **Anais [...]** São Carlos, 2010.

RUIZ-MÉNDEZ, D.; GÜERECA, L. P.. Streamlined Life Cycle Assessment for the Environmental Evaluation of Products in the Supply Chain. *In: YAKOVLEVA, N.; FREI, R.; RAMA MURTHY, S. Sustainable Development Goals and Sustainable Supply Chains in the Post-global Economy*, v. 7, p. 115-131, 2019.

SAKURAI, R.; ZUCHI, J. D. AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS ATÉ A INDÚSTRIA 4.0. **Revista Interface Tecnológica**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 480–491, 2018. DOI: 10.31510/infa.v15i2.386. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/386>. Acesso em: 12 jun. 2023.

SÁNCHEZ, L.E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2020. E-book. Disponível em: <https://play.google.com/store/books/details?id=2bFZEEAAQBAJ&rdid=book-2bFZEA>

AAQBAJ&rdot=1&source=gbs_vpt_read&pcampaignid=books_booksearch_viewport &pli=1. Acesso em: 09 maio 2023.

SANTOS, L. A. **A Revolução Industrial**. 2011. Disponível em: https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/08395302122015Historia_Contemporanea_I_Aula_4.pdf. Acesso em: 05 maio 2023.

SANTOS, L. S.; ARAÚJO, R. B. de. **A revolução industrial**. 2011. Disponível em: https://www.cesadufs.com.br/ORBI/public/uploadCatalogo/10264518102016Historia_economica_geral_e_do_brasil_Aula_03.pdf. Acesso em: 05 maio 2023 .

SCHMIDT, A., FRYDENDAL, J. Methods for calculating the environmental benefits of 'green' products. In: Erdmenger, C. (Ed.). **Buying into the environment: experiences, opportunities and potential for eco-procurement**. 2003.

SCRUCCA, F.; *et al.* **Carbon Footprint Case Studies: Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes**. Singapura: Springer Nature, 2021.

SEBRAE. **A 4a revolução industrial e a indústria 4.0** - Sebrae. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/sebraeaz/a-4-revolucao-industrial-e-a-industria-40,331980b31e751610VgnVCM1000004c00210aRCRD>>. Acesso em: 10 maio. 2023.

SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: ferramenta gerencial para tomada de decisão. **Revista InterfacEHS- Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, Art 4, ago 2006.

SILVA, D. B. da. *et al.* **O Reflexo da Terceira Revolução Industrial na Sociedade**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 22., 2012, Curitiba. Curitiba, ABEPRO, 2002. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2002_tr82_0267.pdf. Acesso em: 07 maio 2023.

SILVA, D. N. **Revolução Industrial**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/historiag/revolucao-industrial.htm>. Acesso em: 01 abril 2023.

SILVA, M. C. A. da.; GASPARIN, J. L. **A Segunda Revolução Industrial e suas influências sobre a Educação Escolar Brasileira**. 2015. Disponível em: http://www.histedbr.fe.unicamp.br/acer_histedbr/seminario/seminario7/TRABALHOS/M/Marcia%20CA%20Silva%20e%20%20Joao%20L%20Gasparin2.pdf. Acesso em: 07 maio 2023.

SILVA, V. F.; FRANCISCO, P. R. M. **Análise dos Impactos Ambientais do Ciclo de Vida: Estudos de caso**. EPTEC, 2022.

SILVA, V. R. da; SANTOS, A. G. dos. Avaliação do Ciclo de vida na indústria: estudo de caso em uma empresa manufatureira. In: // Workshop do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2, 2024, Catalão. **Anais [...]** Catalão, 2024.

SILVEIRA, C. B.O. **O que é a Indústria 4.0 e como ela vai impactar o mundo.** Citisystems.2017. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>>. Acesso em: 10 maio 2023.

SILVEIRA, N. de F. N.; FARIA, A. F. de. Estudo sobre a normatização ISO 14000 com enfoque em organizações públicas municipais. *In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental.* 11., 2020, Vitória. **Anais [...]** Vitória, 2020. p. 1-6.

SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY. **Guidelines for Life-cycle Assessment: A "Code of Practice"**. Brussels: SETAC, 1993.

SOLEDADE, M. das G. M.; *et al.* ISO 14000 e a Gestão Ambiental: uma Reflexão das Práticas Ambientais Corporativas. *In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE.* 9., 2007, Curitiba. **Anais [...]** Curitiba, 2007.

SUPPIPAT, S. *et al.* Challenges of Applying Simplified LCA Tools in Sustainable Design Pedagogy. **Sustainability.** Taipei, v. 13, n. 2406, fev. 2021.

SUYANTO, E. R.; *et al.* Comparison of waste photovoltaic panel processing alternatives in Australia. **Journal of Cleaner Production**, v. 418, Art 138128, 2023.

TSATSARONIS, G. The future of exergy-based methods. **Energy**, v. 302, Art 131881, 1 set. 2024.

THOMAS, J. A. **Desenvolvimento sustentável: o que é, quando surgiu o termo e quais seus objetivos.** Um só planeta, 2021. Disponível em: Desenvolvimento sustentável: o que é, quando surgiu o termo e quais seus objetivos | Negócios | Um só Planeta (globo.com). Acesso em: 07 maio 2023.

THOMAZINI, A. D.; *et al.* Pelotização de minério de ferro com partículas grossas. *In: 7° Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios.* 7, 2019, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, 2020, p.221-228.

TODD, J. Z.; CURRAN, M. A. STREAMLINED LIFE CYCLE ASSESSMENT: A FINAL REPORT FROM THE SETAC- NORTH AMERICA STREAMLINED LCA WORKGROUP. **Society of Environmental Toxicology and Chemistry**, North America, 1999.

UDO DE HAES, H.A.; Rooijen, M.V. Life Cycle Approaches: The road from analysis to practice. **Life Cycle Initiative**, Paris, primeira edição, 2005.

UNEP- UN Environment Programme. **Por que o PNUMA é importante?** Disponível em: Por que o PNUMA é importante? | UNEP - UN Environment Programme. Acesso em: 07 maio 2023.

VERBITSKY, O.; PUSHKAR, S. Eco-Indicator 99, ReCiPe and ANOVA for Evaluating Building Technologies Under LCA Uncertainties. **Environmental Engineering and Management Journal.** Romênia, v. 17, n. 11, p. 2549-2559, nov. 2018.

WEITZ, K. A.; *et al.* Considerations and a report on the state of practice. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.1, p. 79-85, 1996.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. da. Avaliação do ciclo de vida n Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. **Produção**, v. 23, n. 2, p. 436-447, abr./jun. 2013.

WORDSTEEL ASSOCIATION. **Life cycle inventory (LCI) study**. Sustainable, 2021.

YANG, W.; QI, Z. Quantification of CO₂ emissions of macro-infrastructure in China with simplified life cycle assessment. **Natural Hazards**, v. 82, p.545-569, 2016.

ZAMAGNI, A.; *et al.* Critical review of the current research needs and limitations related to ISO-LCA practice. **Project CALCAS**, 2008.

ZHOU, X.; *et al.* From full life cycle assessment to simplified life cycle assesment: A generic methodology applied to sludge treatment. **Science of the Total Environment**, v. 904, Art 167149, 2023.

ZOCHE, L. **Identificação das limitações da ACV sob a ótica de pesquisas acadêmicas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014.

ZOMMER, T. T. S.; *et al.* Investigating social and environmental hotspots throughout the lifecycle of product-service systems in the early design stages. **Journal of Cleaner Production**, v. 462, Art 142724, 2024.