

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM QUÍMICA EM REDE NACIONAL

THAYSA AYRES DE MIRANDA RODRIGUES

**UMA ABORDAGEM BASEADA NO CICLO DE VIDA DE
SMARTPHONES E NOS PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR
PARA A QUÍMICA DO ENSINO MÉDIO**

Rio de Janeiro

2025

THAYSA AYRES DE MIRANDA RODRIGUES

**UMA ABORDAGEM BASEADA NO CICLO DE VIDA DE
SMARTPHONES E NOS PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR
PARA A QUÍMICA DO ENSINO MÉDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Química.

Orientadora: Dra. Michelle Jakeline Cunha Rezende

Rio de Janeiro

2025

CIP - Catalogação na Publicação

R696u Rodrigues, Thaysa Ayres de Miranda
Uma Abordagem Baseada no Ciclo de Vida de Smartphones e nos Princípios da Economia Circular para a Química do Ensino Médio / Thaysa Ayres de Miranda Rodrigues. -- Rio de Janeiro, 2025.
124 f.

Orientadora: Michelle Jakeline Cunha Rezende.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Programa de Pós Graduação em Química em Rede Nacional, 2025.

1. Economia circular. 2. Sustentabilidade. 3. Ciclo de vida de smartphones. 4. Ensino de química. 5. E-book. I. Jakeline Cunha Rezende, Michelle, orient. II. Título.

Thaysa Ayres de Miranda Rodrigues

UMA ABORDAGEM BASEADA NO CICLO DE VIDA DE *SMARTPHONES*
E NOS PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR PARA A QUÍMICA DO
ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Química.

Aprovada por:

Documento assinado digitalmente
 MICHELLE JAKELINE CUNHA REZENDE
Data: 19/04/2026 16:58:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Michelle Jakeline Cunha Rezende - orientadora (IQ/UFRJ)

Documento assinado digitalmente
 BARBARA VASCONCELLOS DA SILVA
Data: 20/04/2026 13:48:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Bárbara Vasconcellos da Silva (IQ/UFRJ)

Documento assinado digitalmente
 JULIA DAMAZIO BOUZON
Data: 20/04/2026 13:17:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Júlia Damazio Bouzon (UERJ)

Ao meu marido, companheiro de todas as horas,
dedico estas páginas com profundo amor e gratidão.

Em cada desafio superado e em cada conquista alcançada, encontrei em você não apenas a força necessária para seguir, mas também a certeza de que o amor e o companheirismo tornam qualquer jornada mais leve. Eu te amo.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde e pela força concedida em cada etapa desta caminhada. Sem a Sua presença, nada teria sido possível.

À minha família, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pela compreensão nos momentos de ausência. Vocês foram e sempre serão meu porto seguro e minha maior inspiração.

Aos amigos que fiz no PROFQUI. Nossa turma ficará marcada para sempre, não apenas pelos cafés de todas as sextas, mas também pelo companheirismo e pelas memórias que levaremos adiante.

Aos professores do PROFQUI, pela dedicação, seriedade e compromisso com nossa formação, transmitindo não apenas conhecimento, mas também inspiração para o exercício da docência.

À minha orientadora, Prof.^a Michelle Rezende, pela confiança, paciência, incentivo e pelas valiosas contribuições que nortearam este trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, estiveram presentes, oferecendo palavras de incentivo, gestos de amizade ou simples demonstrações de carinho. A cada um de vocês, registro minha mais profunda gratidão.

Porque os meus pensamentos não são os vossos pensamentos, nem os vossos caminhos os meus caminhos, diz o Senhor.

Porque assim como os céus são mais altos do que a terra, assim são os meus caminhos mais altos do que os vossos caminhos, e os meus pensamentos mais altos do que os vossos pensamentos.

Isaías 55: 8-9.

RESUMO

Esta dissertação abordou a sustentabilidade no contexto da economia circular, tendo como eixo estruturante o estudo do ciclo de vida de *smartphones*. O trabalho teve como principal objetivo desenvolver um *e-book* como recurso educacional voltado a professores de química do ensino médio, reunindo propostas pedagógicas que buscam favorecer a contextualização dos conteúdos da disciplina e incentivar reflexões sobre os impactos socioambientais e econômicos da cadeia produtiva dos *smartphones*. A revisão bibliográfica em bases de dados acadêmicas e nos recursos educacionais do PROFQUI evidenciou o caráter inovador da proposta, uma vez que não foram identificadas publicações que tratassem do ciclo de vida de *smartphones* no ensino de química. A metodologia foi estruturada em duas etapas: elaboração do *e-book* e aplicação parcial do material em turmas do ensino médio de um colégio particular localizado no estado do Rio de Janeiro. O *e-book* constituiu o recurso central da pesquisa, fundamentando a abordagem das etapas do ciclo de vida – extração, produção, transporte, uso e descarte – e a mobilização de conteúdos como tabela periódica, reações de oxirredução, hidrocarbonetos, eletroquímica e separação de misturas. A aplicação ocorreu inicialmente com duas turmas da 1ª série do ensino médio, que elaboraram cartazes sobre a etapa de descarte, articulando-a aos processos de separação de misturas; e posteriormente com uma turma da 2ª série, na qual foram realizados dois experimentos relacionados às etapas de produção e uso, a saber: a cointerposição de uma moeda e a construção de uma pilha de limão em série, vinculadas, respectivamente, às reações de oxirredução e aos princípios de eletroquímica. A avaliação da atividade envolvendo os experimentos combinou análise qualitativa das interações com mensuração quantitativa por meio de *quiz* aplicado na plataforma *Kahoot*, cujo desempenho médio de 69% evidenciou boa compreensão dos conteúdos abordados. Na produção de cartazes, a análise qualitativa das produções e argumentações revelou a capacidade dos estudantes de selecionar informações pertinentes, organizar conceitos e construir posicionamentos fundamentados acerca dos impactos socioambientais e das responsabilidades associadas à etapa final do ciclo de vida dos *smartphones*, permitindo ainda identificar potencialidades e aspectos passíveis de aprimoramento do material didático.

Palavras-chave: economia circular; sustentabilidade; ciclo de vida de *smartphones*; ensino de química; *e-book*.

ABSTRACT

This dissertation addresses sustainability within the framework of the circular economy, using the life cycle of smartphones as its central theme. The main objective of the study was to develop an educational e-book aimed at high school chemistry teachers, providing pedagogical proposals designed to promote contextualization of disciplinary content and to encourage reflection on the socio-environmental and economic impacts of the smartphone production chain. A literature review conducted in academic databases and across PROFQUI's educational resources revealed the innovative character of the proposal, as no previous publications were identified that explored the smartphone life cycle within the context of chemistry education. The methodology comprised two stages: the development of the e-book and its partial implementation in high school classes at a private school in the state of Rio de Janeiro. The e-book served as the central research resource, supporting the exploration of the life cycle stages – extraction, production, transportation, use, and disposal – and the integration of chemistry concepts such as the periodic table, redox reactions, hydrocarbons, electrochemistry, and separation of mixtures. The implementation involved first-year students produced posters addressing the disposal stage and its relationship with separation processes, while second-year students carried out two experiments related to production and use stages: copper plating of a coin and the construction of a series lemon battery, associated respectively with redox reactions and electrochemical principles. The experimental activity was assessed qualitatively through classroom interaction analysis and quantitatively through a Kahoot quiz, which yielded an average score of 69%, indicating satisfactory understanding of the addressed concepts. Poster production was evaluated qualitatively, revealing students' ability to organize information, systematize ideas, and develop reasoned positions regarding the socio-environmental impacts and responsibilities linked to the final stage of the smartphone life cycle. The results also allowed the identification of strengths and areas for improvement in the educational material.

Keywords: circular economy; sustainability; life cycle of smartphones; chemistry education; e-book.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Os 8 Objetivos de Desenvolvimento do Milênio.....	20
Figura 2. Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	21
Figura 3. Diagrama de borboleta.....	26
Figura 4. Etapas do ciclo de vida de um <i>smartphone</i>	33
Figura 5. Tabela periódica e os riscos de escassez dos elementos químicos.....	45
Figura 6. Exemplo da estrutura dos boxes utilizados nos capítulos do <i>e-book</i>	67
Figura 7. Linha do tempo da sustentabilidade apresentada no capítulo 1.....	70
Figura 8. Roteiro do experimento “Medida do teor de etanol na gasolina comum”.....	73
Figura 9. Sessão de cartazes da Turma A.....	78
Figura 10. Sessão de cartazes da Turma B.....	79
Figura 11. Cartazes referentes ao tema “O problema do lixo eletrônico”.....	80
Figura 12. Cartazes referentes ao tema “Técnicas de separação de misturas”.....	80
Figura 13. Cartazes referentes ao tema “Reciclagem”.....	82
Figura 14. Cartaz da Turma A com destaque para o uso de luzes de LED.....	85
Figura 15. Cartaz da Turma B com destaque para o uso de elementos eletrônicos.....	85
Figura 16. Experimento de galvanização eletrolítica de uma moeda.....	92
Figura 17. Experimento de pilhas de limão em série.....	93
Figura 18. Medição da tensão da bateria de íon-lítio de um fone de ouvido <i>bluetooth</i>	94
Figura 19. Interface da segunda pergunta do <i>quiz</i> elaborado no <i>Kahoot</i>	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Elementos utilizados na fabricação de <i>smartphones</i> e suas funções.....	34
Quadro 2. Pegada de carbono total e distribuição percentual das emissões ao longo do ciclo de vida de dois modelos de <i>smartphones</i>	39
Quadro 3. Principais combustíveis derivados do petróleo.....	40
Quadro 4. Consumo anual estimado de energia por <i>smartphone</i> (1 carga/dia).....	44
Quadro 5. Número de publicações retornadas para cada combinação de palavras-chave inseridas nas bases de dados.....	49
Quadro 6. Referências dos recursos educacionais analisados a partir da busca sistemática no site do PROFQUI.....	52
Quadro 7. Resultados da pesquisa complementar.....	56
Quadro 8. Etapas do ciclo de vida de <i>smartphones</i> e os conteúdos curriculares de química abordados no <i>e-book</i>	58
Quadro 9. Temas e questões norteadoras da atividade do capítulo 6.....	61
Quadro 10. Níveis de domínio estabelecidos para a classificação das questões.....	64
Quadro 11. Nova estrutura para a atividade proposta no capítulo 6.....	90
Quadro 12. Resultados e classificação das questões do <i>quiz</i>	96

LISTA DE SIGLAS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

BNCC – Base Nacional Comum Curricular

CFC – Clorofluorcarbonetos

CMMD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

CO₂eq – Dióxido de Carbono Equivalente

COP – Conferência das Partes

CTS – Ciência, Tecnologia e Sociedade

CTSA – Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente

DS – Desenvolvimento Sustentável

EC – Economia Circular

EDS – Educação para o Desenvolvimento Sustentável

ERIC – Educational Resources Information Center

GEE – Gases de Efeito Estufa

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

LR – Logística Reversa

NOX – Número de Oxidação

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PCIs – Placas de Circuito Impresso

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

POPs – Poluentes Orgânicos Persistentes

PROFQUI – Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional

QC – Química Circular

QS – Química Sustentável

QV – Química Verde

REEE – Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

SciELO – Scientific Electronic Library Online

SD – Sequência Didática

SSbD – Safe and Sustainable-by-Design

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	FUNDAMENTOS DA SUSTENTABILIDADE	17
3.1.1	Evolução histórica da sustentabilidade	19
3.1.2	Agenda 2030 e os objetivos do desenvolvimento sustentável	21
3.2	ECONOMIA CIRCULAR	23
3.2.1	Logística reversa	26
3.3	QUÍMICA VERDE, QUÍMICA CIRCULAR E QUÍMICA SUSTENTÁVEL	28
3.4	EDUCAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E O ENSINO DE QUÍMICA	29
3.5	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	31
3.5.1	Etapas do ciclo de vida de um <i>smartphone</i>	33
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	49
4.1	LEVANTAMENTO DE PRODUÇÕES EM BASES DE DADOS ACADÊMICAS	49
4.2	LEVANTAMENTO DE PRODUÇÕES NO ÂMBITO DO PROFQUI	52
5	METODOLOGIA	58
5.1	ELABORAÇÃO DO <i>E-BOOK</i>	58
5.2	APLICAÇÃO DOS CAPÍTULOS DO <i>E-BOOK</i>	59
5.2.1	Aplicação do capítulo 6	60
5.2.2	Aplicação dos capítulos 3 e 5	63
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
6.1	ANÁLISE DO PROCESSO DE ELABORAÇÃO DO <i>E-BOOK</i>	66
6.1.1	Construção do capítulo 1	69
6.1.2	Construção dos capítulos de 2 a 6	71
6.2	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO CAPÍTULO 6	75
6.2.1	Primeiro encontro: contextualização temática e organização dos grupos	75
6.2.2	Segundo encontro: socialização dos cartazes e análise qualitativa das produções	78
6.3	RESULTADOS DA APLICAÇÃO CONJUNTA DOS CAPÍTULOS 3 E 5	91

6.3.1 Análise do desempenho dos estudantes no <i>quiz</i> aplicado pelo <i>Kahoot</i>	95
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
REFERÊNCIAS	105
APÊNDICE A – CÁLCULO DO CONSUMO ANUAL ESTIMADO DE ENERGIA POR <i>SMARTPHONE</i>	114
APÊNDICE B – <i>SLIDES</i> UTILIZADOS NA APLICAÇÃO DO CAPÍTULO 6	116
APÊNDICE C – <i>SLIDES</i> UTILIZADOS NA APLICAÇÃO CONJUNTA DOS CAPÍTULOS 3 E 5	117
APÊNDICE D – ROTEIRO DO EXPERIMENTO DE GALVANIZAÇÃO ELETROLÍTICA DE UMA MOEDA	119
APÊNDICE E – ROTEIRO DO EXPERIMENTO DE PILHAS DE LIMÃO EM SÉRIE	120
APÊNDICE F – ITENS AVALIATIVOS DO <i>QUIZ</i> NA PLATAFORMA <i>KAHOOT</i>	121

1 INTRODUÇÃO

A transformação digital das últimas décadas ampliou de forma significativa a presença de dispositivos eletrônicos no cotidiano, incluindo *smartphones*, *notebooks*, *tablets* e eletrodomésticos inteligentes. A expansão desse mercado tem como resultado um aumento contínuo de equipamentos em circulação e, conseqüentemente, a intensificação da geração de resíduos, consolidando o lixo eletrônico como um dos grandes desafios ambientais do século XXI, tanto pela escala de produção quanto pelos riscos associados ao seu descarte inadequado (Baldé *et al.*, 2024).

De acordo com o último relatório do Monitoramento Global de Resíduos Eletrônicos (*The Global E-waste Monitor*, em inglês), somente em 2022 foram produzidas 62 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos no mundo, o equivalente a uma média de 7,8 kg per capita por ano. No entanto, apenas 22,3% desse total teve destinação documentada em processos formais de reciclagem (Baldé *et al.*, 2024). Entre os países que lideram a produção de e-lixo estão China, Estados Unidos, Índia, Japão e Brasil, que ocupa a quinta posição mundial e a primeira na América do Sul, com aproximadamente 2,4 milhões de toneladas anuais e uma taxa de reciclagem em torno de apenas 3% (Baldé *et al.*, 2024; Dias *et al.*, 2022).

O termo lixo eletrônico, também chamado de e-lixo (*e-waste*, em inglês) ou Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), abrange todos os produtos eletroeletrônicos que chegam ao fim da sua vida útil. Na ausência de práticas adequadas de gestão, esses resíduos acabam em aterros sanitários ou locais de despejo irregulares, constituindo potenciais focos de contaminação ambiental. Os riscos decorrem, em grande parte, da presença de metais pesados, como chumbo, mercúrio e cádmio, e também da liberação de Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs), como bifenilas policloradas e retardantes de chama bromados, que podem produzir efeitos nocivos à saúde humana e aos ecossistemas (Grant *et al.*, 2013; Ohajinwa *et al.*, 2019).

No conjunto desses equipamentos, os *smartphones* se destacam tanto pelo grande número de unidades em circulação quanto pela presença constante no cotidiano inclusive entre professores e alunos, que fazem uso frequente desses dispositivos em atividades pessoais e escolares. A estimativa mais recente aponta que, em 2025, existem aproximadamente 502 milhões de dispositivos digitais em uso no Brasil, dos quais cerca de 272 milhões correspondem a *smartphones* – uma média de 1,3 aparelhos por habitante (FGV, 2025).

Nesse contexto, o estudo do ciclo de vida de *smartphones* apresenta-se como uma oportunidade didática no ensino de química no ensino médio. Ao abordar as etapas de extração de matérias-primas, produção, transporte, uso e descarte, torna-se possível mobilizar conceitos

fundamentais da disciplina, como tabela periódica, reações de oxirredução, eletroquímica e processos de separação de misturas. Além disso, o estudo desse ciclo favorece uma abordagem interdisciplinar, uma vez que envolve dimensões que ultrapassam os limites da química e dependem da integração de saberes diversos, o que contribui para a formação de uma visão sistêmica e crítica da realidade.

Esse enfoque mostra-se particularmente pertinente quando se observa que, para a fabricação de um único *smartphone*, são necessários cerca de 70 elementos químicos diferentes (Bookhagen *et al.*, 2020; Rohrig, 2015; Jowitt *et al.*, 2018). Esse elevado número de insumos implica em uma demanda expressiva por recursos naturais e energia, a qual, somada à rápida obsolescência tecnológica e ao incentivo a padrões de consumo acelerados, acarreta implicações de ordem ambiental, social e econômica, incluindo: pressão sobre ecossistemas, emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), exploração laboral em cadeias produtivas e a perda de valor econômico decorrente do desperdício de materiais que poderiam ser reinseridos nos ciclos produtivos (Apple, 2022; UNEP, 2022; Baldé *et al.*, 2024, Samsung, 2024).

O estudo do ciclo de vida de *smartphones*, quando transposto para o espaço escolar, pode constituir um meio para o desenvolvimento do pensamento científico dos estudantes, favorecendo a capacidade de investigação, argumentação e resolução de problemas, em consonância com as orientações previstas pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o ensino de química, dentre as quais se destacam: (i) possibilitar a compreensão dos fenômenos químicos em articulação com dimensões cotidianas, ambientais, sociais, econômicas e tecnológicas; (ii) incentivar uma postura crítica e reflexiva diante da intervenção humana nos sistemas naturais, considerando os princípios da sustentabilidade e os impactos ambientais associados (Brasil, 2018).

Dessa forma, esta dissertação propõe a articulação entre os conceitos de química e a temática da sustentabilidade, sob a perspectiva da Economia Circular (EC), tomando o ciclo de vida de *smartphones* como eixo integrador de análise. A adoção da perspectiva da EC mostra-se relevante por propor a superação da lógica linear de extração, produção, consumo e descarte, ao priorizar estratégias como a reutilização, a reciclagem e a extensão da vida útil dos produtos (Fundação Ellen MacArthur, 2013, 2019; Guarieiro *et al.*, 2022). Aplicada à realidade dos dispositivos eletrônicos, essa abordagem possibilita discutir alternativas concretas para reduzir a pressão sobre os recursos naturais e os impactos ambientais decorrentes de seu ciclo de vida.

Como desdobramento desta pesquisa, foi elaborado o *e-book* **“Ciclo de vida de smartphones como metodologia para o ensino de química”**, destinado a professores de química do ensino médio. O material constitui o recurso educacional associado a esta

dissertação e reúne propostas pedagógicas que buscam favorecer a contextualização dos conteúdos da disciplina, em diálogo com outras áreas do conhecimento, e incentivar reflexões sobre os impactos socioambientais da tecnologia, de modo a apoiar práticas docentes voltadas para a sustentabilidade. Adicionalmente, esta pesquisa procura alinhar-se às demandas contemporâneas expressas nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial à meta 4.7 do ODS 4, que visa garantir a todos os alunos a aquisição de conhecimentos e habilidades necessários para promover o desenvolvimento sustentável por meio da educação e da adoção de estilos de vida sustentáveis (Brasil, 2016).

Assim, ao eleger os professores de química como público-alvo, esta pesquisa reconhece o papel fundamental do docente enquanto mediador do conhecimento, cuja função ultrapassa a mera massificação de conteúdos para assumir a responsabilidade de criar condições que favoreçam a apropriação crítica dos saberes químicos pelos estudantes. Como destaca Schnetzler (2024), a mediação pedagógica envolve a intencionalidade do professor em organizar situações de ensino que permitam ao aluno construir sentidos próprios, articulando conceitos científicos e realidade social. Nessa perspectiva, o docente atua como agente de transformação, possibilitando o desenvolvimento de competências analíticas e reflexivas indispensáveis à educação para a sustentabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Promover a integração dos conceitos de sustentabilidade e economia circular ao ensino de química no ensino médio, por meio da análise das etapas do ciclo de vida de *smartphones* e sua relação com conteúdos químicos, a fim de desenvolver práticas pedagógicas que estimulem a compreensão crítica sobre impactos ambientais e sociais associados à tecnologia, tendo em vista uma educação voltada para o desenvolvimento sustentável.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Explorar as cinco etapas do ciclo de vida de *smartphones*, abrangendo a extração de matérias-primas (1), produção (2), distribuição (3), uso (4) e destinação final (5), associando cada etapa a conceitos de química correspondentes: tabela periódica (1), reações de oxirredução (2), hidrocarbonetos (3), eletroquímica (4), e separação de misturas (5);
- b) Elaborar um *e-book* como recurso para auxiliar professores de química na abordagem de sustentabilidade e economia circular em sala de aula, integrando conceitos de química ao ciclo de vida de *smartphones*;
- c) Avaliar o *e-book* em relação ao seu processo de elaboração, bem como à aplicação dos capítulos 3, 5 e 6 em turmas do ensino médio.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta uma revisão dos principais conceitos que sustentam os temas centrais desta pesquisa, com foco em sustentabilidade, economia circular e ciclo de vida dos *smartphones*. Serão discutidos o desenvolvimento histórico e os fundamentos teóricos desses conceitos, bem como sua aplicação no ensino de química.

3.1 FUNDAMENTOS DA SUSTENTABILIDADE

Originada do latim *sustentare* (que significa sustentar, defender e conservar), a sustentabilidade emerge como um conceito complexo que busca o equilíbrio entre três pilares fundamentais: o **ambiental**, essencial para a preservação da biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas; o **social**, que visa assegurar uma vida digna para todas as pessoas, promovendo equidade e justiça social; e o **econômico**, indispensável para o progresso e a inovação (IBGE, 2015).

A formulação moderna do conceito de sustentabilidade é relativamente recente, tendo sido consolidada apenas em 1987 com a publicação do Relatório de Brundtland, oficialmente intitulado *Nosso Futuro Comum*, pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), criada pela Organização das Nações Unidas (ONU). O relatório foi pioneiro ao introduzir o conceito de Desenvolvimento Sustentável (DS), que é descrito como “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades” (CMMAD, 1991, p. 46).

Nesse contexto, reconhece-se tanto a urgência de reformular os padrões de produção e consumo vigentes quanto a interdependência entre os pilares que sustentam a prática da sustentabilidade. A seguir, detalham-se os três pilares (IBGE, 2015):

- i. **Pilar Ambiental:** Este pilar enfatiza a preservação e a conservação dos recursos naturais e dos ecossistemas, além de mitigar os impactos negativos das atividades humanas no meio ambiente. Ele abrange uma gama de estratégias e ações, como a redução das emissões de GEE, a melhoria da qualidade do ar e da água, a conservação de habitats naturais críticos, a proteção de espécies ameaçadas de extinção e a gestão segura e eficiente de resíduos sólidos.
- ii. **Pilar Social:** Este pilar concentra-se no fortalecimento do capital humano e no aprimoramento do bem-estar social, priorizando a equidade, a inclusão e a justiça social. Em sua essência, está o compromisso com a garantia dos direitos humanos, incluindo o

direito à saúde, à educação de qualidade (que abrange a educação ambiental), ao trabalho digno, à moradia adequada, e à participação política e comunitária.

- iii. **Pilar Econômico:** Este pilar refere-se à sustentabilidade econômica, que envolve práticas de crescimento econômico que sejam ambientalmente responsáveis e socialmente justas. Trata-se da capacidade das organizações e sociedades de promover o desenvolvimento econômico de forma que não comprometa os recursos naturais dos quais dependem, minimizando o uso de recursos não-renováveis e reduzindo os impactos ambientais negativos.

Apesar do reconhecimento internacional, a sustentabilidade não constitui um conceito consensual e permanece objeto de críticas que evidenciam controvérsias em sua definição e aplicação. Para Boff (2012), trata-se de um princípio orientador que deve garantir a integridade da Terra e seus ecossistemas, articulando a continuidade da vida com as necessidades humanas presentes e futuras. No entanto, ao ser vinculada à noção de desenvolvimento, essa perspectiva ganha contornos paradoxais, visto que o desenvolvimento pressupõe crescimento econômico contínuo, o que entra em choque com os limites finitos do planeta (Kruse; Cunha, 2022).

Nesse contexto, o próprio termo sustentabilidade revela ambiguidades: de um lado, remete à ideia de preservação, entendida como a manutenção dos recursos naturais em seu estado original, sem interferência; de outro, associa-se à conservação, que pressupõe a utilização racional dos recursos, de modo a conciliá-los com as necessidades humanas.

Essa contradição é aprofundada por Hickel e Kallis (2020), que questionam a hipótese central da chamada economia verde: a possibilidade de desacoplar o crescimento econômico do aumento no uso de recursos naturais e das emissões de GEE. Segundo os autores, ainda que alguns países apresentem sinais de redução relativa das emissões, não há evidências robustas de que um desacoplamento absoluto esteja ocorrendo em escala global, capaz de sustentar o crescimento econômico sem ultrapassar os limites climáticos de 1,5–2 °C. Em outra vertente crítica, Kotzé e Adelman (2022) analisam o conceito de DS no campo jurídico e político, argumentando que sua apropriação pela lógica neoliberal frequentemente reforça estruturas de mercado e crescimento, em vez de oferecer justiça socioecológica.

Dessa forma, observa-se que a sustentabilidade e o DS constituem um campo atravessado por diferentes perspectivas teóricas e práticas. Neste trabalho, adota-se a definição de DS apresentada no Relatório de Brundtland, por ser a mais difundida no cenário internacional, reconhecendo-se, contudo, a importância de sua contínua revisão crítica, de modo a adequá-la aos desafios contemporâneos.

3.1.1 Evolução histórica da sustentabilidade

O conceito de sustentabilidade vem sendo construído historicamente desde a segunda metade do século XX. A linha do tempo a seguir apresenta alguns dos principais marcos desta construção, destacando as principais conferências mundiais e os pactos globais que consolidaram o termo.

1972 – Conferência de Estocolmo: Considerada o marco inicial na agenda ambiental global, a conferência reuniu 113 países para discutir os impactos das atividades humana sobre a natureza, resultando na Declaração de Estocolmo, que estabelece vinte e seis princípios para a preservação e melhoria do meio ambiente para o bem-estar humano (ONU, 1972).

1987 – Relatório de Brundtland: Conhecido como “Nosso Futuro Comum”, este relatório foi o primeiro documento a apresentar uma definição de DS, enfatizando a necessidade urgente de um modelo de desenvolvimento que integrasse crescimento econômico, equidade social e proteção ambiental (CMMAD, 1991).

1992 – Rio-92 (Cúpula da Terra): Esta conferência resultou na adoção de vários acordos internacionais significativos. Um dos mais importantes foi a Agenda 21, um plano de ação abrangente para promover o DS em nível local, nacional e global, que reconhecia a necessidade de integrar as dimensões sociais, econômicas e ambientais do desenvolvimento (ONU, 1992).

1997 – 3ª Conferência das Partes (COP 3): O Protocolo de Kyoto, acordado na terceira COP, foi o primeiro tratado internacional a estabelecer metas obrigatórias de redução de emissões de GEE para países industrializados, marcando o início dos compromissos globais para mitigar as mudanças climáticas (Brasil, 2004).

2000 – Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM): Adotados por 191 países, os ODM estabeleceram um conjunto de oito objetivos destinados a combater a pobreza em suas múltiplas dimensões (Figura 1). Entre as metas, destacam-se a erradicação da pobreza extrema e da fome, a redução da mortalidade infantil, a melhoria da saúde materna e a garantia da sustentabilidade ambiental (ONU, 2000).

2002 – Rio+10: A Cúpula de Johannesburgo avaliou o progresso desde a Rio-92 e renovou compromissos com a Agenda 21, enfatizando a importância de ações locais e regionais para a conservação dos recursos e a erradicação da pobreza (ONU, 2001).

2012 – Rio +20: Esta conferência revisitou os compromissos da Rio-92, culminando no documento “O Futuro que Queremos”, que reafirmou a erradicação da pobreza como ponto central para o DS. A Rio +20 também lançou as bases para a Agenda 2030 (ONU, 2012).

Figura 1. Os 8 Objetivos de Desenvolvimento do Milênio.



Fonte: Brasil, 2015.

2015 – Cúpula de Desenvolvimento Sustentável: A adoção da Agenda 2030 para o DS, com 17 ODS e 169 metas, marcou um ponto de inflexão na cooperação global para enfrentar desafios como mudanças climáticas, desigualdade e sustentabilidade (Brasil, 2016).

2015 – COP 21: O Acordo de Paris, firmado na COP 21, foi um marco na luta contra as mudanças climáticas, estabelecendo metas específicas para reduzir as emissões de GEE e limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, com esforços para limitar esse aumento a 1,5 °C (ONU, 2015).

2021 – COP 26: Nesta conferência, os países revisaram seus compromissos climáticos no âmbito do Acordo de Paris e reconheceram que os esforços globais ainda são insuficientes para limitar o aquecimento a 1,5 °C. A conferência resultou no Pacto de *Glasgow*, que reforça a urgência de reduzir rapidamente as emissões de GEE nesta década e prevê a redução gradual do uso de carvão mineral (UNFCCC, 2022).

2023 – COP 28: A conferência marcou a conclusão do primeiro balanço global do Acordo de Paris, o *Global Stocktake*, evidenciando que os avanços alcançados até o momento foram demasiadamente lentos frente às metas estabelecidas. O documento apontou para a necessidade de se alcançar as emissões líquidas zero globalmente até 2050 e reduzir as emissões globais em 43% até 2030 e em 60% até 2035, reafirmando a necessidade de uma transição para longe dos combustíveis fósseis (UNFCCC, 2023).

2025 – COP 30: Realizada em Belém do Pará, no Brasil, o evento marcou a primeira vez que uma COP ocorreu na região amazônica. A conferência aprovou o “Pacote de Belém”, reafirmando os compromissos do Acordo de Paris e destacando a necessidade de cooperação internacional e de intensificação das metas climáticas nesta década considerada decisiva, com

ênfase na ampliação do financiamento destinado à adaptação climática, sobretudo para países mais vulneráveis, e no avanço de mecanismos de transição justa para economias de baixo carbono (Brasil, 2025; UNFCCC, 2025).

3.1.2 Agenda 2030 e os objetivos do desenvolvimento sustentável

Como já apresentado na evolução histórica, a Agenda 2030 constitui um compromisso global composto por 17 ODS (Figura 2) e 169 metas voltadas para a promoção de sociedades mais justas, inclusivas e ambientalmente responsáveis.

Figura 2. Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: ONU, 2025.

Segundo a ONU, a Agenda 2030 está estruturada em torno de cinco eixos de atuação – conhecidos como os “5 Ps”: pessoas, planeta, prosperidade, paz e parceria. O eixo pessoas refere-se à erradicação da pobreza e da fome, assegurando dignidade e igualdade para todos; o eixo planeta destaca a necessidade de proteger os ecossistemas e gerenciar de forma sustentável os recursos naturais; a prosperidade está associada à promoção de vidas dignas e ao progresso em harmonia com a natureza; a paz diz respeito à construção de sociedades justas, pacíficas e inclusivas; e a parceria enfatiza a cooperação global como condição indispensável para a efetiva realização dos ODS (Brasil, 2016).

Neste trabalho, optou-se por enfatizar três ODS que se mostram particularmente pertinentes à análise do ciclo de vida de *smartphones*, tomado como eixo articulador para a inserção da sustentabilidade e da EC no ensino de química no ensino médio: o ODS 4 (Educação de Qualidade), o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

O ODS 4 propõe assegurar uma educação inclusiva, equitativa e de qualidade, oferecendo oportunidades de aprendizagem ao longo da vida. Esse objetivo se conecta à necessidade de viabilizar uma educação química crítica, capaz de relacionar conceitos científicos a questões socioambientais emergentes, como os impactos do consumo e descarte de dispositivos eletrônicos. Tal perspectiva está explicitada na meta 4.7:

Até 2030, garantir que todos os alunos adquiram conhecimentos e habilidades necessárias para promover o desenvolvimento sustentável, inclusive, entre outros, por meio da educação para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida sustentáveis, direitos humanos, igualdade de gênero, promoção de uma cultura de paz e não violência, cidadania global e valorização da diversidade cultural e da contribuição da cultura para o desenvolvimento sustentável (Brasil, 2016, p.25).

O ODS 9 enfatiza a construção de infraestruturas resilientes, a promoção da industrialização inclusiva e sustentável e o fomento à inovação. Relaciona-se a este estudo ao reconhecer o papel da ciência e da tecnologia na geração de soluções que reduzam os impactos ambientais do setor produtivo, aspecto diretamente associado às etapas de extração, produção e descarte presentes no ciclo de vida de *smartphones*. Essa orientação aparece na meta 9.4:

Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades (Brasil, 2016, p. 30).

O ODS 12 busca assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, estabelecendo uma conexão direta com a proposta desta pesquisa, uma vez que a análise do ciclo de vida de *smartphones* permite problematizar a linearidade predominante dos sistemas de produção e consumo, contrapondo-a à lógica da EC. As metas desse objetivo reforçam o vínculo com o ensino de química ao destacar a importância da gestão de recursos e resíduos:

12.2 Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais.

12.4 Até 2030, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente.

12.5 Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso.

12.8 Até 2030, garantir que as pessoas, em todos os lugares, tenham informação relevante e conscientização para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida em harmonia com a natureza (Brasil, 2016, p. 33-34).

O destaque a esses três ODS e suas metas específicas demonstra que a Agenda 2030 não deve ser entendida apenas como diretriz política ou internacional, mas como um referencial capaz de orientar práticas educacionais, científicas e tecnológicas em escala local. Nesse sentido, os ODS evidenciam a necessidade de ações coletivas e integradas, nas quais governos, instituições, setores produtivos e sociedade civil compartilhem responsabilidades na construção de caminhos para a sustentabilidade.

3.2 ECONOMIA CIRCULAR

Historicamente, o modelo econômico predominante foi estruturado sobre uma lógica linear de extração, produção, consumo e descarte, na qual o uso intensivo de recursos naturais tem sido a base para o desenvolvimento industrial e o crescimento econômico. No entanto, esse modelo de desenvolvimento tem se mostrado insustentável a longo prazo, tanto para a preservação do planeta quanto para a qualidade de vida das gerações futuras. A crescente demanda por energia e materiais intensificou a pressão sobre os recursos naturais, levando à degradação dos ecossistemas e ao acúmulo de resíduos e poluentes, em particular, a um aumento das emissões de GEE, que agravam de forma significativa as mudanças climáticas (Guarrieiro *et al.*, 2022; Abdalla; Sampaio, 2018).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) alerta para os riscos crescentes associados ao aumento das emissões de GEE. Segundo o painel, a temperatura média da Terra já subiu 1,1 °C em relação aos níveis pré-industriais e pode atingir 2,7 °C até o final deste século, resultando em mudanças nos padrões climáticos e expondo a população mundial a um risco crescente de desastres naturais, insegurança alimentar e escassez de água. Entretanto, esses impactos não estão uniformemente distribuídos, recaindo de maneira mais severa sobre comunidades em situação de vulnerabilidade social, o que acentua as desigualdades existentes (IPCC, 2023).

Em termos econômicos, a dependência do modelo linear também impôs vulnerabilidades significativas. A instabilidade dos mercados de commodities, com flutuações nos preços de matérias-primas essenciais, afeta diretamente a estabilidade das cadeias produtivas globais (Mancini *et al.*, 2015; Fundação Ellen MacArthur, 2013). Um exemplo dessa vulnerabilidade é a atual escassez de elementos essenciais à fabricação de dispositivos e sistemas eletrônicos, como os semicondutores contidos em *microchips* (Guarrieiro *et al.*, 2022), cuja aplicação abrange desde *smartphones* até sistemas industriais complexos.

Frente a essas limitações, a EC emerge como uma alternativa sistêmica e regenerativa, oferecendo uma resposta aos desafios ambientais e econômicos da economia linear. Inspirada no fluxo constante de matéria e energia dos ecossistemas naturais, a EC promove uma transição de uma lógica de “fim de vida” para uma de ciclos fechados, nos quais os produtos e materiais são mantidos em uso por mais tempo, regenerando-se dentro do sistema (Fundação Ellen MacArthur, 2013, 2019). Essa abordagem visa não apenas reduzir a extração de recursos naturais, mas também eliminar o conceito de “lixo”, transformando resíduos em insumos.

O princípio fundamental da EC é a manutenção do valor dos materiais e produtos ao longo do maior tempo possível, minimizando a necessidade de novos insumos. Para Schroeder, Anggraeni e Weber (2019) e Guarieiro *et al.* (2022), esse sistema é sustentado por três estratégias principais: reutilização, recuperação e reciclagem, que, em conjunto, permitem que os ciclos produtivos sejam fechados, reduzindo o consumo de matérias-primas e energia, ao mesmo tempo em que se minimizam os impactos ambientais. Essas estratégias são detalhadas nos tópicos subsequentes, à luz dos referidos autores.

- i. **Reutilização:** A reutilização envolve o prolongamento do ciclo de vida de produtos inteiros ou de suas partes, adiando sua obsolescência. Isso pode ocorrer tanto pela reutilização direta de produtos em seus estados originais, como é o caso de sistemas de embalagens retornáveis, quanto pela remanufatura de componentes. No contexto da EC, a reutilização representa uma estratégia eficiente para reduzir a demanda por novos recursos e limitar a geração de resíduos, ao mesmo tempo em que mantém o valor funcional do produto.
- ii. **Recuperação:** A recuperação refere-se à restauração de produtos danificados, devolvendo-lhes a funcionalidade e prolongando sua vida útil. Em setores como o de eletrônicos, a recuperação pode incluir o reparo de *smartphones*, *laptops* ou televisores, retardando seu descarte. Além disso, essa estratégia contribui para a redução da obsolescência programada, um problema recorrente na economia linear, onde os produtos são intencionalmente desenhados para durarem menos. Ao promover o reparo e a manutenção, a recuperação diminui a pressão sobre os sistemas de produção e reduz o consumo de recursos.
- iii. **Reciclagem:** A reciclagem envolve a transformação de materiais descartados em novas matérias-primas que podem ser reintroduzidas na cadeia produtiva. Esse processo pressupõe a recuperação e o reaproveitamento de recursos anteriormente utilizados, contribuindo para o fechamento do ciclo produtivo e para a redução da demanda por

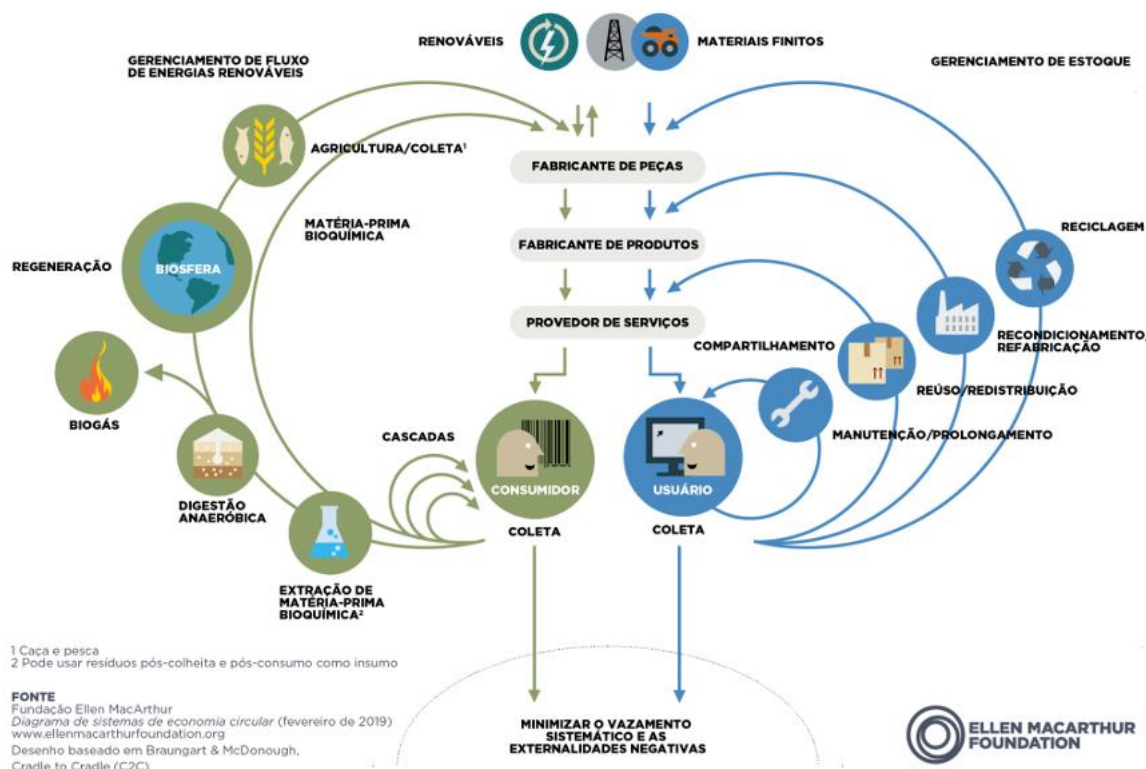
novas matérias-primas. Ao possibilitar a reinserção desses materiais no sistema econômico, a reciclagem atua na mitigação de impactos ambientais associados à extração e ao descarte inadequado de resíduos. Contudo, apesar de seus benefícios, sua efetivação plena enfrenta obstáculos relacionados à complexidade das cadeias produtivas, à heterogeneidade dos materiais e às limitações técnicas e econômicas envolvidas nos processos de separação e recuperação.

Sob a ótica dos ODS da Agenda 2030, práticas como reutilização, recuperação e reciclagem desempenham um importante papel na redução da pressão sobre os recursos naturais, na diminuição da geração de resíduos e na mitigação dos impactos ambientais associados à produção em larga escala. Além de contribuírem para padrões mais sustentáveis de consumo e produção – conforme previsto no ODS 12 e na meta 12.5, que enfatiza a prevenção, reciclagem e reutilização de materiais – essas práticas também dialogam com a meta 11.6, que busca aprimorar a gestão ambiental das cidades, especialmente no que se refere ao manejo adequado dos resíduos sólidos e à redução de seus impactos sobre o ambiente urbano (Brasil, 2016; Schroeder; Anggraeni; Weber, 2019).

Para a Fundação Ellen MacArthur (2013, 2019), a EC é um modelo baseado em três princípios fundamentais: eliminar o desperdício e a poluição, circular produtos e materiais no valor mais elevado e regenerar a natureza. O *design* é central para a implementação desses princípios, pois, ao ser aplicado de forma estratégica, permite criar produtos que minimizem desperdícios, aumentem a durabilidade e promovam o uso eficiente dos recursos. Nesse contexto, a adoção de uma abordagem de *design* circular possibilita a concepção de produtos que sejam planejados para serem reutilizados, reciclados ou regenerados, garantindo assim a continuidade do ciclo de vida dos materiais e a redução do impacto ambiental.

Além das vantagens ambientais, a transição para a EC também impulsiona ganhos socioeconômicos ao criar novas oportunidades de emprego e reduzir as desigualdades regionais, alinhando-se às metas do ODS 8, que busca promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável (Brasil, 2016; Schroeder; Anggraeni; Weber, 2019). Este processo abrange tanto a formalização de postos de trabalho para catadores de materiais recicláveis quanto a criação de novos modelos de negócios, entre os quais se destacam aqueles baseados na oferta de serviços ao invés da aquisição definitiva de bens (Tukker, 2015), como o aluguel de veículos e acomodações. A Figura 3 apresenta o diagrama sistêmico da EC.

Figura 3. Diagrama de borboleta.



O lado esquerdo do diagrama representa os nutrientes biológicos que se decompõem quando devolvidos à natureza por meio de processos como compostagem e digestão anaeróbica, como algodão e madeira. O lado direito representa os nutrientes finitos que devem ser mantidos e reutilizados até o limite de sua capacidade de circulação, como plástico e metais (alumínio, ferro, cobre, entre outros).

Fonte: Fundação Ellen MacArthur, 2019.

3.2.1 Logística reversa

A Logística Reversa (LR) configura-se como um dos mecanismos mais importantes para viabilizar a economia circular, uma vez que permite reinserir resíduos e produtos pós-consumo nos ciclos produtivos, reduzindo a extração de matérias-primas e prolongando a vida útil dos recursos. No Brasil, esse instrumento ganhou força normativa com a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, que estabeleceu princípios e diretrizes para a gestão de resíduos sólidos em âmbito nacional (Brasil, 2010). Entre essas diretrizes destacam-se a prevenção e a redução na geração de resíduos, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a adoção de sistemas de LR. A regulamentação mais recente da PNRS é o Decreto nº 10.936/2022, que cria o Programa Nacional de Logística Reversa, com foco em potencializar os resultados da gestão de resíduos no país (Brasil, 2022a).

Diferente da logística tradicional, que organiza o fluxo do fabricante ao consumidor, a LR estabelece o movimento inverso: devolve resíduos e produtos pós-consumo à indústria para reaproveitamento no processo produtivo ou destinação final ambientalmente adequada. Esse arranjo se ancora no princípio da responsabilidade compartilhada: consumidores devem

descartar seus resíduos em pontos de coleta credenciados; fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes devem estruturar, financiar e operar sistemas de coleta, tratamento e destinação desses materiais, além de adotar práticas que promovam o uso racional dos recursos e a redução dos níveis de poluição; enquanto ao poder público cabe regular e fiscalizar o processo, bem como oferecer, em conjunto com os demais responsáveis pelo sistema, a educação ambiental (Brasil, 2010).

A legislação brasileira tornou obrigatória a LR para cadeias consideradas prioritárias e de maior impacto: (i) agrotóxicos, seus resíduos e embalagens; (ii) pilhas e baterias; (iii) pneus; (iv) óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; (v) lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; (vi) produtos eletroeletrônicos e seus componentes (Brasil, 2010). Posteriormente, outros fluxos foram incorporados por regulamentações específicas, como (vii) medicamentos vencidos ou em desuso e suas embalagens (Brasil, 2020b) e (viii) embalagens em geral (Brasil, 2022b, 2025).

Entre os diferentes setores abrangidos pela PNRS, o de resíduos eletroeletrônicos assume especial relevância no presente estudo, em razão do foco no ciclo de vida de *smartphones* no contexto do ensino de química. Atualmente, o e-lixo é o tipo de resíduo que mais cresce no mundo, aumentando cinco vezes mais rápido do que as taxas de reciclagem globais. De acordo com o *Global E-waste Monitor 2024*, somente em 2022 foram gerados 62 milhões de toneladas de e-lixo, dos quais apenas 22,3% foram coletados e reciclados adequadamente. Desse total, aproximadamente 31 milhões de toneladas correspondiam a metais, 17 milhões a plásticos e 14 milhões a vidro e minerais (Baldé *et al.*, 2024).

No cenário internacional, a China lidera a geração de resíduos eletrônicos, com cerca de 12 milhões de toneladas anuais, seguida pelos Estados Unidos (7 milhões), Índia (4,6 milhões), Japão (2,9 milhões) e Brasil, que ocupa a quinta posição, com mais de 2,4 milhões de toneladas (Baldé *et al.*, 2024) e uma taxa de reciclagem de aproximadamente 3% (Dias *et al.*, 2022). Esse contraste entre o volume expressivo de e-lixo gerado e a baixa taxa de reciclagem evidencia fragilidades da LR no país, marcadas pela insuficiência de infraestrutura de coleta e tratamento, pelos elevados custos operacionais da cadeia e pela limitada participação da população na devolução adequada de seus equipamentos.

Embora a PNRS já previsse, desde 2010, a obrigatoriedade da logística reversa de produtos eletroeletrônicos, o sistema nacional só começou a ser estruturado com a assinatura, em 2020, do Acordo Setorial para a Logística Reversa de Eletroeletrônicos e seus Acessórios, elaborado conjuntamente por entidades representativas do setor eletroeletrônico e pelo governo federal. Entre suas diretrizes, o Acordo, posteriormente institucionalizado pelo Decreto nº

10.240/2020: (i) estabelece metas progressivas de recolhimento, determinando que as empresas passem a coletar e destinar corretamente 1%, em peso, do volume colocado no mercado em 2018, aumentando para 3%, 6%, 12% e 17% até 2025; (ii) prevê a ampliação da infraestrutura nacional para mais de 5.000 pontos de coleta distribuídos nos 400 maiores municípios do país (Brasil, 2020a).

3.3 QUÍMICA VERDE, QUÍMICA CIRCULAR E QUÍMICA SUSTENTÁVEL

A indústria química constitui um dos setores mais estratégicos e influentes da sociedade contemporânea, fornecendo insumos essenciais para áreas como saúde, energia, agricultura, construção civil e tecnologia. Os produtos químicos permeiam praticamente todas as esferas da vida cotidiana, sustentando cadeias produtivas que asseguram bem-estar, inovação e desenvolvimento econômico. Entretanto, esse protagonismo tem sido acompanhado por um modelo linear de produção que, embora tenha propiciado avanços tecnológicos, trouxe consigo severos impactos socioambientais, como poluição, geração de resíduos perigosos, esgotamento de recursos naturais e emissões significativas de GEE (Matlin *et al.*, 2022).

Diante deste cenário, três abordagens emergem para redefinir paradigmas que conciliam a relevância da indústria química com a mitigação de seus impactos: a Química Verde (QV), a Química Circular (QC) e a Química Sustentável (QS).

A QV, sistematizada por Anastas e Warner (1998), representa um marco conceitual voltado para a concepção de processos e produtos menos nocivos, seguros e eficientes. Seus doze princípios fornecem diretrizes para prevenir a geração de resíduos, otimizar a economia de átomos, substituir solventes e reagentes perigosos, utilizar matérias-primas renováveis, priorizar a catálise e desenhar substâncias seguras e biodegradáveis. Trata-se, portanto, de um campo normativo e orientador que atua principalmente na etapa de síntese e processamento, buscando reduzir riscos e tornar a química mais limpa e eficiente.

A QC, por sua vez, insere-se diretamente no escopo da economia circular e amplia a visão da QV ao propor um redesenho sistêmico dos fluxos de materiais. Seu foco está na otimização do uso de recursos, na recirculação de insumos e na extensão do ciclo de vida dos produtos químicos, o que inclui a coleta e o uso de resíduos, a maximização da circulação de átomos e o *design* orientado ao reuso (Keijer; Bakker; Slootweg, 2019; Guarieiro *et al.*, 2022).

Já a QS atua como um campo abrangente que busca alinhar ciência, inovação e produção aos pilares do desenvolvimento sustentável. Seu escopo contempla não apenas a redução de impactos ambientais, mas também a consideração de aspectos sociais e econômicos, como saúde, segurança, equidade e viabilidade econômica. Mais recentemente, esse campo tem se

aproximado do paradigma “seguro e sustentável por *design*” (em inglês, *Safe and Sustainable-by-Design*, SSbD), que reforça a necessidade de que novos materiais sejam projetados, desde a fase de pesquisa e desenvolvimento, de forma intrinsecamente segura e sustentável, minimizando riscos à saúde humana e ao ambiente e considerando circularidade, eficiência de recursos e baixo impacto ao longo de todo o ciclo de vida (Apel *et al.*, 2024; Slootweg, 2024).

Embora apresentem enfoques distintos, essas três abordagens convergem em pontos centrais: todas buscam reduzir riscos químicos, minimizar danos ao meio ambiente e garantir maior aproveitamento dos recursos. No entanto, quando tratadas isoladamente, podem gerar lacunas. Slootweg (2024) exemplifica que um bioplástico concebido sob princípios da QV pode minimizar toxicidade, mas se não for pensado em termos de circularidade, pode terminar como resíduo persistente; por outro lado, a circularidade sem critérios de toxicidade pode perpetuar substâncias perigosas em ciclos fechados, ampliando riscos à saúde e ao ambiente.

A integração entre QV, QC e QS cria, portanto, uma abordagem holística capaz de fechar ciclos produtivos e garantir que a segurança e a integridade ambiental sejam consideradas em todas as etapas. Portanto, ao adotar práticas integradas, a indústria química contribui diretamente para os ODS, conforme apontam Guarieiro *et al.* (2022): (i) promovendo infraestrutura resiliente e impulsionando a inovação (ODS 9); (ii) reduzindo mortes e doenças associadas a produtos químicos perigosos e à poluição ambiental (ODS 3, meta 3.9); (iii) otimizando a eficiência no uso de recursos e aprimorando a gestão de resíduos químicos ao longo do ciclo de vida (ODS 12, metas 12.2, 12.4 e 12.5); e (iv) melhorando a qualidade da água, reduzindo a poluição e a liberação de substâncias tóxicas (ODS 6, meta 6.3) (Brasil, 2016).

3.4 EDUCAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E O ENSINO DE QUÍMICA

A Educação para o Desenvolvimento Sustentável (EDS) consolidou-se como um marco orientador das políticas educacionais contemporâneas ao propor que a educação seja um instrumento de enfrentamento dos desafios ambientais, sociais e econômicos do século XXI. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), a EDS é um processo formativo que capacita indivíduos a tomar decisões responsáveis e agir de maneira ética em favor da integridade ambiental, da viabilidade econômica e da construção de sociedades mais justas, tanto para as gerações atuais quanto para as futuras (Rieckmann, 2017).

A Década das Nações Unidas da Educação para o Desenvolvimento Sustentável (2005–2014), coordenada pela UNESCO, representou um marco institucional nesse movimento ao fomentar a integração sistemática dos princípios do desenvolvimento sustentável em todos os níveis e modalidades de ensino. O relatório final da Década indica que, embora tenham ocorrido avanços significativos na incorporação da sustentabilidade às políticas educacionais, persistem desafios relacionados à transformação das práticas pedagógicas e à efetiva articulação entre conhecimento científico, participação social e ação transformadora (Buckler; Creech, 2014).

No ensino de química, isso implica reconhecer que o conhecimento científico não é neutro, tampouco dissociado das dinâmicas sociais, econômicas e tecnológicas que o produzem e o transformam. Tal compreensão aproxima-se da perspectiva Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), a qual entende a ciência como prática histórica e socialmente situada, permeada por interesses, valores e contextos culturais (Aikenhead, 2006; Acevedo-Díaz, 2004). Nessa perspectiva, a EDS transcende a simples inserção de conteúdos ambientais no currículo de química. Não se trata de acrescentar tópicos sobre sustentabilidade a uma estrutura já consolidada, mas de reorientar o modo como os conceitos são selecionados, articulados e problematizados em sala de aula (Burmeister; Rauch; Eilks, 2012; Rieckmann, 2017).

Uma organização curricular orientada pelos princípios da EDS possibilita que os conceitos químicos deixem de ser trabalhados como unidades abstratas e passem a ser mobilizados na análise de sistemas concretos. Assim, ao discutir as transformações químicas envolvidas na produção de combustíveis, na síntese de polímeros ou na obtenção de metais, por exemplo, o estudante é convidado a compreender não apenas seus mecanismos de reação e aspectos termodinâmicos, mas também os custos ambientais e energéticos, as implicações socioeconômicas e as decisões tecnológicas envolvidas nesses processos (Eaton; Delaney; Schultz, 2019).

Sjöström e Eilks (2018) argumentam que o ensino de ciências não deve restringir-se à dimensão instrumental do conhecimento, voltada apenas à compreensão técnica de conceitos e procedimentos. Para os autores, uma educação científica socialmente orientada requer a articulação entre conhecimento disciplinar, análise crítica e responsabilidade frente às implicações éticas e sociais da ciência. Nesse sentido, desloca-se o foco do acúmulo de conteúdos para a formação de sujeitos críticos, capazes de participar de debates informados e tomar decisões fundamentadas em contextos reais – o que também dialoga com a crítica freireana à transmissão mecânica do conhecimento (De Freitas, Freitas, 2022) e se aproxima das discussões sobre alfabetização e letramento científico.

Para Chassot (2018), a alfabetização científica implica compreender a ciência como linguagem que possibilita “ler o mundo”, superando a mera memorização de conceitos. À luz desse entendimento, ser alfabetizado cientificamente significa interpretar fenômenos naturais e tecnológicos à luz do conhecimento científico. De modo complementar, Sasseron e De Carvalho (2011) indicam que a alfabetização científica manifesta-se em práticas que envolvem argumentação, construção de explicações e tomada de decisões com base em evidências. Ao desenvolver tais práticas, o estudante passa a utilizar o conhecimento científico como instrumento de análise e posicionamento, ampliando sua capacidade de intervenção crítica.

No ensino de química, isso implica mobilizar conceitos não apenas para resolver exercícios, mas para analisar processos produtivos, problematizar impactos ambientais e compreender as escolhas tecnológicas que estruturam a sociedade, pois é por meio da negociação de significados que os conceitos deixam de ser definições estáticas e passam a operar como ferramentas cognitivas e argumentativas (Mortimer; Scott, 2003).

Por outro lado, para Santos (2007), o letramento científico trata-se da capacidade de utilizar saberes científicos na interpretação de situações concretas e na participação em debates que envolvem questões sociocientíficas. O letramento científico, nesse sentido, ultrapassa a compreensão conceitual e envolve a análise crítica de informações e a aplicação do conhecimento em contextos que articulam ciência, tecnologia e sociedade. Assim, o letramento científico corresponde à formação técnica no domínio das linguagens, dos modos de argumentação e das ferramentas mentais próprias da ciência.

Assim, ao reconhecer a química como conhecimento implicado nas dinâmicas produtivas, como se observa, por exemplo, na análise do ciclo de vida de *smartphones*, o ensino da disciplina assume papel formativo que ultrapassa a transmissão de conteúdos e se vincula à compreensão crítica dos modelos de desenvolvimento e suas implicações. A EDS, nesse contexto, não se configura como temática adicional, mas como horizonte epistemológico que orienta a seleção, a problematização e a significação dos conceitos.

3.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia quantitativa que permite analisar os impactos ambientais potenciais associados a um produto, processo ou serviço, considerando todas as etapas que compõem o seu ciclo de vida. No caso específico de um produto, esse ciclo corresponde à sucessão de fases interligadas que o acompanham, desde a extração de matérias-primas, passando pela produção, transporte e uso, até chegar à destinação final, que pode incluir reuso, reciclagem ou descarte (Mancini *et al.*, 2015).

Trata-se de uma abordagem sistêmica, cuja finalidade é compreender de forma integrada como cada etapa contribui para o consumo de recursos naturais, a geração de resíduos e as emissões ao meio ambiente. Nesse sentido, os resultados de um estudo de ACV permitem identificar pontos críticos ao longo da cadeia de valor (dos fornecedores até o consumidor final), propor melhorias de eficiência, reduzir impactos ambientais, comparar alternativas de produtos ou processos e apoiar o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis.

As normas ISO 14040 e 14044 constituem referências centrais no âmbito da avaliação do ciclo de vida, estabelecendo, respectivamente, os princípios e a estrutura dos estudos de ACV, bem como os requisitos e as diretrizes metodológicas para a sua condução. De acordo com essas normativas, a ACV é sistematizada em quatro fases (ABNT, 2009a, 2009b):

- i. Definição do objetivo e escopo:** Estabelece o propósito do estudo, o produto ou processo a ser avaliado e os limites do sistema, delimitando critérios temporais e geográficos do estudo. O escopo delimita o que será incluído na avaliação, estabelecendo os parâmetros que irão conduzi-la.
- ii. Análise do inventário:** Consiste no levantamento e quantificação de entradas (como energia, matérias-primas e água) e saídas (como emissões, efluentes e resíduos) de todos os processos dentro do ciclo de vida do produto.
- iii. Avaliação de impacto:** Esta etapa consiste na conversão dos dados levantados no inventário em potenciais impactos ambientais, alocando os fluxos em categorias de impacto específicas. As categorias podem incluir: o aumento da emissão de GEE (mudança climática); o incremento da acidez em solos, águas e ar (acidificação); a poluição de corpos d'água por excesso de nutrientes (eutrofização); a presença de agentes tóxicos com potencial de causar danos à saúde humana (toxicidade humana) ou aos ecossistemas (ecotoxicidade); e o esgotamento de recursos naturais não renováveis, entre outras.
- iv. Interpretação:** Analisa os resultados obtidos no contexto do objetivo e do escopo definido. Esta fase deve identificar pontos críticos, verificar a consistência dos dados, propor alternativas para reduzir impactos e orientar a adoção de medidas eficazes de mitigação e produção mais sustentável.

Em síntese, a ACV constitui-se em uma ferramenta estratégica de gestão ambiental, permitindo mensurar e compreender os impactos associados aos produtos em todas as etapas de sua existência. Sua aplicação é ampla e pode apoiar desde a elaboração de políticas públicas e a definição de critérios para certificação e rotulagem ambiental, até o desenvolvimento de

novos produtos e processos (Mancini *et al.*, 2015). No setor eletrônico, particularmente na cadeia produtiva de *smartphones*, um estudo de ACV possibilita identificar pontos críticos, como a extração intensiva de matérias-primas e o descarte inadequado de resíduos, oferecendo subsídios para práticas mais sustentáveis e alinhadas às demandas globais de circularidade (Ercan *et al.*, 2016; Apple, 2022; Samsung, 2024).

3.5.1 Etapas do ciclo de vida de um *smartphone*

O primeiro aparelho celular comercialmente disponível no Brasil, o Motorola PT-550, foi lançado pela Motorola na década de 1990 e ficou popularmente conhecido como “tijolão” devido ao seu tamanho e peso (Moraes, 2017). Com a rápida miniaturização de componentes eletrônicos e a popularização das redes digitais, esses modelos tornaram-se progressivamente menores e mais multifuncionais, abrindo caminho para os *smartphones* de hoje: telas sensíveis ao toque, sistemas operacionais sofisticados, acesso facilitado à internet e integração de recursos de inteligência artificial, que ampliaram de forma exponencial suas funcionalidades.

Os *smartphones* constituem dispositivos complexos, cuja própria sofisticação faz com que as etapas de produção, uso e descarte demandem grandes volumes de recursos naturais e energéticos, resultando em potenciais impactos ambientais e sociais ao longo de todo o seu ciclo de vida. Nesse contexto, a presente dissertação propõe examinar esse ciclo com vistas a compreender os desafios que se impõem à sustentabilidade, bem como sua articulação com conceitos químicos específicos. Essa análise é estruturada a partir de cinco fases principais, representadas na Figura 4 e desenvolvidas nos tópicos subsequentes: extração de matérias-primas, produção, transporte, uso e descarte (Guvendik, 2014; Suckling; Lee, 2015; Ercan *et al.*, 2016; IBICIT, 2017; Apple, 2022; Samsung, 2024).

Figura 4. Etapas do ciclo de vida de um *smartphone*.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

i. Extração de matérias-primas:

A etapa inicial do ciclo de vida de um *smartphone* corresponde à extração de matérias-primas, atividade que fornece insumos essenciais à cadeia produtiva. A mineração é a principal atividade responsável por essa etapa, permitindo o acesso a recursos minerais estratégicos que, além de integrarem os dispositivos eletrônicos, sustentam também setores como a construção civil, o transporte, a produção de energia e a indústria química. Distinguem-se dois principais tipos de mineração: a céu aberto, em que há a remoção de grandes volumes de solo e rocha para alcançar depósitos minerais próximos à superfície, e a subterrânea, que demanda a construção de túneis e galerias para explorar reservas localizadas em maiores profundidades (Curi, 2017).

A diversidade de elementos químicos presentes nesses dispositivos reflete a pressão exercida sobre a exploração mineral. Atualmente, um único aparelho pode conter até 70 elementos, conforme sintetizado no Quadro 1.

Quadro 1. Elementos utilizados na fabricação de *smartphones* e suas funções.

Categoria	Símbolo dos elementos	Função principal
Tela	In, Sn, O	Telas sensíveis ao toque (<i>touchscreens</i>).
	Si, Al, K, O	Durabilidade e resistência da tela.
	Y, Eu, Tb, Dy	Produção de cores mais vívidas.
Eletrônica	Cu, Au, Ag, Ta	Condutores elétricos para circuitos e conexões.
	Nd, Dy, Pr	Imãs, alto-falantes e motores de vibração.
	Sn, Pb	Soldas para conectar componentes eletrônicos.
	As, Sb, Si, Ga	Semicondutores e <i>microchips</i> .
Bateria	Li, Co, C, O	Baterias de íon-lítio de alta densidade energética.
Capa	Al, Zn, Mg, C	Carcasas mais leves e resistentes.

Fonte: Bookhagen *et al.*, 2020; Rohrig, 2015; Jowitt *et al.*, 2018; Brunning, 2014.

Uma forma de compreender a complexidade e a intensidade dos impactos associados à etapa de extração é analisar alguns exemplos. O primeiro deles é o alumínio, obtido principalmente a partir da bauxita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, em que n pode variar de 1 a 3), um minério concentrado em regiões tropicais e subtropicais, onde se encontram cerca de 90% das reservas mundiais, como a Guiné (24%), a Austrália (20%) e o Brasil (9%). Por ocorrer próxima à superfície, sua extração ocorre predominantemente por mineração a céu aberto, método que

demanda extensas áreas e frequentemente avança sobre florestas tropicais e zonas de alta biodiversidade, provocando desmatamento, alteração do relevo, aceleração de processos erosivos e deposição de metais pesados (Georgitzikis *et al.*, 2021; Wilson *et al.*, 2025).

Além disso, grande parte das jazidas que abastecem os mercados internacionais situa-se em países com baixa governança ambiental e/ou em regiões de escassez hídrica, o que intensifica os impactos sobre comunidades locais. A geração da chamada lama vermelha, um rejeito altamente alcalino produzido no processo Bayer de refino da bauxita (discutido na etapa de produção), constitui um dos maiores desafios ambientais da cadeia do alumínio. Esse resíduo exige extensas áreas de contenção e, em caso de vazamentos ou falhas estruturais, pode contaminar solos e corpos d'água com soluções altamente alcalinas e metais residuais. Para cada 1 tonelada de alumina produzida, são gerados cerca de 600 kg a 1,5 tonelada de lama vermelha (Georgitzikis *et al.*, 2021; Wilson *et al.*, 2025).

Outro exemplo é o cobre, comumente encontrado em minerais sulfetados como a calcopirita (CuFeS_2). Sua exploração ocorre tanto em minas a céu aberto quanto em operações subterrâneas e, em ambos os casos, demanda sucessivas etapas de beneficiamento e refino destinadas a concentrar o metal e separá-lo da matriz mineral. Além dos impactos diretos associados à abertura de cavas, como a remoção de cobertura vegetal, fragmentação de habitats e alteração do relevo (Martim; Dos Santos, 2014), a atividade mineradora pode desencadear um problema ambiental particularmente crítico: a drenagem ácida de minas.

A drenagem ácida de minas ocorre quando rochas e/ou resíduos contendo minerais sulfetados são expostos ao oxigênio atmosférico e a água, produzindo soluções altamente ácidas capazes de lixiviar elementos presentes nos materiais geológicos e rejeitos da área minerada, resultando em concentrações elevadas de espécies como SO_4^{2-} , Al, Fe, Mn, Zn e, em menores proporções, As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni e Pb (Campaner; Luiz-Silva, 2009).

A obtenção do lítio, por sua vez, pode ser realizada a partir de dois tipos de depósitos: salmouras, como as localizadas no chamado “triângulo do lítio” (Argentina, Bolívia e Chile), e minerais sólidos, como a espodumena ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), explorada principalmente na Austrália. No caso das salmouras, o processo exige o bombeamento de grandes volumes de água subterrânea em regiões naturalmente áridas, onde o cloreto de lítio é concentrado por evaporação até precipitar como carbonato de lítio (Shriver; Atkins, 2008). De acordo com Xerri (2025), essa forma de extração pressiona recursos hídricos já limitados, altera a disponibilidade de água doce e afeta ecossistemas sensíveis. Além disso, essas mudanças repercutem diretamente sobre as comunidades indígenas, que dependem desses ambientes para a manutenção de suas atividades tradicionais, gerando impactos econômicos, culturais e sociais.

Como último exemplo, destaca-se o cobalto, cuja exploração está fortemente concentrada na República Democrática do Congo, responsável por cerca de 76% da produção mundial, sobretudo em depósitos associados a grandes formações de cobre, onde o cobalto ocorre como subproduto natural desses minérios. Por se tratar de um recurso estratégico, observa-se uma crescente demanda global por sua extração, impulsionada principalmente pela expansão da indústria de baterias de íon-lítio, sendo a China o maior consumidor mundial (USGS, 2025). Entretanto, a realidade socioambiental permanece crítica: a exploração é frequentemente marcada por violações graves de direitos humanos, como o uso de trabalho infantil, deslocamento forçado de comunidades, condições de trabalho inseguras e a persistência de conflitos armados motivados pela disputa pelo controle das áreas mineralizadas, o que evidencia profundas assimetrias sociais e desafios estruturais ainda não superados (UNEP, 2022).

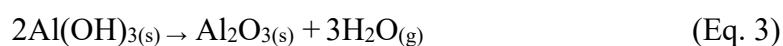
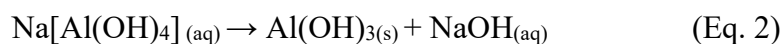
No Brasil, os riscos socioambientais associados à mineração tornaram-se particularmente visíveis nos desastres envolvendo barragens de contenção de rejeitos em Minas Gerais. No município de Mariana, em 2015, o rompimento da barragem do Fundão liberou um volume de lama estimado em 55 milhões de metros cúbicos, causando a morte de 18 pessoas e a contaminação de mais de 600 km de corpos hídricos, comprometendo a subsistência de comunidades inteiras (CNDH, 2017). Em 2019, o rompimento da barragem da Mina de Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, lançou cerca de 10 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro, afetando o abastecimento de água e resultando em 270 vítimas fatais. Em ambos os casos, foram identificados teores elevados de metais pesados nas águas, como Pb e Hg, os quais representam grande risco ambiental devido ao potencial de bioacumulação e biomagnificação ao longo das cadeias tróficas (Pereira; Picanço, 2020).

ii. Produção

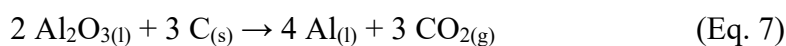
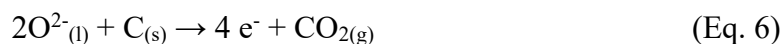
A etapa de produção corresponde ao processo de transformação da matéria-prima bruta em componentes industriais funcionais. Em um *smartphone*, cerca de 45% da massa é constituída por metais, 32% por vidro, 17% por plásticos e 6% por outros materiais, como cerâmicas e compostos específicos (UNCTAD, 2024).

Um dos grandes desafios desta etapa do ciclo de vida de *smartphones* é o consumo intensivo de energia. Entre os exemplos mais emblemáticos, destaca-se a produção de alumínio metálico, conduzida industrialmente em duas etapas: o processo Bayer, responsável pela obtenção da alumina (Al_2O_3) a partir da bauxita, e o processo Hall-Héroult, em que essa alumina é submetida à eletrólise ígnea para gerar alumínio metálico (Atkins; Jones, 2018).

No processo Bayer, a bauxita é moída e tratada com solução concentrada de hidróxido de sódio (NaOH) sob condições moderadas de pressão e temperatura, formando uma solução aquosa de aluminato de sódio, $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ (Eq. 1), e um resíduo sólido (lama vermelha), que é separado por filtração. Após o resfriamento da solução resultante, adicionam-se cristais de hidróxido de alumínio, $\text{Al}(\text{OH})_3$, os quais induzem a precipitação controlada de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Eq. 2), convertendo o alumínio da fase solúvel para a fase sólida. O precipitado é então submetido à calcinação, processo que consiste no aquecimento do $\text{Al}(\text{OH})_3$ em fornos de altas temperaturas ($\cong 1000^\circ\text{C}$), levando a formação de alumina pura, insumo do processo Hall-Hérault (Eq. 3) (Constantino *et al.*, 2002).



No processo Hall-Hérault, a alumina é dissolvida em criolita fundida (Na_3AlF_6), o que reduz seu ponto de fusão de cerca de 2050°C para aproximadamente 950°C , viabilizando a eletrólise. A mistura fundida é submetida a corrente elétrica em cubas eletrolíticas, constituídas externamente por uma caixa de aço e revestidas internamente por carbono, que atua como cátodo, enquanto blocos de grafite mergulhados no eletrólito funcionam como ânodo. Durante a eletrólise, ocorre a dissociação da alumina em íons Al^{3+} e O^{2-} (Eq. 4), seguida pela redução dos cátions Al^{3+} no cátodo, formando alumínio metálico líquido (Eq. 5), enquanto os ânions O^{2-} reagem com o ânodo de carbono, liberando dióxido de carbono (Eq. 6) (Atkins; Jones, 2018). A reação global do processo é representada pela equação (Eq. 7).



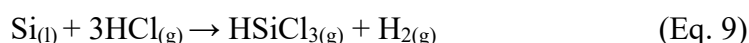
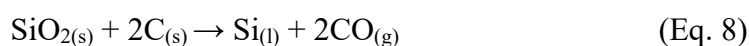
Para cada tonelada de alumínio metálico produzida, são necessárias, em média, 4 toneladas de bauxita e entre 13.000 e 16.000 kWh de eletricidade (International Aluminium Institute, 2024). A produção primária desse metal responde por cerca de 2% das emissões globais de dióxido de carbono equivalente¹ (CO_2eq), liberando aproximadamente 15 toneladas de CO_2eq para cada tonelada de alumínio obtida. Nesse cenário, a China se destaca como a

¹Dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) é uma unidade de medida que permite comparar o impacto climático de diferentes GEE considerando seu potencial de aquecimento global, comparando-os ao CO_2 .

principal responsável, tanto pela maior parcela da produção mundial quanto pela consequente contribuição às emissões do setor (Hasanbeigi; Springer; Shi, 2022).

Outro exemplo é a produção de semicondutores, em especial os à base de silício, segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, obtido principalmente a partir do dióxido de silício (SiO₂) presente no quartzo e na sílica. Para aplicações eletrônicas, o silício precisa atingir um grau de pureza extremamente elevado, da ordem de 99,9999999%, o que equivale a menos de uma parte por bilhão de impurezas (1 ppb) (Yuan *et al.*, 2025). Para alcançar esse nível, são empregados procedimentos contínuos de alta precisão, que envolvem não apenas sucessivas etapas de purificação e preparo do material, mas também a utilização de ambientes industriais controlados, conhecidos como *cleanrooms*, indispensáveis para evitar contaminações que possam comprometer a performance elétrica dos semicondutores e que, por sua vez, intensificam o consumo energético do processo (Ruberti, 2023).

Entre os métodos químicos aplicados na produção de semicondutores, opta-se por destacar dois exemplos que se baseiam em reações de oxirredução (ou redox), caracterizadas pela transferência de elétrons entre espécies químicas: a redução carbotérmica, responsável por converter o dióxido de silício em silício metalúrgico em fornos de alta temperatura (Eq. 8); e o refinamento eletrônico, no qual o silício metalúrgico reage com ácido clorídrico, formando triclorossilano (Eq. 9), que posteriormente é reduzido com hidrogênio, originando o silício de grau eletrônico de altíssima pureza (Eq. 10) (MicroChemicals, 2025).



Estudos de ACV realizados para diferentes modelos de *smartphones* confirmam que a fase de produção é a principal responsável pelas emissões de GEE (Apple, 2022; Samsung, 2024). Conforme sintetizado no Quadro 2, mais de 80% da pegada de carbono total² de um aparelho decorre dessa etapa, superando de forma expressiva as demais fases. Esse resultado evidencia não apenas a intensidade energética dos processos industriais envolvidos, mas também a dependência da matriz elétrica utilizada, o que reforça a importância de uma transição energética baseada em fontes renováveis para mitigar os impactos da cadeia produtiva.

² Pegada de carbono é um indicador ambiental que quantifica a totalidade das emissões de GEE associadas direta ou indiretamente a uma atividade, produto, serviço, organização ou indivíduo, ao longo de seu ciclo de vida. Essas emissões incluem principalmente dióxido de carbono, mas também metano (CH₄) e outros gases.

Quadro 2. Pegada de carbono total e distribuição percentual das emissões ao longo do ciclo de vida de dois modelos de *smartphones*.

Modelo	Pegada total*	Produção	Uso	Transporte	Fim de vida
iPhone 14 Pro	65,0	81,0%	15,0%	3,0%	<1,0%
Galaxy S24 Ultra	66,4	85,7%	8,4%	4,2%	1,7%

*Os valores apresentados correspondem à pegada de carbono total estimada para a produção, uso, transporte e fim de vida (descarte) de uma unidade do aparelho, expressa em quilogramas de CO₂eq.

Fonte: Apple, 2022; Samsung, 2024.

A etapa de produção também envolve outros GEE de elevado impacto climático, como o trifluoreto de nitrogênio (NF₃) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆), utilizados em processos de limpeza e gravação de circuitos eletrônicos (Ruberti, 2023). Embora empregados em sistemas industriais rigorosamente controlados, eventuais vazamentos podem gerar impactos climáticos expressivos. Considerando um horizonte de 100 anos, o NF₃ possui potencial de aquecimento global aproximadamente 17.400 vezes superior ao CO₂, enquanto o SF₆ alcança cerca de 24.300 vezes (Greenhouse Gas Protocol, 2024).

Um último fator crítico a ser destacado refere-se à geração de resíduos industriais perigosos. Entre eles estão metais pesados, como chumbo, cádmio e cromo, e POPs, como retardantes de chama bromados (SSC, 2023). O gerenciamento inadequado desses resíduos pode levar à contaminação de solos e recursos hídricos, à degradação da qualidade do ar e à exposição direta de populações a substâncias nocivas, o que reforça a criticidade da fase de produção no ciclo de vida de *smartphones*.

iii. Transporte

A etapa de transporte no ciclo de vida de um *smartphone* corresponde ao deslocamento de matérias-primas, componentes e produtos finais ao longo de cadeias logísticas globais. Essa fase conecta regiões de extração mineral, plantas industriais e pontos de distribuição, dependendo fortemente de combustíveis fósseis.

Os combustíveis mais utilizados nessa etapa são predominantemente hidrocarbonetos, compostos orgânicos formados exclusivamente por átomos de carbono e hidrogênio unidos por ligações covalentes (Constantino, 2008). A maior parte desses hidrocarbonetos provém do refino do petróleo, recurso natural de origem fóssil que se forma ao longo de milhões de anos a partir da decomposição de matéria orgânica soterrada em ambientes de alta pressão e temperatura. No processo industrial, o petróleo cru é separado por destilação fracionada, técnica que se baseia na diferença dos pontos de ebulição dos componentes da mistura, permitindo a obtenção de frações como gasolina, querosene e nafta, cada qual com características específicas

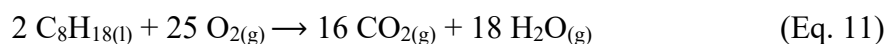
de volatilidade e composição química (Prauchner *et al.*, 2023). O Quadro 3 resume os principais combustíveis obtidos a partir do refino do petróleo.

Quadro 3. Principais combustíveis derivados do petróleo.

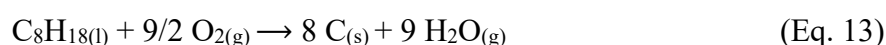
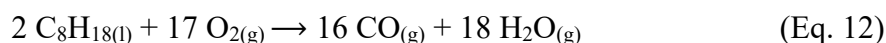
Combustível	Número de carbonos
Gás natural veicular	C ₁
Gasolina	C ₅ –C ₁₂
Querosene de aviação	C ₉ –C ₁₅
Diesel	C ₁₂ –C ₂₅
Óleo diesel marítimo	C ₉ –C ₃₀

Fonte: Prauchner *et al.*, 2023; Vibra Energia; 2020.

Do ponto de vista químico, a combustão desses hidrocarbonetos pode ocorrer de duas formas principais (Solomons; Fryhle; Snyder, 2024), conforme exemplificado a seguir pela gasolina, cujo constituinte representativo é o *n*-octano (C₈H₁₈). Na combustão completa, em que há excesso de gás oxigênio, o processo é energeticamente mais eficiente e resulta na formação de dióxido de carbono e água (Eq. 11).



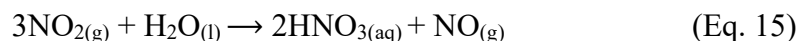
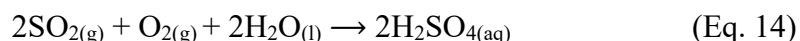
Já na combustão incompleta, caracterizada pela deficiência de gás oxigênio, a oxidação é parcial e resulta em monóxido de carbono (CO), gás tóxico (Eq. 12), e/ou carbono sólido (fuligem) (Eq. 13).



A dependência histórica da sociedade em relação a combustíveis fósseis tem contribuído de forma decisiva para a intensificação do efeito estufa e para o aquecimento global. Segundo o IPCC (2023), as emissões globais de GEE continuam crescendo e já provocaram um aumento médio de 1,1 °C na temperatura do planeta em comparação com níveis pré-industriais. O setor de transporte, em particular, responde por cerca de 15% das emissões globais de GEE. No Brasil, concentra aproximadamente 50% das emissões associadas ao setor energético. Em 2024, a emissão foi de 214,3 Mt CO_{2eq} de um total de 431,3. Neste ano, o setor de transporte representou 33,2% do consumo de energia no país, sendo o líder de consumo. Dentro desse cenário, destaca-se o modal rodoviário, responsável pela maior parcela da matriz logística nacional, no qual o transporte de cargas é altamente dependente do diesel fóssil (EPE, 2025).

Além do CO₂, a queima do diesel libera poluentes atmosféricos primários, como óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Esses gases são precursores da chuva ácida e

podem oxidar-se no ar e reagir com a água, formando ácidos fortes como o ácido sulfúrico (Eq. 14) e o ácido nítrico (Eq. 15):



Atualmente, o diesel comercializado no Brasil é o Diesel S10, que possui apenas 10 partes por milhão (ppm) de enxofre, em substituição ao antigo S500, que continha até 500 ppm (ANP, 2024). Além disso, vigora no país a adição obrigatória de 15% em volume de biodiesel ao diesel fóssil. A mistura denominada B15, composta por 15% de biodiesel e 85% de diesel mineral, contribui para a diversificação da matriz energética e para a diminuição relativa das emissões, uma vez que o biodiesel é obtido de fontes renováveis, como óleos vegetais e gorduras residuais (ANP, 2025a).

Como parte das estratégias nacionais de transição para combustíveis de menor impacto ambiental, a Lei do Combustível do Futuro (Lei nº 14.993/2024) estabelece mecanismos destinados à redução da intensidade de carbono no setor de transportes e ao estímulo ao desenvolvimento e à utilização de combustíveis de baixa emissão (Brasil, 2024). Entre suas diretrizes, a legislação institui o Programa Nacional de Diesel Verde, que visa diminuir a dependência de derivados fósseis e promover a pesquisa, a produção e a comercialização do chamado diesel verde, um combustível renovável obtido por diferentes rotas tecnológicas, como o hidrotreatamento de óleos vegetais, algas ou gorduras de origem animal.

Dentre as vantagens ambientais do diesel verde, destacam-se o baixo teor de enxofre e a menor concentração de compostos aromáticos, características que contribuem para a redução das emissões de gases poluentes e de material particulado. Ademais, o diesel verde apresenta compatibilidade integral com os motores atualmente em operação, devido à sua semelhança química com o diesel fóssil, permitindo sua utilização sem necessidade de adaptações tecnológicas (CNT, 2024).

iv. Uso

A etapa de uso constitui o período mais longo e contínuo do ciclo de vida de um *smartphone*. Nessa fase, o desempenho e a durabilidade do aparelho dependem, sobretudo, da bateria, um sistema eletroquímico que viabiliza a conversão e o armazenamento de energia.

Uma pilha é um dispositivo formado por dois eletrodos (ânodo e cátodo) imersos em um eletrólito, capaz de converter energia química em energia elétrica por meio de reações de oxirredução espontâneas. O ânodo corresponde ao polo negativo, onde ocorre a oxidação,

enquanto o cátodo constitui o polo positivo, onde ocorre a redução. A eletrólise, por sua vez, representa o processo inverso: uma fonte externa de corrente elétrica é utilizada para forçar a passagem de elétrons em uma reação redox não espontânea. Nesse caso, os eletrodos mantêm sua função (o ânodo promove a oxidação e o cátodo a redução), mas há uma inversão funcional dos polos (Brady; Humiston, 1986).

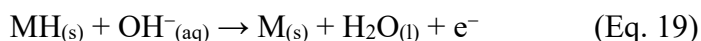
As baterias correspondem a associações de duas ou mais pilhas, dispostas em série ou em paralelo, com a finalidade de fornecer maior tensão elétrica ou capacidade de carga (Brown; Lemay; Bursten, 2005). Em *smartphones*, são utilizadas baterias secundárias, também denominadas recarregáveis, caracterizadas pela reversibilidade de suas reações eletroquímicas (Prabhansu; Kumar, 2023). Nesses sistemas, a descarga equivale ao funcionamento espontâneo da pilha, enquanto a recarga corresponde à etapa de eletrólise, em que a energia elétrica fornecida por uma fonte externa reverte os processos redox, restabelecendo a condição inicial dos reagentes e a disponibilidade energética do sistema.

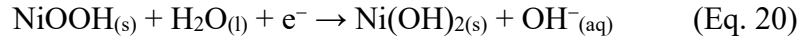
As primeiras versões comerciais de celulares incorporaram baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd), nas quais o ânodo era constituído por cádmio metálico e o cátodo por óxido-hidróxido de níquel (NiOOH), em meio alcalino. No processo de descarga, ocorre a oxidação do cádmio no ânodo (Eq. 16), enquanto no cátodo há a redução do NiOOH (Eq. 17). A soma das duas semirreações resulta na equação global (Eq. 18), que representa o funcionamento espontâneo da pilha (Brown; Lemay; Bursten, 2005).



Apesar de eficientes, essas baterias foram gradualmente substituídas por baterias de níquel-hidreto metálico (Ni-MH) em razão da elevada toxicidade do cádmio, um metal pesado classificado como cancerígeno para humanos, com alto potencial de contaminação ambiental e bioacumulação em organismos vivos (IARC, 2025). As baterias Ni-MH mantêm o mesmo cátodo de NiOOH e o eletrólito alcalino, mas substituem o cádmio por hidrogênio armazenado sob a forma de hidreto metálico, MH (em que M representa uma liga metálica, geralmente envolvendo elementos terras raras em combinação com Ni, Co e Al).

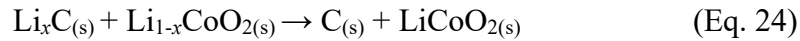
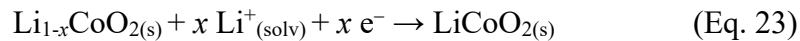
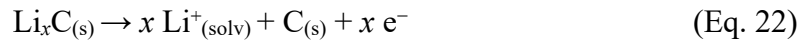
Nessa configuração, o hidreto metálico é oxidado no ânodo (Eq. 19) e o NiOOH permanece sendo reduzido no cátodo (Eq. 20). A equação global é apresentada na Equação 21 (Brown; Lemay; Bursten, 2005; Prabhansu; Kumar, 2023).





Atualmente, as baterias de íon-lítio representam a tecnologia predominante³ em *smartphones*, *notebooks*, *tablets* e veículos elétricos, devido à sua elevada densidade energética, maior durabilidade e menor peso em comparação às gerações anteriores.

Nestas baterias, o ânodo é formado por grafite, no qual os íons de lítio se intercalam entre as camadas de carbono, enquanto o cátodo é geralmente composto por óxidos metálicos de transição, sendo o óxido de lítio-cobalto ($\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$) o mais utilizado (Bocchi; Biaggio; Rocha-Filho, 2019). O eletrólito consiste em sais de lítio, como o hexafluorofosfato de lítio (LiPF_6), dissolvidos em solventes orgânicos. Durante a descarga, os íons Li^+ formados no ânodo (Eq.22) migram para o cátodo por meio do eletrólito (Eq. 23). Na recarga, o processo é invertido: uma corrente elétrica externa força os íons Li^+ a retornar ao ânodo de grafite, reiniciando o ciclo. A reação global que representa o funcionamento da bateria durante a descarga é apresentada na Equação 24 (Prabhansu; Kumar, 2023).



Embora tenham elevada eficiência e longa vida útil, com tensão média de 3,7 V, podendo chegar a 4,2 V, e durabilidade superior a 500 ciclos (Prabhansu; Kumar, 2023), as baterias de íon-lítio apresentam riscos de superaquecimento e explosão em casos de curto-circuito, perfuração ou exposição ao calor. Uma alternativa considerada mais segura, já presente em dispositivos modernos, são as baterias de polímero de lítio (Li-Po), que substituem o eletrólito líquido por um eletrólito polimérico sólido, reduzindo os riscos associados a incêndios ou explosões (Mu *et al.*, 2024).

No entanto, além da análise eletroquímica, é fundamental considerar os impactos cumulativos do uso das baterias. Embora a energia consumida em cada recarga de um *smartphone* seja relativamente pequena, a multiplicação desse consumo em escala global revela

³ Além das baterias de íon-lítio, diversas tecnologias encontram-se em fase de desenvolvimento e consolidação, com potencial para ampliar a segurança, reduzir custos e mitigar impactos ambientais. Entre elas destacam-se: baterias de estado sólido, que utilizam eletrólitos sólidos em substituição aos líquidos inflamáveis, como as baterias de lítio-enxofre (Li-S), que apresentam elevada densidade energética teórica e menor dependência de metais críticos (José *et al.*, 2025); baterias de íon-sódio, promissoras devido à maior abundância e menor custo do sódio em comparação ao lítio (Hwang; Myung; Sun, 2017); e baterias aquosas de alumínio metálico, investigadas devido à abundância, baixo custo, elevada capacidade teórica e segurança intrínseca do alumínio, embora ainda se encontrem em estágio inicial de desenvolvimento tecnológico (Yu *et al.*, 2025).

valores expressivos. A energia consumida em cada carga depende da voltagem (cerca de 3,7 V em baterias de íon-lítio) e da capacidade elétrica da bateria. O Quadro 4 apresenta o consumo energético estimado de dois modelos recentes de *smartphones*, considerando uma carga completa por dia ao longo de um ano. Os cálculos são detalhados no Apêndice A.

Quadro 4. Consumo anual estimado de energia por *smartphone* (1 carga/dia).

Modelo	Capacidade da bateria (mAh)	Energia por carga (kWh)	Consumo anual (kWh/ano)
iPhone 16	3.561	0,0132	4,82
Galaxy S24	4.000	0,0148	5,40

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Considerando como resultado de uma única recarga diária uma média de 5,1 kWh por aparelho ao ano, os 272 milhões de *smartphones* em uso no Brasil (FGV, 2024) demandariam aproximadamente 1,39 TWh/ano. Esse valor, quando multiplicado pelo fator de emissão de cada país, permite estimar a quantidade de emissões de CO₂ associadas a essa etapa do ciclo de vida. No Brasil, cuja matriz elétrica é composta por cerca de 88% de fontes renováveis (hidrelétrica, eólica, solar e biomassa) (EPE, 2025), o fator médio de emissão de CO₂ é de 0,06 kg CO₂/kWh, o que equivale a aproximadamente 0,31 kg de CO₂ por *smartphone* ao ano (ano base: 2024). Já na China, maior produtor mundial de lixo eletrônico e ainda fortemente dependente do carvão mineral, o fator médio atinge 0,49 kg CO₂/kWh (com base no 1º semestre de 2025), o que corresponde a cerca de 1,96 kg de CO₂ por *smartphone* ao ano (Miguire, 2025).

Essas estimativas consideram exclusivamente a eletricidade consumida nas recargas. Entretanto, quando se inclui o funcionamento da infraestrutura digital (*data centers*, redes móveis e sistemas de armazenamento em nuvem), a pegada de carbono da etapa de uso pode aumentar substancialmente, sobretudo em países cuja eletricidade apresenta elevada intensidade de carbono.

v. Descarte

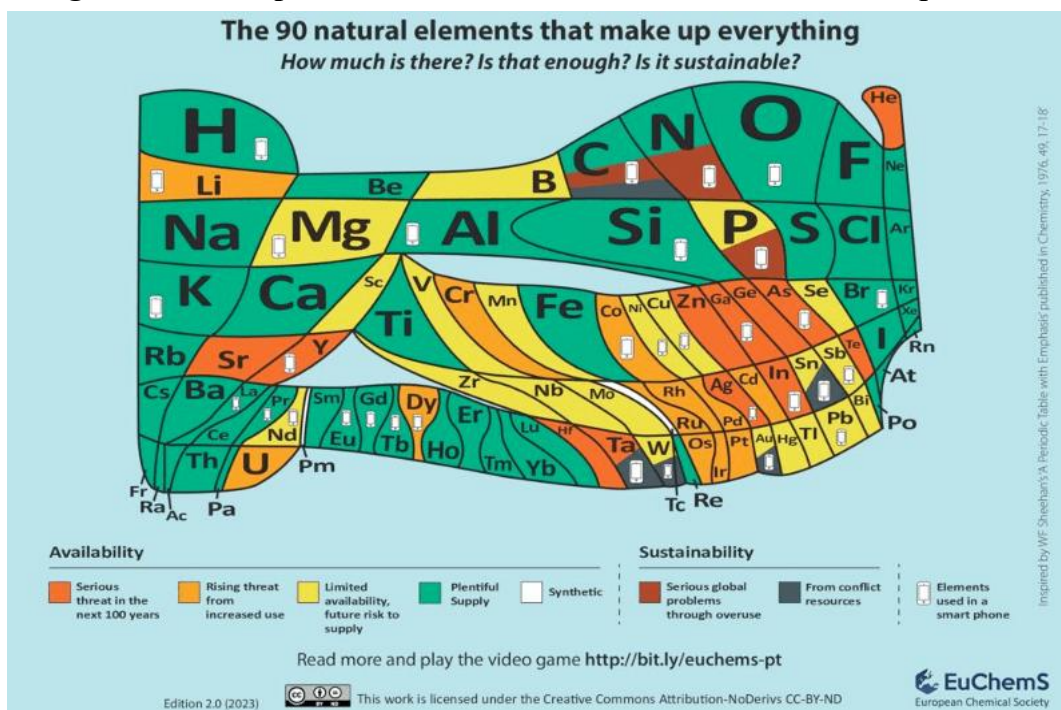
O descarte de *smartphones* constitui a etapa final de seu ciclo de vida e representa um momento decisivo entre a perpetuação de impactos ambientais e sociais ou a possibilidade de reinserção de recursos em um modelo de EC. É nessa fase que se define se os materiais empregados na fabricação do dispositivo serão perdidos ou recuperados para novas aplicações industriais.

Como discutido anteriormente, o volume global de resíduos eletrônicos atingiu em 2022 a marca de 62 milhões de toneladas, mas menos de um quarto desse total foi coletado e reciclado adequadamente. O Brasil ocupa a quinta posição entre os maiores produtores de lixo eletrônico,

atrás apenas da China, Estados Unidos, Índia e Japão, com mais de 2,4 milhões de toneladas geradas e uma taxa de reciclagem de aproximadamente 3%, valor que ilustra a baixa eficiência dos sistemas de gestão disponíveis no país (Baldé *et al.*, 2024; Dias *et al.*, 2022). A perda e a subutilização de materiais repercutem diretamente na disponibilidade futura de elementos químicos estratégicos, não apenas para a indústria eletrônica, mas também para outros setores, como o automotivo, o energético e o da saúde.

A Figura 5 apresenta uma tabela periódica que evidencia esses riscos em dois níveis complementares de análise. O primeiro corresponde a uma escala cromática que varia do verde (elementos abundantes) ao vermelho (risco severo de escassez), passando pelo amarelo (disponibilidade limitada) e pelo laranja (demanda crescente). O segundo nível diz respeito aos marcadores de sustentabilidade, nos quais o vermelho-escuro identifica elementos cujo uso já ultrapassa os limites planetários estabelecidos, enquanto o cinza assinala aqueles extraídos em zonas de conflito, frequentemente associados a impactos sociais e violações de direitos humanos (EuChemS, 2023).

Figura 5. Tabela periódica e os riscos de escassez dos elementos químicos.



Fonte: EuChemS, 2023.

No caso específico dos *smartphones*, a tabela destaca, por meio de um ícone representativo, os elementos indispensáveis à sua fabricação e o grau de risco relacionado à sua disponibilidade. Entre eles, encontram-se Ga, As, In e Ta, classificados em vermelho devido ao risco severo de escassez; Li, Co e Dy, em laranja, em razão da crescente demanda; e Cu e Au, em amarelo, por sua disponibilidade limitada. Em contrapartida, elementos ainda abundantes,

como Si e Al, aparecem em verde. A tabela também sinaliza o uso excessivo de carbono, nitrogênio e fósforo, representados em vermelho-escuro, além do tântalo, que recebe a marcação cinza por ser extraído em zonas de conflito.

De modo geral, existem duas possibilidades para o descarte dos resíduos eletrônicos. A primeira delas é o descarte incorreto, em que os aparelhos são colocados no lixo comum e acabam em aterros ou lixões, o que representa um desperdício significativo de recursos naturais. Os dispositivos contêm metais de elevado valor econômico e estratégico, como ouro, cobre e terras raras, cujo não aproveitamento implica tanto na perda de insumos críticos para a indústria quanto no aumento da demanda por matérias-primas virgens, intensificando os impactos ambientais já observados nas etapas iniciais do ciclo de vida. Estima-se que, em 2022, o valor econômico dos metais presentes no lixo eletrônico mundial tenha alcançado 91 bilhões de dólares, mas apenas cerca de 28 bilhões foram efetivamente recuperados (Baldé *et al.*, 2024).

Além da dimensão econômica, os riscos ambientais associados ao descarte incorreto são expressivos: metais pesados podem sofrer processos de lixiviação, atingindo o solo e as águas subterrâneas, com potencial de bioacumulação e biomagnificação ao longo das cadeias tróficas (Aquino; Oliveira; Cunha Filho, 2020).

A esses efeitos somam-se os danos oriundos da incineração inadequada de componentes plásticos e resinosos, que podem liberar dioxinas e furanos, POPs, além de gases como SO₂, NO_x e clorofluorcarbonetos (CFCs), que intensificam a chuva ácida, o aquecimento global e a degradação da camada de ozônio (Forti, 2019). Além disso, a ausência de sistemas formais de coleta e reciclagem transfere a gestão desses resíduos para cadeias informais (Baldé *et al.*, 2024), nas quais trabalhadores atuam expostos a substâncias nocivas e riscos físicos sem condições adequadas de segurança, ao mesmo tempo em que comunidades vulneráveis sofrem de maneira desproporcional os efeitos da contaminação ambiental.

Por outro lado, o descarte ambientalmente adequado constitui uma oportunidade estratégica para reinserção de insumos nas cadeias produtivas, em consonância com os princípios da EC. Nesse contexto, os aparelhos descartados são encaminhados para sistemas formais de coleta, frequentemente vinculados a programas de logística reversa, os quais asseguram o tratamento correto desses materiais.

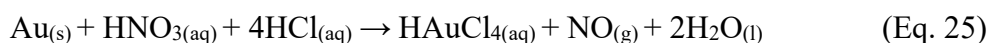
Conforme descrito por Dias *et al.* (2018) e por Kumar, Holuszko e Espinosa (2017), o processo de reciclagem do lixo eletrônico compreende quatro etapas principais: (i) triagem, que pode ser manual (catação) ou automatizada, e destina-se à classificação dos resíduos segundo tipologia e periculosidade; (ii) desmontagem e separação, em que os componentes externos e internos são removidos e agrupados conforme sua composição; (iii) processamento, fase que

envolve sucessivas técnicas para promover a recuperação seletiva de materiais valiosos; e a (iv) destinação final, na qual os insumos recuperados podem retornar à indústria.

No interior desse fluxo, as Placas de Circuito Impresso (PCIs) representam um dos componentes de maior relevância econômica, respondendo por mais de 40% do valor total dos metais presentes nesse tipo de resíduo (Kumar; Holuszko; Espinosa, 2017). Essas estruturas, são constituídas por uma matriz polimérica, sobre a qual se encontram trilhas de cobre, circuitos integrados e elementos semicondutores, além de metais nobres como ouro, prata e paládio. A recuperação desses componentes, no entanto, depende da combinação de métodos físicos, térmicos e químicos de separação de misturas, capazes de concentrar os materiais de interesse e alcançar níveis de pureza compatíveis com aplicações industriais (Mir; Dhawan, 2022; Oke; Potgieter, 2024).

Os processos físicos (mecânicos) baseiam-se principalmente em diferenças de tamanho, densidade, propriedades magnéticas ou condutividade elétrica entre os constituintes. Os métodos incluem: trituração, que viabiliza a fragmentação das placas em partículas menores; peneiração, em que os fragmentos são separados segundo seu diâmetro; separação magnética, que retira partículas ferromagnéticas; flotação, na qual bolhas de ar aderem preferencialmente às partículas mais leves (como plásticos e resinas), que se deslocam para a superfície, enquanto as mais densas sedimentam; e separação eletrostática, que distingue partículas condutoras (metais) das isolantes (polímeros) (Mir; Dhawan, 2022; Oke; Potgieter, 2024).

Nos processos térmicos (pirometalurgia), as PCIs são submetidas a aquecimento em fornos de alta temperatura, promovendo a fusão de ligas metálicas e a decomposição da matriz polimérica. Embora eficiente para a recuperação de cobre e outros metais, essa técnica exige grande consumo de energia e rigoroso controle de emissões gasosas, uma vez que a degradação de plásticos pode liberar substâncias tóxicas. Já os processos químicos (hidrometalurgia) utilizam reações de dissolução seletiva para recuperar metais específicos (Kamberović *et al.*, 2018), a exemplo da lixiviação ácida, que emprega soluções como a água régia (mistura de HCl e HNO₃) para dissolver metais nobres, como o ouro (Eq. 25), cuja recuperação ocorre posteriormente por precipitação e filtração.



No Brasil, contudo, a infraestrutura disponível para o tratamento de PCIs é limitada. Segundo Bueno e Moraes (2023), o país não realiza o refino desses materiais em escala industrial; em vez disso, após processos preliminares de desmontagem e fragmentação, as

placas são exportadas para países com capacidade instalada para o tratamento avançado desse tipo de resíduo, como Canadá, Bélgica e Singapura.

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, uma tonelada de celulares sem baterias pode conter cerca de 3,5 kg de prata, 130 kg de cobre, 340 g de ouro e 140 g de paládio, ao passo que uma única tonelada de PCIs pode apresentar teor de ouro equivalente ao encontrado em aproximadamente 110 toneladas de minério bruto (BRS Conventions, 2015). Esses números evidenciam não apenas o elevado valor econômico dos metais presentes nos resíduos eletroeletrônicos, mas também o potencial de redução da pressão sobre atividades mineradoras quando processos eficazes de reciclagem são implementados.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção descreve a etapa de revisão bibliográfica, que teve por objetivo identificar, selecionar e analisar produções científicas e materiais educacionais relacionados aos eixos centrais desta pesquisa. A revisão foi planejada para oferecer uma visão abrangente sobre as abordagens existentes na literatura e verificar se já haviam estudos que abordassem o ciclo de vida de produtos ou a economia circular no ensino de química de nível médio, além de outros tópicos correlatos, identificando como esses temas vêm sendo explorados e quais lacunas ainda persistem.

4.1 LEVANTAMENTO DE PRODUÇÕES EM BASES DE DADOS ACADÊMICAS

Inicialmente, foi realizada uma busca sistemática nas bases de dados *Scopus*, *Educational Resources Information Center* (ERIC) e *Scientific Electronic Library Online* (SciELO). A busca ocorreu em 23 de outubro de 2025, abrangendo publicações entre 2016 e 2025, período escolhido para contemplar produções posteriores à adoção da Agenda 2030. Para direcionar a busca especificamente a artigos científicos, aplicaram-se os filtros *article* e *journal articles* nas bases *Scopus* e ERIC, respectivamente. As combinações de palavras-chave e o número de publicações retornadas estão presentes no Quadro 5.

Quadro 5. Número de publicações retornadas para cada combinação de palavras-chave inseridas nas bases de dados.

Palavras-chave ⁴	Scopus	ERIC	SciELO
<i>life cycle AND chemistry AND high school</i>	8	19	0
<i>circular economy AND chemistry AND high school</i>	5	10	0
<i>sustainable development AND chemistry AND high school</i>	48	384	1
<i>2030 agenda AND chemistry AND high school</i>	4	5	0

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Ao todo, foram identificadas 454 publicações. No entanto, após a verificação e exclusão das duplicatas, permaneceu um conjunto de 417 títulos únicos considerados para a análise. A etapa de avaliação seguiu um processo em três fases.

⁴ As expressões foram inseridas nas bases de dados em língua inglesa. Traduções correspondentes: *life cycle* = ciclo de vida; *chemistry* = química; *high school* = ensino médio; *circular economy* = economia circular; *sustainable development* = desenvolvimento sustentável; *2030 agenda* = Agenda 2030.

Inicialmente, realizou-se a leitura dos títulos dos artigos obtidos nas buscas. Quando o título apresentava relação direta com o tema, mencionando explicitamente os termos investigados ou fazendo alusão clara aos conceitos, procedeu-se à leitura do resumo, a fim de verificar a pertinência do estudo em relação aos objetivos da pesquisa. Nos casos em que essa relação se confirmou, o artigo foi lido integralmente, permitindo uma análise mais aprofundada das abordagens teóricas e metodológicas adotadas pelos autores. Ao final desse processo, apenas dois títulos atenderam integralmente aos critérios estabelecidos, resultado cujo detalhamento será apresentado na sequência desta seção.

A análise do Quadro 5 evidencia diferenças expressivas entre as bases de dados consultadas, sendo a ERIC a que apresentou o maior número de publicações em todas as combinações de palavras-chave, enquanto a SciELO retornou apenas um artigo, resultado que pode estar associado ao número de periódicos indexados nessa base, voltada prioritariamente para a América Latina.

Entre os descritores utilizados, a expressão *sustainable development AND chemistry AND high school* foi a que apresentou a maior incidência de registros, tanto na ERIC quanto na Scopus. No entanto, a diferença quantitativa entre as duas é significativa: enquanto a ERIC somou 384 registros, a Scopus apresentou 48, o que pode ser explicado pelos perfis distintos das plataformas. A ERIC, voltada à indexação de estudos educacionais e práticas pedagógicas, tende a reunir um volume mais amplo de trabalhos sobre ensino de ciências e educação ambiental, enquanto a Scopus concentra-se em publicações de maior impacto acadêmico, frequentemente direcionadas ao ensino superior e à pesquisa aplicada à área do conhecimento.

Apesar da proximidade conceitual entre desenvolvimento sustentável e Agenda 2030, a combinação que inclui o segundo termo apresentou um total de nove publicações, considerando as três bases de dados utilizadas. Esse contraste sugere que, embora a Agenda 2030 esteja presente em debates políticos e educacionais mais amplos (inclusive em documentos orientadores como a BNCC), sua vinculação direta às investigações sobre o ensino de química no nível médio ainda é limitada. Um padrão semelhante é observado nas combinações *life cycle AND chemistry AND high school* e *circular economy AND chemistry AND high school*, que, somadas totalizaram apenas 42 artigos. Esse resultado indica uma presença ainda incipiente dessas temáticas nas pesquisas sobre ensino de química, apesar de sua relevância para a compreensão dos processos produtivos e para a promoção da conscientização sobre o uso de recursos.

É importante considerar, contudo, que esses números podem decorrer tanto da baixa representatividade de estudos voltados à integração desses temas no ensino de química no nível médio quanto da forma como os autores definem os títulos e as palavras-chave, que nem sempre refletem com precisão o conteúdo e os objetivos de seus trabalhos. Além disso, reconhece-se que a escolha dos descritores adotada neste levantamento também pode ter influenciado o alcance dos resultados, ao delimitar ou direcionar as buscas para determinados termos.

A leitura inicial dos 417 títulos evidenciou que, entre as publicações retornadas pela combinação de descritores, nenhum dos títulos mencionava o termo *circular economy* e apenas dois continham o termo *life cycle*, sendo os únicos selecionados para análise. Esses dois artigos, elaborados pelos mesmos autores, investigaram como estudantes do ensino médio compreendem o ciclo de vida de bioplásticos e plásticos de origem fóssil, destacando a relevância dessa abordagem para a promoção da sustentabilidade no ensino de química.

No primeiro estudo, observou-se que os alunos manifestaram uma percepção favorável aos bioplásticos em função de sua biodegradabilidade, embora apresentassem compreensão limitada sobre os processos produtivos envolvidos (De Waard; Prins; Van Joolingen, 2020). No segundo, os estudantes demonstraram uma compreensão mais ampla e integrada dos impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida do ácido polilático, reconhecendo que a sustentabilidade demanda uma análise complexa e multidimensional, que ultrapassa aspectos restritos à reciclagem e à poluição (De Waard; Prins; Van Joolingen, 2022).

Esses dois artigos selecionados apresentam aproximações relevantes com esta pesquisa, sobretudo por tratarem o ciclo de vida como uma abordagem capaz de articular o ensino de química às discussões sobre sustentabilidade, demonstrando seu potencial para conectar conteúdos científicos a problemáticas socioambientais no âmbito do ensino médio. No entanto, observa-se que ambos se concentram na temática de polímeros, enquanto o presente estudo tem como foco o ciclo de vida de *smartphones* sob a perspectiva da EC.

Essa diferença de abordagem reforça a originalidade e pertinência desta investigação, ao evidenciar a oportunidade de ampliar o papel formativo do ensino de química, favorecendo a apropriação de conceitos químicos e a reflexão crítica sobre os impactos da tecnologia no ambiente e na sociedade.

4.2 LEVANTAMENTO DE PRODUÇÕES NO ÂMBITO DO PROFQUI

Além da busca sistemática nas bases de dados acadêmicas, realizou-se um levantamento complementar dos recursos educacionais desenvolvidos no âmbito do PROFQUI⁵. O objetivo dessa etapa foi identificar materiais didáticos relacionados aos temas de sustentabilidade, EC e ciclo de vida de produtos, de modo a reconhecer como essas abordagens vêm sendo incorporadas nas produções do programa. A seleção dos materiais teve como ponto de partida a leitura dos títulos das dissertações disponíveis no site oficial do PROFQUI, referentes às turmas de 2017, 2018 e 2020. Essa leitura preliminar permitiu identificar trabalhos com potencial vínculo temático aos eixos investigados nesta pesquisa.

Entre as 410 dissertações disponíveis no site do programa, foram selecionados 15 títulos que, embora não mencionassem de forma explícita os conceitos de EC ou ciclo de vida, apresentavam temas correlatos alinhados aos objetivos desta dissertação, como o estudo dos metais e o descarte de resíduos eletrônicos. Todos os recursos educacionais associados a estas 15 dissertações (Quadro 6), foram lidos e analisados integralmente, de modo a compreender suas contribuições teóricas e metodológicas. Entretanto, para efeito de aprofundamento analítico, foram sintetizados apenas os que mantêm relação com os temas e conteúdos químicos desenvolvidos nesta dissertação.

Quadro 6. Referências dos recursos educacionais analisados a partir da busca sistemática no site do PROFQUI.

Trabalho	Referência
1	MOREIRA JÚNIOR, S. S.; CALLEGARIO, L. J. Consumismo e o descarte de aparelhos celulares: organização de um clube de ciências online visando a alfabetização científica . VILA VELHA: Instituto Federal do Espírito Santo, 2020. Série: Ensino de Química, nº 005. ISBN: 978-65-86361-77-3.
2	FREITAS, S. O.; COSTA, C. R.; MAIA, P. I. S. Material de apoio: uma proposta de sequência didática para a abordagem do tema metais no ensino médio . Uberaba: Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2019. Série: Química em Rede, nº 002.
3	SPERANDIO, G. H. Uma proposta de ensino de eletrólise por experimentação com uso de resíduo eletroeletrônico . Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2019.
4	DE OLIVEIRA, M. C. C. Sequência didática investigativa para o ensino de eletroquímica abordando o descarte de pilhas e baterias . Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2020.

⁵ O Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI) possui um repositório das dissertações e recursos educacionais desenvolvidos pelos mestrandos, disponível em <https://profqui.iq.ufrj.br/dissertacoes/>.

5	DOS SANTOS, A. T. EDUCOMUNICAÇÃO AMBIENTAL: sequências didáticas sobre aprendizagem de química em uma perspectiva transdisciplinar . 1. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2021.
6	DA SILVA JR, G. D. Lixo, resíduo ou rejeito? Reflexões sobre a aprendizagem significativa no ensino médio . Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2022.
7	MARTINS, M. C. Proposta de sequência didática para o ensino de educação ambiental com enfoque do descarte de resíduos sólidos eletrônicos através da eletroquímica . Volta Redonda: Universidade Federal Fluminense, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2020.
8	FEDERIZZI, T.; BOCARDI, J. M. B.; COSTA JUNIOR, I. L. Química verde, sustentabilidade e educação ambiental: uma sequência didática para o tema eletroquímica no ensino técnico subsequente . Medianeira: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2023.
9	BARBOSA, A. F. M. Metais pesados no lixo urbano: uma sequência didática nos moldes da atividade experimental problematizada (AEP) . 1. ed. Vila Velha: Instituto Federal do Espírito Santo, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2022. 64 p. ISBN 978-85-8263-618-3.
10	FIDELIS, L. F. S. Sequência didática: mineração . Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2020. Série: Química em Rede, nº 002.
11	RODRIGUES, C. A. Teoria, prática e estudos <i>in loco</i>: uma sequência didática em Química envolvendo questões ambientais no Ensino Médio . Ilhéus: Universidade Estadual de Santa Cruz, Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2019.
12	SANDERSON, V. M. O brilho da química: cartilha para aplicação de uma sequência didática para ensino de química inorgânica com mineralogia temática . Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2023.
13	LAMB, R. K. Elementos terras raras, lixo doméstico e água potável: propostas para o ensino de Química no Novo Ensino Médio . Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2021.
14	DE SOUZA, C. C. O. Experimentos de química verde numa abordagem CTS no ensino médio: ferramenta de construção de aprendizagens e promoção de desenvolvimento sustentável . Paraná: Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2020.
15	FALCI, P. A. Repensando práticas em educação ambiental: proposta de uma sequência didática . Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2019.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

O primeiro trabalho selecionado é o de Moreira Júnior e Callegario (2020), que apresenta a proposta de um clube de ciências *online* voltado para alunos do 3º ano do ensino médio, aplicando a abordagem Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA). A proposta abordou a composição química de aparelhos celulares, além dos

impactos ambientais dos resíduos eletrônicos e os efeitos sociais do consumo excessivo desses dispositivos, resultando em um mural colaborativo e um *blog*.

De forma semelhante, Sperandio (2019) utilizou resíduos eletroeletrônicos para construir um eletrodo de baixo custo, aplicado em experimentos de eletroquímica, como a eletrólise da água, destacando os conceitos de reações redox. A Sequência Didática (SD), que incluiu a coleta de resíduos e a construção de *kits* experimentais, buscou sensibilizar os alunos para os riscos ambientais e de saúde do descarte inadequado desses materiais, com ênfase nos riscos associados à contaminação por metais pesados. De Oliveira (2020), por sua vez, direcionou-se à análise do descarte de pilhas e baterias, explorando os processos de decomposição de compostos como o KOH e o cádmio em soluções aquosas, além dos impactos ambientais decorrentes de sua decomposição.

A integração entre educação ambiental e ensino de química se mostrou recorrente em outras propostas didáticas. Barbosa (2022), por exemplo, elaborou um guia didático sobre o impacto dos metais pesados, como o mercúrio e o cádmio, presentes no lixo urbano. A SD incluiu dois roteiros experimentais para discutir a química dos aterros sanitários: o primeiro, um bioensaio com cebolas para estudar os efeitos tóxicos dos metais pesados e, o segundo, a construção de um minibiodigestor para explorar os processos de decomposição de resíduos orgânicos, abrangendo o conteúdo de soluções.

Dos Santos (2021) propôs um conjunto de 11 SD que articularam educação ambiental e ensino de química por meio de jogos, experimentos e rodas de conversa. Em duas dessas SD, o tema abordado foi a composição química do lixo eletrônico e os riscos ambientais e à saúde decorrentes do descarte inadequado desses materiais. O uso de metodologias ativas, como a criação de histórias em quadrinhos, foi empregado como estratégia didática para promover a reflexão sobre o tema e o engajamento dos estudantes.

A temática da química verde e da sustentabilidade também se faz presente entre os recursos selecionados. Federizzi, Bocardi e Costa Júnior (2023), por exemplo, desenvolveram uma SD de eletroquímica com enfoque na QV, destacando os princípios de sustentabilidade aplicados a processos eletroquímicos. Os alunos realizaram um experimento de produção de um inibidor verde de corrosão a partir de extrato de hibisco, explorando conceitos de corrosão, inibição e processos redox, além de discutir os impactos ambientais de processos industriais que utilizam substâncias tóxicas. O trabalho enfatizou a importância de alternativas sustentáveis para substituir compostos químicos prejudiciais ao meio ambiente.

Martins (2020), por sua vez, propôs uma SD centrada na eletroquímica e na logística reversa de pilhas e baterias, abordando conceitos de reações redox. A proposta incluiu atividades como rodas de conversa sobre os diferentes tipos de pilhas e as reações químicas de decomposição e oxidação, além da criação de campanhas de conscientização sobre o descarte adequado de pilhas e baterias, enfatizando a importância de processos sustentáveis para o manejo de resíduos e recursos.

Outras SD trataram da relação entre a química e a mineração. Entre elas, destaca-se a proposta de Fidelis (2020), que propôs uma sequência de processos de extração mineral, com foco na oxidação do ferro e na obtenção desse metal a partir de cereais. O trabalho empregou conceitos de reações redox e discutiu os impactos ambientais da atividade mineradora, com ênfase nos processos químicos envolvidos e nos efeitos das substâncias tóxicas liberadas no ambiente, como ácidos e metais pesados, particularmente no contexto local de Caeté/MG.

Sanderson (2023), por sua vez, elaborou uma cartilha pedagógica sobre química inorgânica para o ensino médio. A SD abordou propriedades químicas e físicas dos minerais, como a composição de silicatos e carbonatos, a estrutura cristalina e os tipos de ligações químicas, além dos sistemas cristalográficos. A proposta buscou relacionar o estudo dos minerais ao cotidiano e os impactos da atividade mineradora sob a perspectiva CTSA. Já Freitas, Costa e Maia (2019), propuseram uma SD centrada no tema metais, articulando conceitos como tabela periódica e Número de Oxidação (NOX). A SD incluiu discussões sobre a reciclagem de metais e as reações químicas envolvidas nesse processo, buscando fomentar a tomada de consciência quanto ao uso responsável dos recursos naturais.

Para aprofundar a análise, realizou-se uma pesquisa complementar com o propósito de verificar a ocorrência de conceitos como ciclo de vida e economia circular no corpo textual dos 15 recursos educacionais. A investigação foi conduzida por meio do comando “Ctrl + L”, que possibilita a busca de palavras ou expressões específicas ao longo do texto. O objetivo dessa etapa foi identificar as menções aos termos selecionados, a fim de compreender as relações estabelecidas entre as temáticas desenvolvidas nos recursos e o grau de profundidade com que foram tratadas – se de forma mais conceitual e integrada ou ilustrativa. O Quadro 7 apresenta um resumo das ocorrências identificadas.

Quadro 7. Resultados da pesquisa complementar.

Termo pesquisado	Recursos referenciados
Ciclo de vida	Barbosa (2022)
Economia circular	Nenhuma menção
Sustentabilidade	Dos Santos (2021); Federizzi, Bocardi e Costa Júnior (2023); Barbosa (2022) e Lamb (2021)
Desenvolvimento sustentável	Dos Santos (2021); Martins (2020); Federizzi, Bocardi e Costa Júnior (2023); Barbosa (2022); Fidelis (2020); Rodrigues (2019)
Agenda 2030	Dos Santos (2021)
ODS	Nenhuma menção

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Como observado no Quadro 7, o termo ciclo de vida foi identificado apenas em Barbosa (2022), em uma sugestão de vídeo que tratava do ciclo de vida de eletrônicos e de seu descarte inadequado. Já os conceitos de EC e ODS não foram mencionados em nenhum dos materiais, enquanto a Agenda 2030 aparece unicamente em uma referência bibliográfica de Dos Santos (2021).

A ausência de menções diretas à EC e ao ciclo de vida de produtos era esperada, considerando que as temáticas não constituíram o foco principal dos trabalhos analisados. Ainda assim, a análise revela possibilidades de ampliação conceitual, especialmente porque diversos recursos – como os de Moreira Júnior e Callegario (2020), Sperandio (2019), De Oliveira (2020), Martins (2020) e Dos Santos (2021) – abordam questões relacionadas ao descarte e à reutilização de resíduos eletrônicos, etapa que representa o momento decisivo do ciclo de vida desses produtos, definindo se os materiais serão reaproveitados ou desperdiçados.

No caso específico de Martins (2020), chama atenção a ausência de alusão direta à EC, uma vez que o foco do trabalho era a logística reversa de pilhas e baterias, temática intimamente relacionada aos princípios circulares de reaproveitamento e gestão sustentável de resíduos.

No que se refere aos termos ODS e Agenda 2030, observa-se que, embora os recursos dialoguem com questões ambientais importantes, a presença de discussões sobre esses temas ainda é incipiente, mesmo tratando-se de produções posteriores à adoção da Agenda 2030. Essa constatação indica que, embora as propostas apresentem afinidade temática, a vinculação explícita aos ODS ainda não está consolidada. Além de dialogar com objetivos como o ODS 4, voltado à educação de qualidade e à formação para a sustentabilidade, muitos destes materiais poderiam articular-se mais claramente com o

ODS 12, que propõe garantir padrões de consumo e produção responsáveis, por meio da gestão sustentável dos recursos naturais e da redução da geração de resíduos.

Em contrapartida, os termos sustentabilidade e desenvolvimento sustentável apresentaram maior recorrência, ainda que de forma pontual. Em alguns casos, como nos recursos produzidos por Dos Santos (2021), Martins (2020), Fidelis (2020), Rodrigues (2019) e Lamb (2021), aparecem apenas em referências bibliográficas ou em menções genéricas, sem detalhamento sobre sua conexão com os conceitos próprios da química.

Nos recursos de Federizzi, Bocardi e Costa Júnior (2023) e Barbosa (2022), contudo, observa-se uma abordagem mais integrada, que ressalta o papel da química na compreensão dos desafios ambientais e na promoção de práticas sustentáveis, tanto na perspectiva da QV, destacando a importância da substituição de substâncias tóxicas por alternativas menos poluentes, quanto na discussão dos impactos dos metais pesados presentes no lixo urbano, incluindo o lixo eletrônico.

De modo geral, a análise da revisão bibliográfica permite concluir que, embora os conceitos de EC e ciclo de vida ainda não estejam consolidados nas produções em ensino de química no ensino médio, as propostas oferecem subsídios teóricos e metodológicos para sua aproximação, apontando caminhos para a expansão das práticas educativas em direção a uma formação científica mais crítica e interdisciplinar.

5 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta dissertação organiza-se em duas etapas principais, de modo a contemplar tanto a construção do recurso educacional quanto sua aplicação em contexto escolar. A primeira etapa corresponde à elaboração do *e-book* “Ciclo de vida de *smartphones* como metodologia para o ensino de química”, enquanto a segunda refere-se à aplicação parcial do material, especificamente os capítulos 3, 5 e 6, com o objetivo de verificar sua potencialidade como ferramenta de ensino.

5.1 ELABORAÇÃO DO *E-BOOK*

A construção do *e-book*, enquanto recurso educacional obrigatório no âmbito do PROFQUI, foi realizada em etapas sistematizadas, com início no planejamento temático e na definição do público-alvo, composto por professores de química do ensino médio. A escolha da temática central – sustentabilidade e EC como fio condutor para discutir o ciclo de vida de *smartphones* – buscou integrar a química a questões socioambientais contemporâneas, favorecendo a promoção do letramento científico em diálogo com as diretrizes da BNCC e com a prática pedagógica.

Na sequência, procedeu-se à seleção e organização dos conteúdos, resultando em um *e-book* estruturado em seis capítulos projetados de maneira independente, permitindo ao professor utilizá-los em diferentes momentos e contextos sem a necessidade de seguir uma sequência linear. O capítulo 1 é dedicado à apresentação dos conceitos de sustentabilidade, EC e ciclo de vida, funcionando como eixo introdutório que fundamenta teoricamente os capítulos seguintes. Já os capítulos 2 a 6 tratam das diferentes fases do ciclo de vida de *smartphones*, articulando-as a conteúdos curriculares de química, como sistematizado no Quadro 8.

Quadro 8. Etapas do ciclo de vida de *smartphones* e os conteúdos curriculares de química abordados no *e-book*.

Capítulo	Etapas do ciclo de vida	Conteúdo curricular de química
2	Extração de matérias-primas	Tabela periódica
3	Produção	Reações de oxirredução
4	Distribuição	Introdução a hidrocarbonetos
5	Uso	Eletroquímica
6	Destinação final	Separação de misturas

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Os critérios de seleção dos conteúdos consideraram: (i) alinhamento às competências e habilidades da BNCC para Ciências da Natureza e suas Tecnologias; (ii) potencial de contextualização, permitindo ao professor articular o conteúdo químico a problemáticas sociais, ambientais e tecnológicas atuais; e (iii) aplicabilidade em diferentes realidades escolares, incluindo aquelas que não dispõem de laboratórios.

No que tange à estrutura do recurso educacional, pontua-se ainda que, antes do capítulo 1, há uma seção introdutória voltada a familiarizar o professor com a proposta do material, sua organização e as possibilidades de utilização. Ademais, ao final de cada capítulo, encontram-se as referências bibliográficas que serviram de base para sua elaboração.

O desenvolvimento textual do *e-book* ocorreu em paralelo à revisão bibliográfica, priorizando o uso de fontes científicas atualizadas e consistentes, como artigos, livros e documentos institucionais. Para ampliar a atratividade do material e diversificar as possibilidades de exploração pedagógica, cada capítulo conta com boxes de curiosidades e/ou aprofundamento, que destacam informações complementares relacionadas ao tema em discussão. Além disso, foram incluídas sugestões de recursos extras, como vídeos e plataformas interativas de acesso livre, com a finalidade de apoiar a prática docente.

O *e-book* também apresenta apêndices que reúnem propostas de atividades conectando os conteúdos curriculares de química ao tema central de cada capítulo. Essas atividades foram elaboradas de modo a favorecer a contextualização do conhecimento químico e a estimular a aplicação prática em diferentes cenários escolares.

Por fim, a etapa de organização visual e diagramação envolveu a definição de *layout*, tipografia e elementos gráficos que garantem clareza, atratividade e unidade estética em todo o material. Foram utilizadas ferramentas digitais de *design*, e as imagens incorporadas foram selecionadas a partir de bancos de acesso livre ou de autoria própria, respeitando a legislação de direitos autorais.

5.2 APLICAÇÃO DOS CAPÍTULOS DO *E-BOOK*

Nesta seção são descritas as atividades realizadas como parte do processo de aplicação e avaliação do *e-book* enquanto recurso educacional. O material foi aplicado em três turmas do ensino médio de um mesmo colégio particular situado na cidade do Rio de Janeiro, cuja caracterização será detalhada no tópico subsequente.

Em razão do tempo disponível para a intervenção, não foi possível implementar integralmente todos os capítulos do *e-book*. Assim, foram selecionados para aplicação os

capítulos 3, 5 e 6, por apresentarem maior viabilidade de articulação com o cronograma escolar vigente no período. O capítulo 1, por contemplar os fundamentos conceituais do ciclo de vida e da EC, foi mobilizado de forma transversal ao longo das atividades desenvolvidas, servindo como base teórica para a contextualização das discussões.

Cada atividade foi desenvolvida em sala de aula, de acordo com a proposta metodológica prevista no respectivo capítulo do *e-book*, contemplando os procedimentos descritos e os instrumentos de apoio ao professor.

Ressalta-se que todas as propostas foram elaboradas pela pesquisadora. No entanto, no caso das atividades experimentais, optou-se pela seleção de vídeos previamente disponibilizados em plataforma digital (*YouTube*), a partir dos quais foram elaborados roteiros próprios e detalhados. Esses roteiros foram organizados com descrição das etapas, materiais necessários e explicação dos resultados esperados, sendo disponibilizados aos professores juntamente com o *link* de acesso ao vídeo correspondente, de modo a possibilitar a visualização integral do experimento e facilitar sua reprodução em contexto escolar.

5.2.1 Aplicação do capítulo 6

A aplicação do capítulo 6 foi realizada nos mesmos dias em duas turmas distintas do 1º ano do ensino médio, conduzidas separadamente, somando um total de 61 alunos participantes. A atividade teve como objetivo relacionar os processos de separação de misturas ao descarte de *smartphones* e à reciclagem de resíduos eletrônicos, articulando o conteúdo químico previamente estudado com uma problemática socioambiental. A condução ficou sob responsabilidade da professora e pesquisadora responsável por esta dissertação, sendo realizada em dois encontros de 50 minutos cada, em dias distintos. A atividade teve caráter de revisão, uma vez que o conteúdo em questão já havia sido ministrado em aulas anteriores.

No primeiro encontro, foi realizada uma apresentação de *slides* sobre o ciclo de vida de *smartphones*, com ênfase na etapa de destinação final e no princípio da circularidade (Apêndice B). A exposição teve duração aproximada de 20 minutos e foi conduzida de forma dialógica, com perguntas direcionadas aos estudantes sobre seus hábitos e percepções em relação ao descarte de eletrônicos.

No tempo remanescente da aula, os alunos foram organizados em grupos e receberam, por sorteio, os temas para pesquisa e posteriormente apresentados na forma de cartazes. Os temas e as questões norteadoras atribuídas a cada grupo estão presentes

no Quadro 9. Ao término do encontro, reafirmaram-se as orientações quanto ao uso de referências confiáveis, à elaboração clara dos conteúdos e à divisão de tarefas no grupo. Definiu-se, ainda, o prazo de quinze dias para a finalização da atividade, isto é, 13 de agosto de 2025.

Quadro 9. Temas e questões norteadoras da atividade.

Tema geral	Questões norteadoras
O problema do lixo eletrônico	O que caracteriza um resíduo como lixo eletrônico? Quais substâncias químicas estão presentes no lixo eletrônico e quais delas podem oferecer algum risco nocivo ao meio ambiente e à saúde humana?
Descarte correto e descarte incorreto	Qual a diferença entre os tipos de descarte? Quais são as consequências do descarte inadequado? Onde e como fazer o descarte correto?
Logística reversa	O que é logística reversa? Quais são as responsabilidades dos consumidores e dos fabricantes?
Técnicas de separação de misturas	O que caracteriza uma mistura homogênea e uma mistura heterogênea? Quais são os principais processos usados para separar misturas homogêneas? E para separar misturas heterogêneas?
Reciclagem	Quais são as principais etapas da reciclagem? Quais materiais podem ser recuperados? Quais são as principais técnicas de separação de misturas aplicadas à reciclagem de eletrônicos?
Dicas para reduzir o lixo eletrônico	Como estender a vida útil de um <i>smartphone</i> ? O que fazer com um aparelho antes de descartá-lo?

Fonte: Elaboração própria, 2025.

O segundo encontro foi destinado à socialização dos trabalhos produzidos e à organização de uma sessão expositiva. As duas turmas trabalharam os mesmos temas, diferenciando-se apenas pela quantidade de integrantes em cada grupo, ajustada conforme o número de alunos de cada sala.

Após as apresentações, foi realizada a etapa final da atividade, composta por duas ações: uma breve rodada de perguntas de verificação, com três questões gerais sobre os temas apresentados, com duração aproximada de cinco minutos; uma retomada conceitual conduzida pela professora, com duração aproximada de dez minutos, destinada a consolidar a articulação entre as diferentes técnicas de separação de misturas e a discussão ambiental, bem como reforçar sua aplicação no contexto da reciclagem de resíduos eletrônicos. As perguntas utilizadas na rodada de verificação dos conteúdos foram:

1. Quando guardamos nossos eletrônicos sem uso, em vez de encaminhá-los para a reciclagem, estamos apenas acumulando objetos ou também contribuindo para que mais recursos naturais precisem ser extraídos para fabricar novos aparelhos?
2. Se um *smartphone* é descartado no lixo comum, que tipos de substâncias químicas podem contaminar o ambiente?
3. Quais técnicas de separação de misturas podem ser utilizadas na reciclagem de componentes de um *smartphone* e o que justifica sua escolha?

Ao término do segundo encontro, os cartazes foram fixados nos corredores da escola, onde permaneceram expostos por duas semanas, de modo a compartilhar os trabalhos com a comunidade escolar e ampliar o alcance educativo da atividade.

A avaliação qualitativa foi conduzida com base nos pressupostos da análise de conteúdo, conforme proposta por Bardin (2011). Embora as interações ocorridas no primeiro dia – especialmente durante a apresentação inicial e as discussões orientadas – tenham sido registradas em diário de campo, tais registros tiveram caráter contextual e descritivo, contribuindo para a compreensão do desenvolvimento da atividade como um relato de experiência. A análise qualitativa propriamente dita concentrou-se nas produções e interações do segundo encontro, compreendendo os cartazes elaborados pelos grupos, as apresentações orais e as respostas à rodada de perguntas de verificação.

Inicialmente, realizou-se a etapa de pré-análise, com leitura integral dos cartazes, revisão das anotações referentes às apresentações e sistematização das respostas fornecidas na rodada final de perguntas. Em seguida, procedeu-se à exploração do material, identificando-se unidades de registro relacionadas aos objetivos da pesquisa, tais como evidências de consolidação conceitual, articulação entre conteúdos químicos e problemáticas ambientais e indícios de compreensão sistêmica do ciclo de vida de *smartphones*.

A partir dessa organização, os dados foram estruturados em três eixos interpretativos: (i) consolidação dos conhecimentos químicos revisados; (ii) capacidade de estabelecer relações entre conceitos científicos e desafios socioambientais; e (iii) alcance formativo da atividade e desdobramentos pedagógicos. Por fim, realizou-se o tratamento e a interpretação dos dados à luz desses eixos, buscando identificar padrões de apropriação conceitual, recorrências argumentativas e possíveis fragilidades na delimitação temática das etapas do ciclo de vida.

5.2.2 Aplicação dos capítulos 3 e 5

A aplicação conjunta dos capítulos 3 e 5 foi desenvolvida em uma turma do 2º ano do ensino médio, com a participação de 22 alunos. A proposta teve caráter de revisão do conteúdo de reações de oxirredução e pilhas eletroquímicas, representando também o encerramento da unidade de eletrólise, último tema abordado no bimestre. O capítulo 3 apresenta os fundamentos das reações de oxirredução, incluindo a eletrólise, enquanto o capítulo 5 trata da eletroquímica, com foco no funcionamento das pilhas. A condução da atividade ficou sob responsabilidade da professora e pesquisadora responsável por esta dissertação, sendo realizada em dois tempos consecutivos de 50 minutos cada.

A aplicação foi estruturada em três momentos principais: (i) apresentação de *slides* introdutórios e contextualização da atividade; (ii) realização dos experimentos correspondentes aos capítulos 3 e 5; (iii) aplicação de um *quiz* na plataforma *Kahoot*, com participação voluntária dos estudantes.

No primeiro momento, os *slides* apresentaram o conceito geral de ciclo de vida de produtos, destacando as etapas de produção e uso dos *smartphones* e situando o estudo das reações redox e da eletroquímica em um contexto de circularidade e impacto ambiental (Apêndice C). No segundo momento, a aula foi conduzida em alternância entre apresentação dos *slides* e execução dos experimentos, de forma que cada etapa do ciclo de vida fosse articulada aos fenômenos químicos correspondentes.

Assim, ao abordar a etapa de produção, realizou-se o experimento de galvanização eletrolítica de uma moeda, demonstrando um processo de cobreação por eletrólise e sua relação com a obtenção e purificação de metais. Em seguida, após a retomada dos *slides* referentes à etapa de uso, foi conduzido o experimento de pilhas de limão em série, permitindo analisar o funcionamento de sistemas eletroquímicos espontâneos e estabelecer paralelos com as baterias de íon-lítio presentes nos *smartphones*. Os roteiros detalhados dos experimentos realizados em aula encontram-se apresentados nos Apêndices D e E, respectivamente.

Por fim, no terceiro momento aplicou-se um *quiz* individual por meio da plataforma *Kahoot* uma ferramenta digital interativa que permite aos estudantes responder perguntas em tempo real, recebendo *feedback* imediato.⁶ A plataforma registra automaticamente as respostas de cada participante, disponibilizando dados numéricos como quantidade de acertos e erros por questão, percentual de desempenho individual e

⁶ A plataforma *Kahoot* encontra-se disponível em: <https://kahoot.it/>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2026.

média geral da turma. Esses resultados foram exportados e organizados para análise, constituindo um conjunto de indicadores quantitativos que permitiram mensurar o nível de compreensão dos conteúdos abordados.

O *quiz* foi organizado em dois blocos de questões: o primeiro, composto por sete itens, destinado a avaliar a compreensão dos conceitos químicos envolvidos na atividade; e o segundo, formado por cinco questões, voltado à assimilação das etapas do ciclo de vida de *smartphones*, dos impactos ambientais e da importância da circularidade.

As questões foram configuradas com tempos distintos de resposta: 45 segundos para os itens de verdadeiro ou falso, 120 segundos para as questões de múltipla escolha relacionadas ao conteúdo de química e 90 segundos para aquelas questões referentes ao ciclo de vida de *smartphones*. As perguntas utilizadas e suas respectivas opções de resposta estão dispostas no Apêndice F.

A avaliação da atividade baseou-se predominantemente nos dados quantitativos do *quiz*, examinados por meio de estatística descritiva, utilizando-se frequências absolutas (número de acertos) como unidade central de análise. Com o objetivo de sistematizar a interpretação do desempenho da turma e estabelecer um critério analítico uniforme, foram definidos níveis de domínio baseados no número absoluto de acertos em cada questão, considerando o total de participantes da pesquisa. Essa classificação constitui o procedimento metodológico adotado para esta investigação, permitindo categorizar o grau de consolidação dos conteúdos avaliados em cinco níveis, conforme intervalos proporcionais previamente estabelecidos no Quadro 10.

Quadro 10. Níveis de domínio estabelecidos para a classificação das questões.

Nível	Número de acertos	Descrição
Muito elevada	20 a 22	A maioria dos estudantes demonstrou domínio claro do conceito avaliado.
Elevado	16 a 19	Domínio consistente, ainda que com alguns erros residuais.
Intermediário	11 a 15	Resultado mediano, com domínio parcial do conceito avaliado.
Reduzido	5 a 10	Baixa taxa de acerto; predominam interpretações equivocadas.
Muito reduzido	0 a 4	O conceito não foi apropriado pela turma.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Ao longo da aplicação, a professora pesquisadora conduziu discussões orientadas e formulou perguntas com o objetivo de estimular a elaboração de hipóteses e promover a reflexão crítica acerca das relações entre os fenômenos eletroquímicos e o contexto socioambiental presente nas diferentes etapas do ciclo de vida de smartphones. A integração entre os dados do *Kahoot* e os registros observacionais relativos ao engajamento, à participação e à capacidade argumentativa dos estudantes possibilitou analisar o desempenho e indícios de compreensão conceitual de forma alinhada aos objetivos da pesquisa.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa são apresentados em duas partes. A primeira parte refere-se ao processo de elaboração do *e-book*, contemplando tanto a discussão geral sobre as escolhas pedagógicas, estruturais e estéticas que orientaram sua construção, quanto a análise das especificidades de cada capítulo. A segunda parte diz respeito à aplicação do material em contexto escolar, a partir do uso dos capítulos 3, 5 e 6 em turmas do ensino médio, com o objetivo de verificar sua efetividade como recurso de ensino e aprendizagem em situações reais de sala de aula.

6.1 ANÁLISE DO PROCESSO DE ELABORAÇÃO DO *E-BOOK*

O *e-book* foi elaborado com o propósito de integrar conceitos de química à sustentabilidade e à economia circular, tendo o ciclo de vida de *smartphones* como eixo central. Seu conteúdo aborda as fases desse ciclo e seus impactos ambientais, sociais e econômicos, em diálogo com a BNCC, sugerindo uma abordagem interdisciplinar e contextualizada. Ao mesmo tempo, busca oferecer aos professores um material didático que contribua para o aprimoramento do ensino de química e fomenta discussões voltadas ao desenvolvimento do pensamento crítico orientado à sustentabilidade no ensino médio.

De acordo com Tardif (2014), os materiais didáticos integram o conjunto dos saberes docentes como ferramentas de trabalho que não apenas transmitem conteúdos, mas também orientam e estruturam possibilidades pedagógicas. O *e-book* produzido insere-se nessa perspectiva ao configurar-se como um recurso que pode ser apropriado criticamente pelo professor, ampliando seu repertório sem comprometer sua autonomia profissional. Nesse sentido, a opção por capítulos independentes valoriza a capacidade docente de reorganizar os conteúdos segundo os objetivos de cada turma e realidade escolar, em consonância com a concepção de que o professor não se limita a executar prescrições, mas atua como sujeito ativo na mediação dos saberes (Schnetzler, 2024).

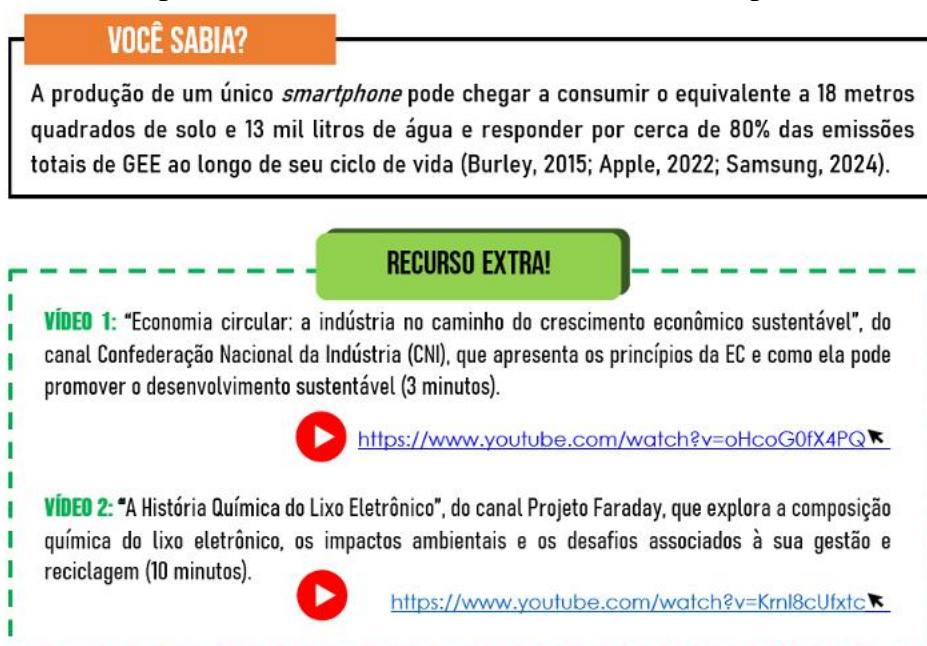
A escolha pelo formato digital encontra respaldo em Moran (2017), segundo o qual as tecnologias educacionais só se tornam significativas quando são utilizadas de forma intencional e criativa, ampliando as possibilidades de interação e de construção de conhecimento em sala de aula. Nessa perspectiva, o *e-book* foi concebido não apenas como um suporte textual, mas como um material multimodal que integra boxes de aprofundamento, acesso a vídeos e plataformas interativas, bem como propostas de atividades a serem desenvolvidas em casa e/ou em sala de aula.

Esses recursos complementares buscam oferecer aos docentes ferramentas atuais que favoreçam a contextualização dos conteúdos curriculares de química e a problematização de questões socioambientais, sendo coerente com a compreensão de que objetos digitais de aprendizagem devem funcionar como propostas pedagógicas que ampliam possibilidades didáticas e oferecem estratégias adicionais de ensino (Pascoin; Carvalho, 2020).

Além da multimodalidade, o *e-book* foi estruturado com diferentes recursos pedagógicos que buscam diversificar a apresentação dos conteúdos e ampliar as possibilidades de uso em sala de aula. O boxe “Você sabia?” cumpre a função de fornecer informações adicionais ao professor, em linguagem acessível e com destaque visual, sem sobrecarregar o corpo do texto. O objetivo é privilegiar curiosidades e dados que podem ser compartilhados em sala de aula, buscando despertar o interesse e atrair a atenção do aluno, além de ampliar o repertório docente.

Outro recurso é o boxe “Recurso extra!”, que reúne *links* para vídeos de curta duração e, em alguns capítulos, simuladores online que permitem explorar conceitos de forma interativa, como a montagem e visualização de moléculas em 3D. O objetivo ao incluir esses recursos consiste em diversificar as estratégias didáticas, ampliando as formas de apresentação dos conteúdos e, assim, favorecer o engajamento de diferentes perfis de estudantes. A Figura 6 exemplifica a estrutura dos dois boxes utilizados ao longo dos capítulos do *e-book*.

Figura 6. Exemplo da estrutura dos boxes utilizados nos capítulos do *e-book*.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Os apêndices presentes nos capítulos 2 a 6, que abordam as etapas do ciclo de vida de *smartphones*, constituem seções complementares destinadas a apresentar propostas de atividades para articular os conteúdos químicos com as dimensões socioambientais discutidas no texto principal. Os capítulos 2 e 6 apresentam propostas de caráter colaborativo, nas quais os estudantes trabalham em grupos para pesquisar sobre temas específicos, como o contraste entre práticas corretas e incorretas de descarte do lixo eletrônico, e posteriormente compartilham suas conclusões com a turma, dentro da dinâmica proposta em cada contexto.

Essas práticas colaborativas têm como objetivo favorecer a construção coletiva do conhecimento, estimulando a autonomia dos estudantes e o desenvolvimento de competências críticas e socioambientais. Nessa perspectiva, inserem-se em uma abordagem investigativa que valoriza o protagonismo do aluno na busca de informações, na análise de problemas e na socialização dos resultados obtidos (Brasil, 2018; Vilela; Moraes; Paiva, 2025).

Já nos capítulos 3, 4 e 5, essas atividades assumem a forma de experimentos acompanhados de roteiros detalhados e de materiais de apoio, como vídeos ou esquemas visuais, que orientam a execução, descrevem os resultados esperados e destacam as recomendações de segurança e de descarte adequado das substâncias utilizadas. Autores como Souza (2018), Gonçalves e Goi (2022) e Pereira e Sampaio (2022) apontam que a experimentação no ensino de química configura-se como uma estratégia importante ao aproximar teoria e prática, criando condições para que os estudantes se apropriem de conhecimentos químicos de natureza abstrata.

Além disso, a experimentação pode favorecer a motivação e o engajamento dos alunos, bem como contribuir para a formação de uma visão mais contextualizada da ciência, articulada a problematização de questões socioambientais, como os impactos do descarte de resíduos eletrônicos e a contaminação por metais pesados (Freitas; Costa; Maia, 2019; Sperandio, 2019; De Oliveira, 2020; Barbosa, 2022; De Lima *et al.*, 2025). Cabe ressaltar, contudo, que tais contribuições dependem do modo como a atividade experimental é conduzida, podendo assumir caráter demonstrativo ou envolver a participação direta dos estudantes, sob acompanhamento do professor, o que amplia as possibilidades de interação, investigação e reflexão no processo de aprendizagem.

A construção do *e-book*, contudo, envolveu desafios significativos. Além das exigências comuns à elaboração de materiais didáticos (como conciliar rigor científico, linguagem acessível, clareza e estética), a revisão bibliográfica mostrou que, embora

existam trabalhos que relacionam o ensino de química à sustentabilidade, ainda são escassas as produções que integrem essa discussão à EC e, de modo mais específico, ao ciclo de vida de *smartphones*. Em decorrência disso, o processo de pesquisa mostrou-se mais demorado, impondo dificuldades adicionais ao trabalho, o que, por sua vez, resultou na possibilidade de afirmar a originalidade da proposta.

Em síntese, a elaboração do *e-book* resultou de um processo criterioso, que integrou fundamentos teóricos, escolhas pedagógicas e cuidados estéticos. Buscou-se, nesse sentido, uma diagramação clara e padronizada, de modo a favorecer a legibilidade, a coerência visual e o destaque dos recursos pedagógicos incorporados. Assim, o produto final expressa uma proposta didática que articula a química ao eixo temático do ciclo de vida de *smartphones*, ampliando a compreensão de questões socioambientais no contexto da EC e oferecendo-se como um recurso funcional e atrativo para a prática docente.

Na sequência, será apresentada uma descrição mais detalhada do capítulo 1 e, posteriormente, uma análise conjunta dos capítulos 2 a 6.

6.1.1 Construção do capítulo 1

O Capítulo 1, intitulado "Sustentabilidade: um breve panorama", cumpre a função de introduzir os temas fundamentais que sustentam toda a proposta do material: sustentabilidade, economia circular e ciclo de vida de *smartphones*. Ao estabelecer essa base conceitual, o capítulo oferece ao professor um repertório inicial que poderá ser utilizado nos capítulos seguintes como eixo de contextualização das discussões que relacionam a química às etapas do ciclo de vida dos dispositivos – da extração de matérias-primas à destinação final.

O capítulo é construído com vistas a apresentar a sustentabilidade como uma construção histórica e política, ressaltando como diferentes contextos socioeconômicos moldaram sua definição ao longo das décadas. Ao longo da escrita, evidencia-se o contraste entre a economia linear, marcada pela extração intensiva de recursos, pelo consumo acelerado e pelo descarte crescente, e a EC, que propõe reduzir impactos ambientais mediante a reutilização, o reparo e a reintegração de materiais aos ciclos produtivos. Essa abordagem dialoga diretamente com o ciclo de vida de *smartphones*, cujas etapas perpetuam impactos significativos, como o elevado gasto energético e hídrico, o esgotamento progressivo de recursos naturais, a emissão de GEE e o aumento contínuo do volume de lixo eletrônico.

A título de exemplificação dessa abordagem, a Figura 7 ilustra a linha do tempo da sustentabilidade elaborada no capítulo.

Figura 7. Linha do tempo da sustentabilidade apresentada no capítulo 1.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

A literatura recente apresenta diferentes experiências que utilizaram o ciclo de vida de produtos como eixo articulador no ensino. Conforme discutido na Seção 4.1, os estudos de De Waard, Prins e Van Joolingen (2020; 2022) já evidenciaram o potencial dessa abordagem no tratamento de temas relacionados a bioplásticos e plásticos de origem fóssil, destacando como os estudantes passaram a reconhecer a sustentabilidade como um conceito multidimensional, não restrito a aspectos como reciclagem ou poluição, a partir da ACV do ácido polilático.

Em complemento a essas investigações, Bender e Zoch (2021) elaboraram uma sequência didática fundamentada na ACV do *jeans*, utilizada como estratégia de contextualização de conteúdos químicos (como ligações químicas, substâncias e misturas, e processos de separação) aplicada a turmas do 9º ano do ensino fundamental. Os autores concluíram que a abordagem favoreceu o envolvimento dos estudantes, permitindo que relacionassem o aprendizado ao seu contexto de vida – especialmente no caso do cultivo do algodão, significativo para alunos do meio rural – e estimulou a socialização de

experiências pessoais, além de instigar reflexões sobre os impactos ambientais dos produtos que consomem.

Outro exemplo é o de Bellini, Marques e Xavier (2022), que utilizaram a ACV de pilhas alcalinas como recurso didático no ensino de eletroquímica em turmas do 2º ano do ensino médio. A proposta consistiu em uma pesquisa bibliográfica na qual os estudantes elaboraram esquemas representando as etapas do ciclo de vida das pilhas, da extração das matérias-primas ao descarte final. Apesar das limitações apontadas pelos autores, o estudo evidenciou o potencial da ACV para articular conteúdos químicos e reflexões sobre sustentabilidade, conduzindo os alunos à compreensão de que os impactos ambientais se manifestam desde a concepção do produto e à sensibilização quanto à necessidade do descarte adequado.

O capítulo 1 cumpre, portanto, a função de base conceitual do *e-book*, sustentando não apenas os capítulos seguintes, mas também outras práticas educativas em que o professor deseje promover uma compreensão ampliada da ciência como prática social (Strieder; Kawamura, 2017; Schnetzler, 2024). Assim, para além do foco nos *smartphones*, a introdução também se configura como um aporte conceitual que pode ser apropriado pelo professor para subsidiar outras discussões ligadas à ciência e à tecnologia, orientando uma compreensão crítica e responsável acerca do emprego de recursos naturais e de aparatos tecnológicos (Dos Santos, 2007; Aikenhead, 2009).

6.1.2 Construção dos capítulos de 2 a 6

A sequência dos capítulos 2 a 6 foi estruturada de forma a permitir uma compreensão sistêmica do ciclo de vida de *smartphones*, articulando o conhecimento químico às etapas de extração, produção, transporte, uso e destinação final desses aparelhos. Essa estrutura possibilita ao docente compreender como a química se manifesta em cada fase e como pode subsidiar reflexões sobre sustentabilidade e EC.

O capítulo 2 introduz a discussão sobre a extração de matérias-primas, destacando a composição química dos *smartphones*, os tipos de mineração e seus impactos ambientais e sociais. Nessa etapa, a tabela periódica é apresentada como instrumento para compreender a origem, as propriedades e as funções dos elementos químicos presentes nos dispositivos, como lítio, cobalto, cobre, alumínio, ouro, prata e terras raras. O capítulo 3, por sua vez, trata da produção e manufatura, explorando as reações de oxirredução que viabilizam a transformação de matérias-primas em componentes funcionais, como *microchips* e circuitos. O texto aborda os desafios dessa etapa, como o consumo de

energia, a emissão de GEE e a geração de resíduos industriais, propondo a reflexão sobre processos produtivos mais limpos e eficientes.

O capítulo 4 aborda a etapa de transporte e distribuição, relacionando o conteúdo de hidrocarbonetos ao debate sobre combustíveis fósseis e biocombustíveis. Essa abordagem permite contextualizar os impactos das emissões de gases poluentes, além de incentivar discussões sobre alternativas energéticas mais sustentáveis. Já o capítulo 5 concentra-se na fase de uso dos dispositivos, destacando os processos eletroquímicos que ocorrem nas pilhas e baterias. Essa etapa propicia o debate sobre o consumo de energia elétrica, a influência das matrizes energéticas e as práticas sustentáveis que podem ser adotadas tanto pela indústria quanto pelo consumidor.

Por fim, o capítulo 6 encerra o ciclo, abordando a destinação final e o descarte de resíduos eletrônicos. A partir do conteúdo de separação de misturas, o capítulo propõe reflexões sobre reciclagem, mineração urbana e logística reversa, enfatizando a importância da gestão adequada de resíduos e da recuperação de materiais valiosos.

A articulação entre a química e o ciclo de vida de *smartphones* pode ser analisada sob o viés interpretativo da BNCC, considerando as competências gerais e as habilidades específicas que estruturam o processo formativo dos estudantes no ensino médio. Entre as habilidades que permeiam de forma transversal os capítulos de 2 a 6, destacam-se a EM13CNT101, que propõe analisar e representar as transformações da matéria e da energia em sistemas naturais e tecnológicos; a EM13CNT206, que trata da compreensão das relações entre as ações humanas e a sustentabilidade do planeta; e a EM13CNT307, que incentiva a análise das propriedades dos materiais e a avaliação de sua adequação em diferentes contextos (Brasil, 2018).

Além dessas, outras habilidades podem ser associadas a temas e etapas específicas. A EM13CNT104, por exemplo, pode ser mobilizada nos capítulos 2, 3 e 6, por discutirem os riscos ambientais e à saúde humana decorrentes da extração mineral, do refino de metais e do descarte inadequado de resíduos eletrônicos. Já as habilidades EM13CNT308 e EM13CNT309 relacionam-se, respectivamente, aos capítulos 5 e 4, por abordarem o funcionamento de equipamentos eletrônicos e a dependência energética associada ao uso de combustíveis fósseis (Brasil, 2018).

Importa destacar que a proposta do *e-book* não deriva diretamente da BNCC, mas resulta de uma escolha pedagógica voltada à oferta de um recurso estruturado para uso em sala de aula, favorecendo a articulação entre conteúdos químicos e discussões de caráter interdisciplinar.

Reconhece-se, entretanto, que o alcance efetivo das habilidades mobilizadas está condicionado a múltiplos fatores, como: tempo disponível para o desenvolvimento das atividades, organização do contexto escolar, disponibilidade de recursos, interesse e engajamento dos estudantes, bem como à forma como o professor se apropria do material e o integra à sua mediação docente. Por esse motivo, o *e-book* não busca esgotar as possibilidades de abordagem dos temas nem garantir a concretização plena das competências previstas, mas oferecer caminhos possíveis para a mobilização gradual e crítica dessas habilidades.

Nesse sentido, as atividades complementares apresentadas nos apêndices de cada capítulo assumem papel de integração entre teoria e prática, funcionando como estratégias que favorecem a transformação das discussões teóricas em experiências concretas de investigação e reflexão.

Nos capítulos 3, 4 e 5, são propostas atividades experimentais voltadas à compreensão de fenômenos químicos e processos tecnológicos, com o propósito de aproximar o estudante da materialidade da ciência. Os roteiros incluem dois experimentos envolvendo reações de oxirredução, a análise do teor alcoólico da gasolina comum e duas montagens de pilhas, respectivamente. A Figura 8 apresenta o roteiro do experimento sugerido no capítulo 4.

Figura 8. Roteiro do experimento “Medida do teor de etanol na gasolina comum”.

APÊNDICE C  Experimento: Medida do teor de etanol na gasolina comum Objetivo: Estimar a porcentagem de etanol presente na gasolina comum, com base na extração do álcool pela água. A realização deste experimento pode ser vista no vídeo “Como fazer o TESTE DA GASOLINA ADULTERADA (EXPERIÊNCIA de QUÍMICA)”, com aproximadamente 4 minutos, do canal Manual do Mundo.  https://www.youtube.com/watch?v=lu12NWbWYr8 Materiais necessários › Proveta de 100,0 mL › Bastão de vidro (ou outro material que possibilite agitar a mistura) › Gasolina comum, adquirida em postos de abastecimento de combustíveis › Água › Funil (opcional) Procedimento › Adicione 50,0 mL de gasolina na proveta. › Adicione 50,0 mL de água na proveta. › Utilize um bastão de vidro para misturar bem as duas fases. › Deixe a mistura em repouso por cerca de 10 minutos (ou até que a separação entre as fases esteja nítida) › Anote o novo volume da fase aquosa. Resultados esperados › Após o repouso, observa-se a formação de duas fases líquidas: a fase aquosa inferior, mais densa e polar, e a fase orgânica superior, composta pela gasolina, menos densa e apolar. › Ao final, espera-se que o volume da fase aquosa aumente, indicando a presença do etanol extraído e permitindo a estimativa de seu teor na gasolina analisada. O etanol, presente na gasolina, possui uma cadeia hidrocarbônica em sua estrutura molecular, que interage com os hidrocarbonetos constituintes da gasolina por interação dipolo induzido-dipolo induzido. Entretanto, o etanol possui também um grupo hidroxila. Assim, ao entrar em contato com a água, o etanol passa a interagir com a mesma por ligação de hidrogênio, sendo um processo energeticamente favorável. Consequentemente, o etanol migra completamente da fase orgânica para a fase aquosa.	Determinação do teor de etanol na gasolina Suponha que, após a realização do experimento, tenha sido observado um volume final de 65,0 mL na fase aquosa. Considerando que os volumes iniciais utilizados foram 50,0 mL de gasolina e 50,0 mL de água, temos: Volume de etanol extraído (V_e): $V_e = 65,0 \text{ mL} - 50,0 \text{ mL} = 15,0 \text{ mL}$ Teor estimado: $\begin{array}{l} 50,0 \text{ mL de gasolina inicial} \text{ ----- } 100\% \\ 15,0 \text{ mL de etanol extraído} \text{ ----- } x \\ x = 30\% \end{array}$ Neste caso, a gasolina apresenta um teor estimado de 30% de etanol, valor que corresponde ao limite máximo permitido pela legislação brasileira, cujo teor passou a ser de 30% em agosto de 2025. Portanto, essa amostra estaria em conformidade com o percentual previsto pela ANP.  CUIDADO! Este experimento envolve o uso de gasolina, um líquido inflamável e tóxico. Deve ser realizado em ambiente ventilado, longe de fontes de calor ou chamas. Além disso, é importante garantir o descarte adequado dos resíduos, que não devem ser jogados na pia. A decisão mais apropriada é levá-la a um centro de coleta de resíduos perigosos.
---	--

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A utilização de experimentos contextualizados em torno dos resíduos tecnológicos e dos processos químicos envolvidos na extração e transformação de materiais encontra respaldo em diferentes experiências relatadas na literatura (Sperandio, 2019; De Oliveira, 2020; Fidelis, 2020), como destacado na revisão bibliográfica (Seção 4.2).

Já nos capítulos 2 e 6, as atividades assumem caráter investigativo e colaborativo, propondo, respectivamente, uma pesquisa sobre a composição dos *smartphones* e a produção de cartazes temáticos sobre o lixo eletrônico. Essas propostas contribuem para a socialização do conhecimento, o desenvolvimento da consciência crítica e o trabalho coletivo, ao mesmo tempo em que estimulam o diálogo entre ciência, tecnologia e sustentabilidade, reforçando o papel da química como instrumento de compreensão e transformação da realidade.

O enfoque em atividades colaborativas e investigativas, adotado nos capítulos 2 e 6, também se evidencia em diferentes experiências realizadas no ensino de química. Moreira Júnior e Callegario (2020), Martins (2020) e Freitas, Costa e Maia (2019), ao relatarem as atividades que implementaram em seus respectivos contextos escolares (Seção 4.2), apontam avanços significativos no engajamento dos estudantes e na ampliação da compreensão das interações entre ciência, tecnologia e sociedade, evidenciando o potencial formativo dessas abordagens. Segundo os autores, o trabalho colaborativo contribuiu tanto para o desenvolvimento de habilidades comunicativas quanto para o fortalecimento do pensamento crítico acerca do uso de recursos naturais e do consumo tecnológico, aproximando o ensino de química das problemáticas socioambientais contemporâneas.

Esses resultados reforçam e respaldam a direção assumida nos capítulos 2 e 6 do *e-book*, os quais propõem investigações sobre a composição dos *smartphones* e a elaboração coletiva de materiais de divulgação científica, aproximando a aprendizagem química de contextos reais e atuais.

Desse modo, os capítulos 2 a 6 cumprem a função de materializar os princípios apresentados no capítulo 1, ao discutir as etapas do ciclo de vida de *smartphones* em consonância com os conceitos químicos que as sustentam e com as questões socioambientais e de EC que delas decorrem. Dessa forma, o *e-book* busca constituir-se como um recurso formativo que integra conhecimento científico, reflexão crítica e prática docente, oferecendo ao professor subsídios para promover um ensino de química comprometido com a sustentabilidade e com a formação de sujeitos conscientes.

6.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO CAPÍTULO 6

A aplicação do capítulo 6 representou uma das etapas de concretização da proposta pedagógica do *e-book*. A atividade, elaborada e desenvolvida integralmente pela pesquisadora em sala de aula, teve como finalidade retomar e consolidar os conhecimentos referentes às técnicas de separação de misturas homogêneas e heterogêneas, já abordadas ao longo do trimestre letivo, articulando-as a discussões sobre o ciclo de vida de *smartphones* e às implicações ambientais associadas ao descarte incorreto de resíduos eletrônicos.

A atividade foi desenvolvida em duas turmas do 1º ano do ensino médio de um colégio particular, identificadas como Turma A e Turma B, ao longo de dois encontros de 50 minutos cada, realizados em dias distintos.

Considerando o delineamento metodológico estabelecido, os resultados são apresentados em dois níveis. Inicialmente, descrevem-se os aspectos observados no primeiro encontro, com caráter contextual e descritivo, contribuindo para a compreensão do desenvolvimento da atividade. Em seguida, procede-se à análise qualitativa do segundo encontro, estruturada à luz da análise de conteúdo (Bardin, 2011), tomando como *corpus* principal os cartazes, as apresentações orais e as respostas à rodada de perguntas de verificação. Ressalta-se que a análise dos dados foi realizada de forma conjunta, em virtude da similaridade dos resultados observados nas duas turmas. Contudo, sempre que pertinente, as particularidades de cada grupo são explicitadas ao longo da discussão.

6.2.1 Primeiro encontro: contextualização temática e organização dos grupos

O encontro foi destinado à contextualização da temática do capítulo e à organização dos grupos de trabalho. A aula, com duração aproximada de vinte minutos, foi conduzida por meio de uma apresentação de *slides* (Apêndice B), iniciando-se com a problematização acerca do crescente acúmulo de lixo eletrônico no Brasil e no mundo. Como estratégia de aproximação da temática com a realidade dos estudantes, duas questões iniciais foram dirigidas às turmas: “*Quantos celulares vocês já tiveram?*” e “*Quando esses celulares deixaram de ser úteis, o que fizeram com eles?*”.

As respostas revelaram que a maioria já havia utilizado dois ou mais aparelhos ao longo da vida escolar. Ao comentarem o destino dos dispositivos antigos, três práticas apareceram com maior frequência: guardar, doar ou vender. Alguns alunos afirmaram manter os celulares em casa sob a justificativa de que ainda poderiam precisar do

aparelho, enquanto outros relataram o repasse a familiares ou a revenda para viabilizar a compra de um modelo mais novo. Esse diálogo inicial revelou a frequência da troca de dispositivos e trouxe à tona hábitos cotidianos que, até então, não haviam sido problematizados sob a perspectiva ambiental.

Dando continuidade à apresentação dos *slides*, foi então lançada a pergunta: “*Vocês sabem quantos elementos químicos existem em um celular?*”. As estimativas variaram consideravelmente, indo de números modestos, como “*cinco*” ou “*doze*”, até valores mais elevados, como “*oitenta*” e “*cento e dez*”.

A diversidade das respostas indicou a ausência de uma noção clara sobre a complexidade material desses dispositivos, circunstância que permitiu a apresentação de dados sobre a composição média dos *smartphones*, ressaltando que esses aparelhos contêm aproximadamente 70 elementos químicos distintos. Entre eles, foram mencionados o cobre, relacionado à condução elétrica; o lítio, associado ao armazenamento de energia nas baterias; o alumínio, empregado nas carcaças e estruturas externas dos aparelhos, devido à sua leveza; e o ouro, utilizado em componentes internos devido à sua alta condutividade e resistência à corrosão.

Ao abordar as etapas de reciclagem, foram lançadas duas novas questões: “*Como vocês acham que a química está envolvida nesse processo de reciclagem?*” e “*Quais técnicas de separação de misturas poderiam ser utilizadas na recuperação dos materiais de um celular?*”.

Inicialmente, observou-se hesitação por parte dos estudantes, sendo necessário retomar exemplos trabalhados anteriormente, como a catação e a separação magnética, para estimular a participação. A catação foi relacionada à etapa inicial da reciclagem, na qual componentes visíveis, como carcaças plásticas, cabos e partes metálicas, podem ser separados manualmente, enquanto a separação magnética foi associada ao uso de ímãs para a retirada de materiais ferromagnéticos presentes em estruturas internas dos dispositivos. Esse momento evidenciou que a articulação entre os processos de separação de misturas e o contexto da reciclagem de resíduos eletrônicos não se estabelecia de forma imediata, configurando-se, ao mesmo tempo, como oportunidade para mediação pedagógica, no sentido de tornar concreto o conteúdo químico previamente estudado.

Na parte final da exposição, ao discutir logística reversa e destinação adequada, perguntou-se sobre as formas corretas de descarte de eletrônicos. Embora houvesse consenso de que não deveriam ser descartados no lixo comum, poucos estudantes souberam indicar locais específicos de recolhimento. Essa incerteza foi parcialmente

superada quando, na Turma A, um aluno comentou: “*Eu já vi no shopping uma caixa para colocar pilhas e bateria de celular*”. A partir dessa fala, outros estudantes passaram a relatar experiências semelhantes, mencionando pontos de coleta observados em supermercados, lojas e até mesmo na própria escola, onde havia sido instalada recentemente uma caixa destinada ao recolhimento desse tipo de resíduo, fato que alguns ainda desconheciam.

Na Turma B, a lembrança desses pontos de coleta não surgiu espontaneamente, sendo necessário questionar diretamente se já haviam visto esse tipo de recolhimento em locais públicos ou na escola. A partir dessa provocação, alguns alunos passaram a recordar experiências semelhantes às relatadas pela Turma A.

As manifestações registradas ao longo da exposição sugerem que, embora o uso de *smartphones* seja amplamente incorporado ao cotidiano dos estudantes, a reflexão sistemática sobre o descarte desses dispositivos e seus impactos ambientais ainda não havia sido aprofundada no contexto escolar. Do mesmo modo, a hesitação inicial diante das questões que articulavam separação de misturas e reciclagem indicou que essa conexão conceitual demandava mediação para se tornar mais evidente.

Observou-se, contudo, que o espaço de diálogo favoreceu a mobilização de conhecimentos prévios e a explicitação de dúvidas, permitindo que os estudantes verbalizassem hipóteses, experiências pessoais e percepções iniciais sobre o tema. Nesse sentido, o encontro configurou-se como momento de sensibilização e problematização, no qual as perguntas propostas não tiveram como foco a obtenção de respostas certas ou erradas, mas a construção de um ambiente propício à reflexão. Tal dinâmica aproxima-se da perspectiva freireana de mediação, em que o diálogo constitui ponto de partida para a construção crítica do conhecimento (De Freitas, Freitas, 2022), sendo as interações discursivas centrais nesse processo por possibilitarem a negociação de significados entre saberes cotidianos e científicos (Mortimer; Scott, 2003).

Esse movimento inicial de problematização e mobilização conceitual constituiu a base para as produções desenvolvidas no segundo encontro, quando os estudantes passaram a organizar e sistematizar essas discussões na elaboração de seus cartazes e apresentações.

6.2.2 Segundo encontro: socialização dos cartazes e análise qualitativa das produções

O segundo encontro constituiu o *corpus* principal da análise qualitativa desta investigação, uma vez que nele se concentraram as produções dos estudantes, suas apresentações orais e as respostas à rodada de perguntas de verificação. Conforme delineado na metodologia, as diferentes fontes de dados produzidas nesse encontro (cartazes, registros das falas e respostas às questões finais) foram examinadas à luz da análise de conteúdo (Bardin, 2011), adotando-se abordagem temática.

A organização dos resultados fundamentou-se em três eixos: (i) consolidação dos conhecimentos químicos revisados, examinando a precisão conceitual e o uso adequado das técnicas de separação de misturas; (ii) articulação entre conceitos científicos e problemáticas socioambientais, analisando a capacidade de relacionar conteúdos químicos ao ciclo de vida dos *smartphones*; e (iii) alcance formativo da atividade e desdobramentos pedagógicos, considerando indícios de engajamento, mobilização expressiva e repercussão educativa da proposta. A análise foi realizada de forma conjunta para as duas turmas, destacando-se eventuais especificidades quando pertinentes.

As Figuras 9 e 10 apresentam a organização da sessão de cartazes nas duas turmas, evidenciando a disposição dos trabalhos no corredor da escola e a diversidade de recursos visuais empregados pelos grupos. Neste primeiro momento, apresenta-se uma visão geral da organização da sessão expositiva e das características das produções, reservando-se a análise detalhada para os eixos interpretativos que estruturam esta seção.

Figura 9. Sessão de cartazes da Turma A.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 10. Sessão de cartazes da Turma B.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Eixo 1. Consolidação dos conhecimentos químicos revisados.

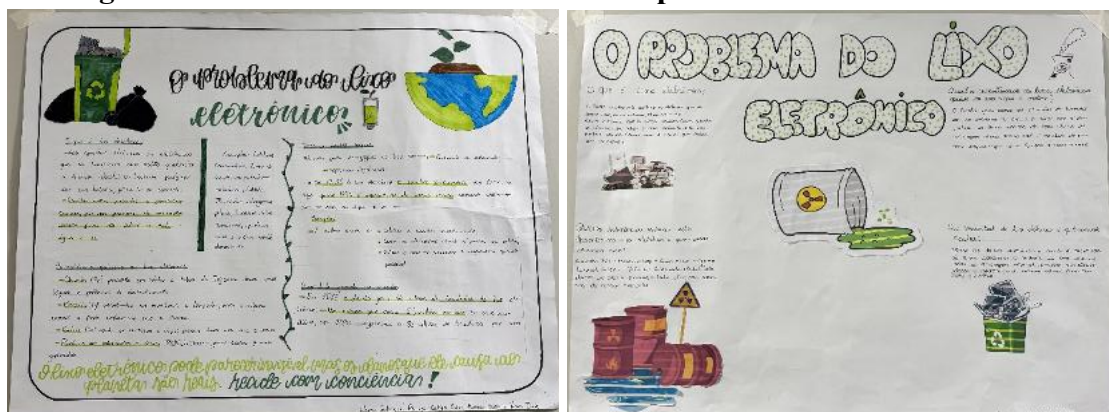
No que se refere à consolidação dos conhecimentos químicos trabalhados no trimestre, é importante considerar a organização dos temas distribuídos aos grupos (Quadro 9, Seção 5.2.1). Dos seis temas propostos, dois dialogavam diretamente com o conteúdo de separação de misturas (Técnicas de separação de misturas e Reciclagem), enquanto o tema “O problema do lixo eletrônico” mobilizava conhecimentos químicos ao abordar as substâncias presentes nos dispositivos e seus impactos.

No conjunto das produções (cartazes e apresentações orais) referentes ao tema “O problema do lixo eletrônico”, ambos os grupos apresentaram definição do que caracteriza esse tipo de resíduo, além de dados relacionados ao grande volume produzido mundialmente e às baixas taxas de reciclagem, aspecto que já havia sido problematizado no primeiro encontro. Também foram mencionadas substâncias presentes nos dispositivos, como metais pesados e retardantes de chama bromados, indicando mobilização de conteúdos químicos relacionados à composição do e-lixo.

Na Turma A, observou-se maior detalhamento na abordagem. Além da definição do que é o lixo eletrônico, os estudantes indicaram exemplos variados de resíduos que ultrapassam o universo dos *smartphones*, ampliando o escopo da discussão para outros equipamentos eletroeletrônicos. Também foram apresentados os potenciais riscos associados a substâncias como metais pesados, com menções aos impactos sobre o solo, a água e a saúde humana. Já na Turma B, a abordagem manteve-se mais sintética, priorizando a caracterização geral do problema em detrimento do detalhamento dos riscos

específicos e das fontes desses materiais. Os cartazes elaborados pelas turmas podem ser visualizados na Figura 11.

Figura 11. Cartazes referentes ao tema “O problema do lixo eletrônico”.

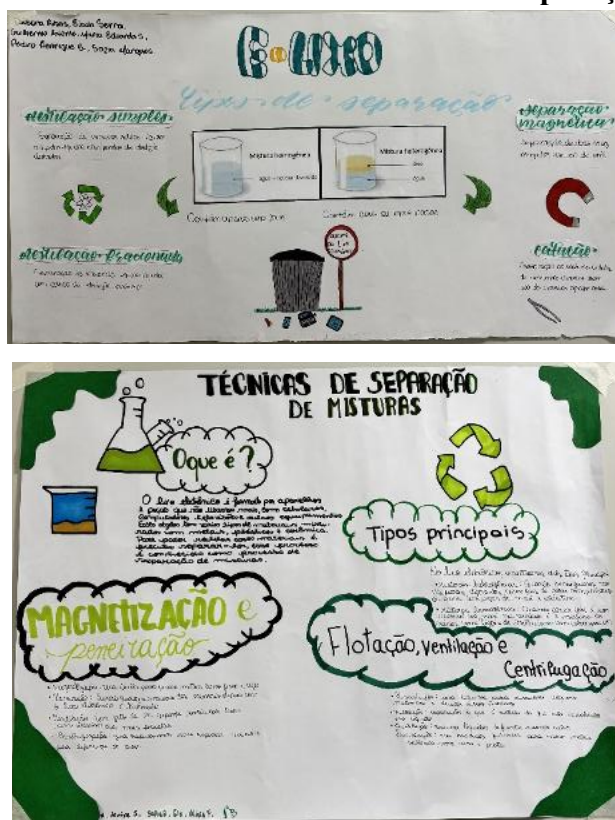


A imagem à esquerda apresenta o cartaz da Turma A, e a imagem à direita apresenta o cartaz da Turma B.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Na sequência, ao se analisarem as produções relativas ao tema “Técnicas de separação de misturas” (Figura 12), evidenciaram-se diferenças qualitativas entre as duas turmas quanto ao nível de detalhamento e à forma de contextualização dos conceitos.

Figura 12. Cartazes referentes ao tema “Técnicas de separação de misturas”.



A primeira imagem apresenta o cartaz da Turma A, enquanto a segunda apresenta o cartaz da Turma B.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Na Turma A, o cartaz apresentou de forma sintética as técnicas de destilação simples e fracionada, separação magnética e catação, além da diferenciação entre misturas homogêneas e heterogêneas, ilustradas pelos exemplos água com açúcar dissolvido e água com óleo, respectivamente. Durante a apresentação, foram ainda mencionadas filtração e decantação, contudo, os exemplos permaneceram em contextos gerais tradicionalmente explorados em sala de aula, sem relação direta com a reciclagem de dispositivos eletrônicos. Observa-se, assim, domínio consistente dos conceitos apresentados, ainda que restrito a aplicações mais convencionais e pouco articulado ao problema investigado na atividade.

Em contraste, o grupo da Turma B apresentou maior abrangência temática. Além de definir diferentes técnicas de separação de misturas, o grupo caracterizou o lixo eletrônico e identificou os tipos de misturas presentes nesse material, relacionando, por exemplo, ligas metálicas a misturas homogêneas e placas compostas por metal e plástico a misturas heterogêneas.

Durante a apresentação, foram mencionadas as técnicas de magnetização (referindo-se à separação magnética), peneiração, ventilação, centrifugação, dissolução, filtração, destilação e lixiviação. Algumas explicações, no entanto, apareceram de forma simplificada, como a afirmação de que seria possível *“usar ímãs para separar metais como ferro e aço”*, sendo o aço uma liga metálica composta majoritariamente por ferro e carbono, e não um metal distinto. De modo semelhante, ao tratar a centrifugação como um processo baseado em *“girar rapidamente para separar materiais pela diferença de peso”*, não foi explicitado que o critério envolvido está relacionado às diferenças de densidade entre os componentes submetidos à força centrífuga.

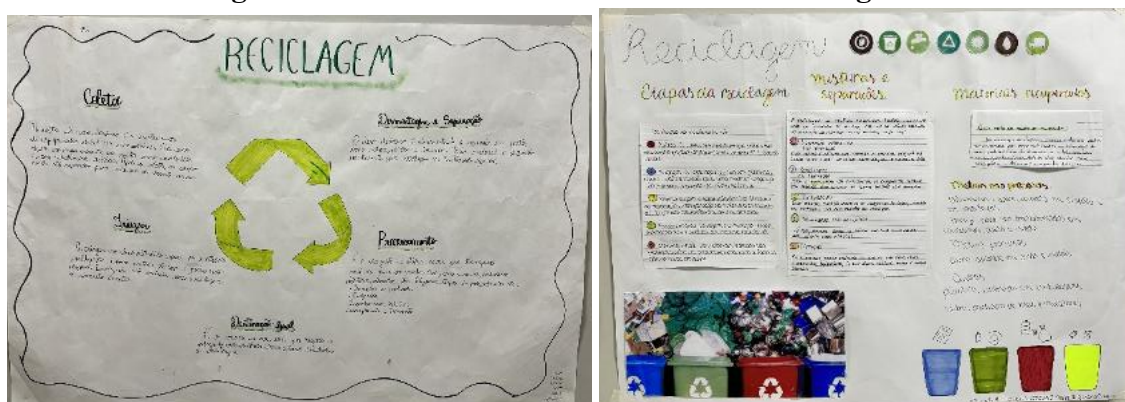
O tema “Reciclagem” também apresentou diferenças relevantes entre as turmas quanto à articulação entre o processo descrito e os fundamentos químicos envolvidos. Na Turma A, os alunos organizaram o cartaz a partir da sequência geral das etapas da reciclagem, estruturando-o em fases como coleta, triagem, desmontagem e separação, processamento e destinação final. A apresentação evidenciou compreensão da organização operacional do processo, mantendo coerência na sequência das etapas. Contudo, ao tratar da fase de processamento, os estudantes afirmaram que essa etapa seria *“usada para transformar matérias-primas em produtos úteis, como remédios, combustíveis, plásticos e alimentos”*.

Essa formulação revela uma imprecisão conceitual, pois, no contexto da reciclagem de lixo eletrônico, o processamento refere-se ao tratamento de resíduos previamente utilizados, com o objetivo de recuperar materiais para reinserção em cadeias produtivas, e não à produção de bens como medicamentos ou alimentos. Além disso, embora tenham mencionado que a separação de misturas estaria presente nessa etapa, os estudantes não conseguiram indicar quais técnicas seriam aplicáveis ao contexto específico do lixo eletrônico quando questionados, o que evidencia fragilidade na articulação entre a dimensão organizacional e a fundamentação química.

Na Turma B, por sua vez, o grupo também iniciou a apresentação pelas etapas gerais da reciclagem, mas avançou na especificidade do lixo eletrônico ao mencionar técnicas como separação magnética, peneiração, trituração, separação eletrostática e flotação, as quais foram descritas de forma adequada quanto ao seu funcionamento. Além disso, foram apresentados exemplos de materiais que podem ser recuperados no processo de reciclagem de dispositivos eletrônicos, como alumínio, cobre, metais preciosos, vidro e plásticos.

Diferentemente da imprecisão observada na Turma A, as inconsistências da Turma B foram pontuais e de natureza terminológica, como a afirmação de que o ouro estaria presente “em joias e metais”, expressão imprecisa do ponto de vista terminológico, uma vez que o ouro é ele próprio um metal. Ainda assim, a indicação do ouro como material recuperável em dispositivos eletrônicos está correta, considerando sua utilização em conectores e componentes internos. A Figura 13 apresenta os cartazes produzidos pelas duas turmas.

Figura 13. Cartazes referentes ao tema “Reciclagem”.



A primeira imagem apresenta o cartaz da Turma A, enquanto a segunda apresenta o cartaz da Turma B.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Por fim, no que se refere à rodada de perguntas, mais especificamente à terceira questão, voltada às técnicas de separação de misturas aplicáveis à reciclagem de dispositivos eletrônicos, a atividade mostrou que os estudantes conseguiram reconhecer e nomear processos estudados ao longo do trimestre, ainda que com diferentes níveis de aprofundamento e articulação conceitual. As respostas evidenciaram que os principais procedimentos estavam presentes em sua estrutura de conhecimentos, mas variaram quanto à clareza na explicitação de suas finalidades e fundamentos.

Ao comparar as duas turmas, percebe-se uma diferença importante. Na Turma B, houve maior número de menções às técnicas e aos materiais envolvidos, como, por exemplo, a catação na etapa inicial de triagem, a separação magnética para retirada de componentes ferromagnéticos e a dissolução de metais, expressa na ideia de *“dissolver o ouro para separar dos outros materiais”*. Já na Turma A, as respostas foram mais sintéticas e menos conectadas ao contexto específico do lixo eletrônico. Essa diferença acompanha o que já havia sido percebido nas apresentações, nas quais a contextualização química esteve mais explícita na Turma B.

À luz da teoria da aprendizagem significativa proposta por Ausubel (2003), os resultados indicam que os conceitos trabalhados estavam presentes na estrutura cognitiva dos estudantes, uma vez que foram capazes de reconhecê-los e mobilizá-los durante as apresentações e na rodada de perguntas. No entanto, a variação no nível de detalhamento e na capacidade de relacionar as técnicas aos seus fundamentos físico-químicos sugere que essa incorporação ainda não se deu de maneira plenamente articulada.

Segundo Ausubel (2003), a aprendizagem torna-se significativa quando novas informações se conectam de forma substantiva aos conhecimentos prévios do aluno. No contexto desta atividade, a capacidade de nomear técnicas como separação magnética, catação ou dissolução evidencia que houve retenção conceitual; entretanto, as diferenças observadas entre as turmas demonstram que a integração entre conceito, aplicação e justificativa científica ocorreu em níveis distintos.

Assim, o Eixo 1 revela que os conhecimentos químicos revisados foram mobilizados pelos estudantes, mas ainda demandam aprofundamento para que a compreensão ultrapasse a identificação de procedimentos e avance na explicitação dos critérios científicos que orientam sua escolha e aplicação no contexto da reciclagem de resíduos eletrônicos.

Eixo 2. Articulação entre conceitos científicos e problemáticas socioambientais.

Neste eixo, discute-se a relação entre os conhecimentos científicos trabalhados e a problemática socioambiental do lixo eletrônico, considerando os diferentes temas desenvolvidos no segundo encontro, como “O problema do lixo eletrônico”, “Logística reversa”, “Descarte correto e incorreto” e “Estratégias para reduzir o lixo eletrônico”.

No tema “O problema do lixo eletrônico”, as apresentações evidenciaram que os estudantes reconheceram a dimensão global da questão, destacando o grande volume de resíduos eletroeletrônicos produzidos anualmente e as baixas taxas de reciclagem, aspectos já apresentados anteriormente na Figura 11 e discutidos no eixo anterior sob a perspectiva da composição química dos materiais.

As falas indicaram compreensão de que o problema envolve não apenas o descarte inadequado, mas também o desperdício de recursos naturais que poderiam retornar ao ciclo produtivo. Foram mencionados, ainda, os riscos associados à presença de substâncias como metais pesados e retardantes de chama bromados, com referência à contaminação do solo e da água e aos possíveis impactos sobre a saúde humana. Esse conjunto de elementos demonstra que os estudantes perceberam o lixo eletrônico como uma problemática ambiental de alcance amplo, com implicações sociais e econômicas.

No tema “Descarte correto e incorreto”, as produções indicaram o esforço dos estudantes em diferenciar práticas de destinação dos resíduos eletrônicos e explicitar suas implicações. Na Turma A, o grupo elaborou um cartaz com luzes de LED colorido e uma lata de lixo reciclável, dentro da qual foram colocados fones de ouvido e pilhas sem uso, simbolizando o descarte correto de resíduos eletrônicos. O recurso visual conferiu destaque ao tema e reforçou a ideia de que a destinação adequada exige atenção e intencionalidade. A Figura 14 apresenta o cartaz produzido pela equipe da turma A.

Já na Turma B, os estudantes optaram por apresentar o conteúdo por meio de *slides*, contextualizando o problema do lixo eletrônico e seus impactos, e utilizaram o cartaz como síntese visual da pesquisa, fixando cabos, pilhas e baterias em pequenos boxes explicativos, como ilustrado na Figura 15. Nesse caso, o material físico funcionou como apoio ilustrativo a uma exposição mais argumentativa.

Figura 14. Cartaz da Turma A com destaque para o uso de luzes de LED.



A imagem à esquerda apresenta o cartaz com o LED ainda desligado, enquanto a imagem à direita apresenta o cartaz com o LED aceso com as luzes da sala de aula apagadas.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Figura 15. Cartaz da Turma B com destaque para o uso de elementos eletrônicos.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Em ambas as turmas, esteve presente a compreensão de que o descarte correto favorece a economia de recursos naturais e contribui para a proteção do meio ambiente e da saúde pública. Os estudantes contrapuseram essa prática ao descarte no lixo comum ou ao hábito de “*deixar guardado na gaveta*”, expressão utilizada nos dois grupos para se referir ao armazenamento prolongado de aparelhos e acessórios sem uso. Argumentaram que essa prática, além de retardar a reinserção dos materiais no ciclo produtivo e intensificar a extração de matéria-prima virgem, aumenta os riscos de contaminação do solo e do lençol freático, além da sobrecarga dos aterros sanitários, os quais não dispõem de processos adequados para lidar com esse tipo de resíduo.

Foram indicadas, ainda, alternativas consideradas apropriadas, como o encaminhamento a pontos de coleta específicos e a inserção em sistemas de logística reversa, demonstrando reconhecimento de que a responsabilidade pela destinação não se encerra no ato de descartar, mas integra uma cadeia mais ampla de gestão de resíduos.

Cabe destacar que, no primeiro encontro, alguns desses mesmos estudantes haviam relatado que eles e seus familiares mantinham o hábito de guardar aparelhos antigos junto a cabos e outros objetos sem uso. A retomada desse comportamento nas apresentações sugere não apenas a identificação do problema em nível abstrato, mas um movimento de reflexão sobre práticas cotidianas, elemento central para a formação de uma postura mais crítica diante do consumo e do descarte de tecnologias.

No tema “Logística reversa”, as produções demonstraram compreensão de que a destinação dos resíduos eletrônicos integra um sistema de responsabilidades compartilhadas. Na Turma A, a abordagem foi mais expositiva e sintética, com definição do conceito, reconhecimento da corresponsabilidade entre consumidores e fabricantes prevista na PNRS e indicação da logística reversa como mecanismo de retorno dos materiais ao ciclo produtivo. Já na Turma B, o cartaz e a apresentação foram mais detalhados, incluindo a descrição de objetivos, etapas e classificações, como os sistemas de pós-venda e pós-consumo, além da ampliação dos atores envolvidos no processo. Em ambas as turmas, a logística reversa foi reconhecida como estratégia relevante para a reciclagem, a redução dos impactos ambientais e o fortalecimento da sustentabilidade, sendo relacionada à EC como forma de reinserção de materiais nas cadeias produtivas.

Por fim, o último conjunto de apresentações abordou o tema das “Dicas para reduzir o lixo eletrônico”, voltado às orientações sobre o que fazer com um aparelho antes de descartá-lo e como estender a vida útil de um *smartphone*, conforme as questões norteadoras propostas no primeiro encontro (Quadro 9, Seção 5.2.1). As duas turmas organizaram suas exposições a partir dessas perguntas, apresentando recomendações semelhantes, como cuidados com a bateria e com o carregamento, evitar quedas, manter o *software* atualizado, realizar manutenção quando necessário e, ao final do ciclo de uso, doar ou vender o aparelho em vez de descartá-lo ou mantê-lo sem uso.

As apresentações assumiram caráter predominantemente expositivo, com menor desenvolvimento argumentativo. Ainda assim, os estudantes destacaram práticas que contribuem para a extensão do tempo de uso dos dispositivos e para a circulação dos aparelhos antes da destinação final, aspecto relevante por se tratar de ações diretamente ao alcance dos próprios usuários. Ao trazerem exemplos de atitudes que podem ser

incorporadas ao cotidiano, aproximaram a discussão da realidade individual, reforçando a ideia de que a redução do lixo eletrônico inclui tanto escolhas individuais quanto estruturas institucionais de gestão de resíduos.

Durante as apresentações e na rodada de perguntas, também apareceram algumas imprecisões conceituais, sendo a mais recorrente a assimilação entre os termos reciclagem e reaproveitamento, utilizados como sinônimos por parte dos estudantes. É importante considerar que ambos os termos circulam amplamente no discurso cotidiano e no *marketing* ambiental, muitas vezes sem distinção rigorosa entre seus significados técnicos. No uso comum, reaproveitar refere-se à reutilização direta de um produto ou material, enquanto reciclar envolve o reprocessamento físico ou químico para reinserção na cadeia produtiva.

Ainda assim, as respostas às duas primeiras questões da rodada final indicaram que os estudantes compreenderam as implicações ambientais associadas às práticas de consumo e descarte. Ao tratarem do hábito de manter aparelhos “guardados na gaveta”, reconheceram que essa prática impede a reinserção dos materiais no ciclo produtivo e intensifica a extração de novos recursos naturais. A fala de um aluno, *“se ficar guardado, não dá para reciclar, então vão ter que tirar mais metal da natureza”*, exemplifica essa percepção. Da mesma forma, ao discutirem o descarte no lixo comum, destacaram os riscos de contaminação do solo e da água por metais pesados, demonstrando entendimento de que esses resíduos exigem destinação específica.

Considerando o conjunto das evidências, observa-se que a dimensão socioambiental do problema foi amplamente apropriada pelos estudantes, ainda que a precisão terminológica nem sempre tenha acompanhado o mesmo nível de consolidação. Tal resultado aproxima-se de perspectivas que propõem a articulação CTS, que defendem a contextualização dos conteúdos escolares como estratégia para atribuir sentido social ao conhecimento científico e superar sua apresentação fragmentada e descontextualizada (Aikenhead, 2006; Acevedo-Díaz, 2004).

Esse processo aproxima-se, ainda, da concepção de alfabetização científica proposta por Chassot (2018), para quem ensinar ciência implica possibilitar a leitura do mundo por meio da linguagem científica. Ainda que a consolidação terminológica não tenha se apresentado de forma plenamente sistematizada, os resultados indicam avanços no letramento científico, na medida em que os estudantes demonstraram capacidade de utilizar o conhecimento científico para interpretar e posicionar-se diante de questões socioambientais.

Eixo 3. Alcance formativo da atividade e desdobramentos pedagógicos.

A análise desenvolvida nos dois eixos anteriores indica que a atividade contribuiu para a mobilização tanto dos conhecimentos químicos quanto das problemáticas socioambientais associadas ao lixo eletrônico. De modo geral, os estudantes demonstraram apropriação consistente da dimensão ambiental do tema, reconhecendo impactos globais, riscos à saúde e ao meio ambiente, bem como a necessidade de repensar práticas de consumo e descarte. No campo conceitual, as técnicas de separação de misturas foram lembradas e nomeadas, ainda que nem sempre plenamente articuladas ao contexto específico da reciclagem de dispositivos eletrônicos. Esses resultados confirmam o potencial formativo da proposta e oferecem elementos para uma avaliação mais abrangente do processo.

Conforme previsto na metodologia, o segundo encontro foi encerrado com uma retomada conceitual, realizada imediatamente antes da fixação dos cartazes no corredor da escola. Esse momento integrou a proposta desde sua concepção e teve como finalidade sistematizar e aprofundar os conteúdos trabalhados.

Esse momento contemplou a diferenciação entre misturas homogêneas e heterogêneas, a discussão das propriedades físicas dos materiais presentes nos dispositivos eletrônicos e a revisão das principais técnicas de separação de misturas que podem ser aplicadas nas etapas de reciclagem. Foram destacadas, entre elas: catação, utilizada na triagem inicial dos resíduos eletroeletrônicos; separação magnética, aplicada à recuperação de componentes metálicos ferromagnéticos; e processos físico-químicos sucessivos, que permitem a separação seletiva de metais por diferenças de solubilidade, densidade ou atração magnética.

Nesse contexto, a intervenção final assumiu o papel de acompanhamento e orientação da aprendizagem, permitindo identificar as lacunas conceituais e criar condições para que os alunos reelaborassem suas ideias. Conforme discutem Hoffmann (2000) e Zabala (2015), a avaliação formativa deve ser compreendida como um processo contínuo, que valoriza o percurso e as experiências de aprendizagem, servindo ao mesmo tempo como instrumento de reflexão para o professor e de avanço para o aluno. Sob essa perspectiva, a mediação docente consistiu em explicitar relações que nem sempre estavam claras nas apresentações, favorecendo a transição de explicações predominantemente descritivas para abordagens mais fundamentadas nos critérios físicos e químicos que orientam os processos estudados.

Encerrada a atividade, os cartazes permaneceram expostos no corredor da escola por aproximadamente duas semanas. Durante esse período, foram registrados comentários espontâneos de diferentes membros da comunidade escolar, incluindo professores, inspetores e funcionários da equipe de serviços gerais, os quais destacaram tanto a qualidade estética dos materiais quanto a relevância do tema abordado. Alguns relataram desconhecer a forma adequada de descartar eletrônicos sem uso e relataram ter compreendido, a partir da exposição, a importância dessa prática.

A coordenação pedagógica também manifestou interesse na reaplicação da atividade em outras unidades do colégio, com a proposta de estender o trabalho às demais turmas de 1º ano do ensino médio. Embora essa reaplicação ainda não tenha sido possível devido ao planejamento curricular, esse retorno constitui um indicativo relevante de valorização e visibilidade do trabalho desenvolvido.

Cabe ressaltar que a análise do processo de aplicação e das evidências produzidas ao longo dos dois encontros também permitiu identificar aspectos estruturais passíveis de aprimoramento. Na estrutura inicial, os seis temas atribuídos aos grupos apresentavam sobreposições de conteúdo, sobretudo entre os temas “O problema do lixo eletrônico”, “Descarte correto e incorreto” e “Logística reversa”, o que contribuiu para a repetição de informações e dificultou a distinção clara entre os focos de cada grupo.

Além disso, apenas três dos temas exigiam mobilização mais direta de conceitos químicos, o que resultou em uma distribuição desigual dos conteúdos específicos da área entre as equipes. Enquanto alguns grupos desenvolveram abordagens predominantemente descritivas, outros concentraram maior aprofundamento nos conteúdos relacionados às técnicas de separação e às propriedades dos materiais. Ainda que essa organização não tenha comprometido o envolvimento dos estudantes, ela tornou menos equilibrada a integração entre os conteúdos de química e o debate socioambiental proposto.

A partir dessa análise, optou-se por reorganizar a atividade (Quadro 9, Seção 5.2.1), buscando tornar mais explícita a relação entre os conceitos químicos e a problemática do lixo eletrônico. A nova configuração, apresentada no Quadro 11, reduziu os temas de seis para quatro, integrando conteúdos que anteriormente apareciam fragmentados e delimitando com maior precisão o escopo de cada grupo. Essa reorganização teve como objetivo minimizar as sobreposições observadas e favorecer uma distribuição mais equilibrada dos conteúdos de química entre os grupos.

Quadro 11. Nova estrutura para a atividade proposta no capítulo 6.

Tema geral	Direcionamento de pesquisa
O problema do lixo eletrônico	Identificar o que caracteriza um resíduo como lixo eletrônico e quais materiais e substâncias químicas costumam estar presentes nele. Reconhecer quais os principais riscos ambientais e à saúde humana associados a essas substâncias (como metais pesados, por exemplo).
Técnicas de separação de misturas	Reconhecer o que caracteriza misturas homogêneas e heterogêneas. Identificar os principais processos de separação de misturas, como catação, separação magnética, peneiração, decantação, dissolução seletiva e filtração.
Reciclagem	Identificar quais técnicas de separação de misturas aparecem no processo de reciclagem e o que cada uma separa, indicando em quais etapas atuam. Ex: catação , usada na triagem para separar partes maiores; separação magnética , separa metais ferromagnéticos após trituração; dissolução seletiva + filtração , permite recuperar metais preciosos presentes nas placas.
Descarte correto	Identificar onde e como descartar corretamente resíduos eletrônicos, destacando os benefícios dessa prática. Apresentar ações práticas para reduzir a produção de e-lixo.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Entre as principais mudanças estruturais, destaca-se a redefinição da relação entre temas “Técnicas de separação de misturas” e “Reciclagem”. O primeiro passou a concentrar o estudo conceitual das técnicas, abordando suas definições, critérios e fundamentos, enquanto o segundo foi direcionado explicitamente à aplicação dessas técnicas no contexto do lixo eletrônico, indicando quais processos aparecem na reciclagem e o que cada um permite separar. Para evitar repetições, foi incluída, no apêndice do Capítulo 6 do *e-book*, uma orientação específica ao professor, esclarecendo a divisão entre o estudo conceitual e o estudo aplicado das técnicas.

Outra modificação relevante foi a substituição das “questões norteadoras” por “direcionamentos de pesquisa”, formulados em linguagem mais objetiva e direta. Essa alteração buscou reduzir ambiguidades, explicitar expectativas e orientar com maior clareza a relação entre o tema investigado e as técnicas de separação de misturas. Essas mudanças não configuram ruptura com a proposta inicial, mas seu aprimoramento a partir das evidências produzidas na aplicação. Reconhece-se, contudo, que a eficácia dessa nova organização ainda carece de avaliação mediante aplicação em sala de aula.

Em síntese, a análise das limitações observadas durante a aplicação e a consequente reformulação da atividade expressam uma postura reflexiva diante da prática docente, em que o professor aprende com a própria experiência e reorienta suas ações com base nas evidências produzidas. Essa atitude revela um movimento de aprendizagem profissional contínuo, em que o ensino é compreendido como um processo de observação, análise e aperfeiçoamento permanentes (Carvalho, 2019). Desse modo, o processo avaliativo não se encerra na constatação das limitações, mas se converte em oportunidade de aprimoramento contínuo, coerente com a perspectiva investigativa e formativa que fundamenta esta dissertação.

Embora os resultados obtidos na aplicação inicial não tenham alcançado plenamente o nível de integração esperado entre o conteúdo químico e a problemática ambiental, a atividade demonstrou potencial formativo significativo, tanto pela mobilização dos estudantes quanto pela aceitação institucional. Nesse contexto, a proposta foi capaz de favorecer discussões sobre a etapa final do ciclo de vida dos *smartphones* e ampliar o debate para além da sala de aula, alcançando outros membros da comunidade escolar, o que indica que os objetivos formativos foram, em grande medida, atingidos.

6.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO CONJUNTA DOS CAPÍTULOS 3 E 5

A aplicação dos capítulos 3 e 5 foi realizada em uma turma do 2º ano do ensino médio, ao longo de dois tempos consecutivos de 50 minutos cada. A aula foi estruturada em alternância entre apresentação de *slides* (Apêndice C) e execução de experimentos, de modo que cada etapa do ciclo de vida fosse acompanhada pelos conceitos químicos correspondentes, culminando com a aplicação de um *quiz* na plataforma *Kahoot*.

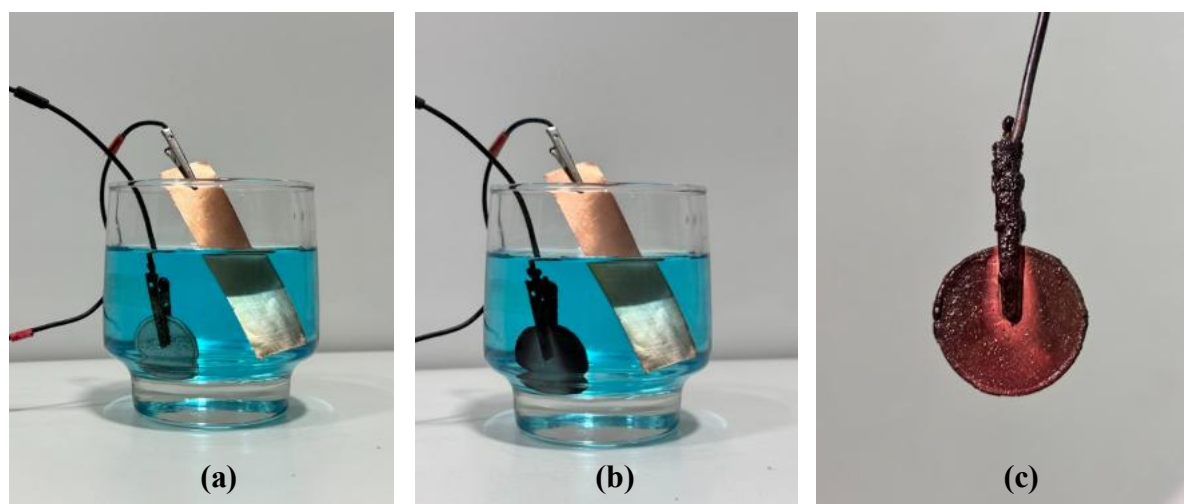
Após uma breve contextualização do ciclo de vida, o foco da aula voltou-se para a etapa de produção, avançando posteriormente para a etapa de uso, acompanhando a própria sequência de etapas do ciclo. Na fase de produção, foram revisados os principais conceitos relacionados às reações de oxirredução, com ênfase nas transformações características do processo de purificação do cobre por eletrólise aquosa, demonstradas por meio do experimento de galvanização eletrolítica de uma moeda (Apêndice D), correspondente ao capítulo 3.

Logo nos instantes iniciais, observou-se a rápida deposição de cobre sobre a superfície da moeda, que progressivamente adquiriu tonalidade alaranjada. Esse comportamento foi explicado a partir da dinâmica eletroquímica do processo: o fio de

cobre, atuando como ânodo, sofreu oxidação, liberando íons Cu^{2+} para a solução, enquanto a moeda, atuando como cátodo, recebeu elétrons do circuito externo, promovendo a redução dos íons Cu^{2+} e o consequente depósito metálico.

A Figura 16 apresenta três momentos do experimento: (a) o sistema montado antes da aplicação da corrente elétrica, (b) o início da deposição do metal, e (c) o aspecto da moeda após dois minutos de eletrólise. O experimento foi conduzido com a participação direta dos estudantes, que se envolveram na montagem do sistema e na execução dos procedimentos sob orientação da pesquisadora, responsável por mediar a análise e a interpretação dos resultados à medida que os fenômenos eram observados.

Figura 16. Experimento de galvanização eletrolítica de uma moeda.



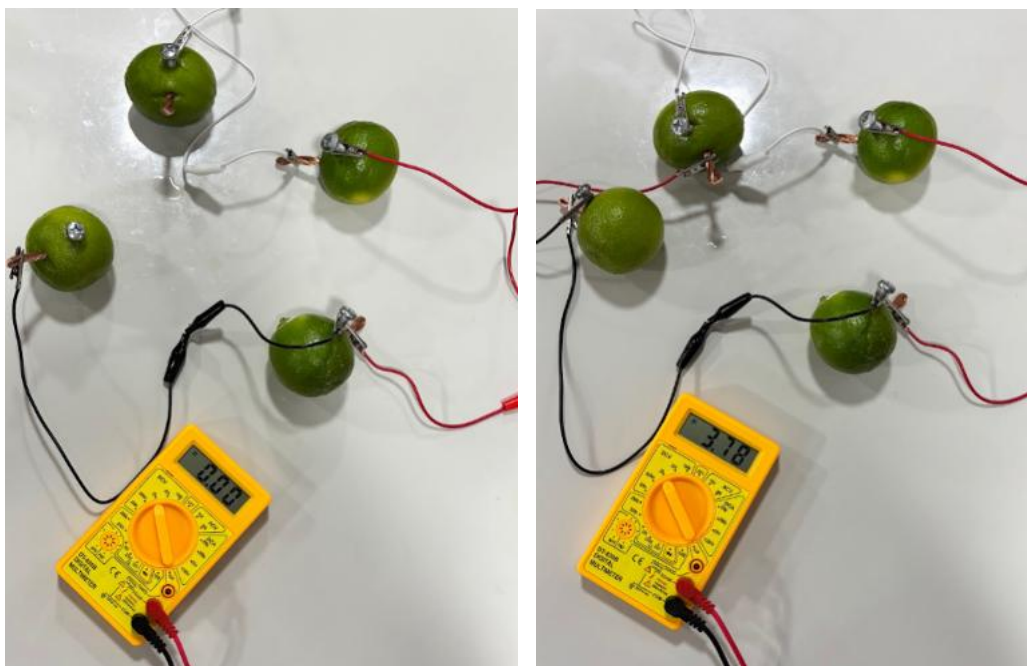
Fonte: Elaboração própria, 2025.

Concluída a atividade experimental, retornou-se aos *slides* para dar sequência à abordagem do ciclo de vida, desta vez com foco na etapa de uso dos *smartphones*. Nesse momento, foram revisados os conceitos centrais relacionados ao funcionamento das pilhas eletroquímicas, destacando-se a espontaneidade das reações (em contraste direto com os processos não espontâneos observados na eletrólise), a diferença de potencial entre os eletrodos e o papel da ponte salina na manutenção da neutralidade elétrica entre as soluções. Como forma de contextualizar o funcionamento das baterias de íons lítio presentes nos dispositivos móveis, foi realizado o experimento de pilhas de limão em série (Apêndice E), correspondente ao capítulo 5 do *e-book*.

A Figura 17 ilustra esse procedimento experimental: a esquerda, o sistema montado, ainda com o circuito aberto e leitura de 0,00 V; e, a direita, a montagem final, já com o circuito fechado, registrando uma diferença de potencial de 3,78 V. Assim como no experimento anterior, a atividade contou com a participação dos estudantes nas etapas

de montagem e conexão do circuito, sob orientação da pesquisadora. Contudo, por razões de segurança, o momento que envolvia o corte do limão foi realizado exclusivamente pela docente, sendo as demais etapas conduzidas com a colaboração dos alunos.

Figura 17. Experimento de pilhas de limão em série.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Durante a prática, os estudantes observaram a geração espontânea de corrente elétrica, evidenciada pela leitura da voltagem no multímetro. Considerando os pares Zn^{2+}/Zn ($E^\circ = -0,76\text{V}$) e H^+/H_2 ($E^\circ = 0,00\text{V}$), cada pilha deveria apresentar, em condições padrão, um potencial de $0,76\text{ V}$, o que resultaria em $3,04\text{ V}$ para quatro células conectadas em série. No entanto, como mostra a Figura 17, o valor obtido experimentalmente foi superior ao previsto. Essa diferença não pode ser atribuída a um único fator, mas é provável que decorra das características do sistema, que se encontra distante das condições-padrão, como soluções a $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ e temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$ (298 K). Ainda assim, essa variação não compromete a coerência do fenômeno observado nem a compreensão dos princípios eletroquímicos envolvidos, que constituem o aspecto mais relevante da experimentação.

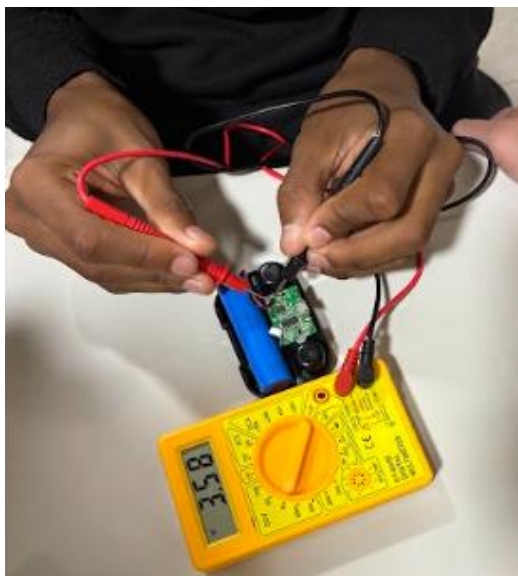
A etapa de apresentação do tema foi finalizada com uma última retomada dos *slides*, nos quais foram discutidos os principais impactos ambientais associados às etapas de produção e consumo no ciclo de vida de *smartphones*, como o elevado consumo de energia elétrica e a emissão de GEE, além de serem apresentadas soluções alinhadas aos princípios da EC, incluindo reciclagem, reuso e estratégias de prolongamento da vida útil

dos dispositivos. Nesse momento, foi aberto espaço para que os alunos esclarecessem dúvidas e compartilhassem curiosidades surgidas ao longo da exposição, favorecendo uma transição mais natural para o encerramento da aula.

É importante destacar a atenção dos estudantes durante toda a atividade, permanecendo concentrados na explicação e demonstrando curiosidade durante os experimentos. Esse interesse ficou particularmente evidente na etapa prática, quando os alunos se voluntariaram para auxiliar na realização dos experimentos, demonstrando animação ao assumir tarefas simples, como preparar a solução, montar os eletrodos ou operar a fonte de corrente elétrica. Além disso, alguns estudantes solicitaram permissão para registrar os experimentos por meio de fotos e vídeos, e um grupo em particular demonstrou interesse adicional ao pedir para testar, com o multímetro, a voltagem das baterias de seus eletrônicos.

A Figura 18 mostra o aluno realizando o teste e obtendo a leitura de 3,58 V da bateria de íon-lítio presente na caixa do seu fone de ouvido *bluetooth*. Esse movimento espontâneo evidencia não apenas a curiosidade despertada pela proposta, mas também uma apropriação prática dos conceitos discutidos, revelando uma atitude investigativa coerente com os objetivos formativos da atividade.

Figura 18. Medição da tensão da bateria de íon-lítio de um fone de ouvido *bluetooth*.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

6.3.1 Análise do desempenho dos estudantes no *quiz* aplicado pelo *Kahoot*

Para consolidar o conteúdo trabalhado, foi aplicado um *quiz* na plataforma *Kahoot*, composto por 12 questões. As sete primeiras questões avaliaram a compreensão dos fenômenos químicos estudados, enquanto as cinco finais abordaram as etapas do ciclo de vida de *smartphones*. As perguntas utilizadas e suas respectivas opções de resposta estão dispostas no Apêndice F. A Figura 19 apresenta a segunda pergunta do *quiz*, exemplificando como sua interface é visualizada pelos estudantes.

Figura 19. Interface da segunda pergunta do *quiz* elaborado no *Kahoot*.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

Embora a plataforma tenha registrado 26 participantes, apenas 22 foram considerados válidos para a análise. A exclusão de quatro estudantes justificou-se pelo fato de que dois não responderam a nenhuma questão e outros dois responderam apenas uma, o que inviabilizaria sua inclusão em cálculos consistentes. Conforme indicado na metodologia, a participação na atividade era de caráter voluntário, não sendo obrigatória a permanência até o término do questionário.

Os resultados do *quiz*, recalculados com base nos 22 participantes válidos, estão organizados no Quadro 12, que apresenta, para cada questão, o tipo de item (múltipla escolha ou verdadeiro/falso), o número absoluto de acertos e a classificação atribuída conforme o nível de dificuldade.

Quadro 12. Resultados e classificação das questões do quiz.

Questão	Tipo	Acertos	Nível
Q1	V/F	12	Intermediário
Q2	Múltipla escolha	17	Elevado
Q3	Múltipla escolha	15	Intermediário
Q4	Múltipla escolha	16	Elevado
Q5	Múltipla escolha	10	Reduzido
Q6	Múltipla escolha	10	Reduzido
Q7	V/F	18	Elevado
Q8	Múltipla escolha	22	Muito elevado
Q9	V/F	21	Muito elevado
Q10	Múltipla escolha	4	Muito reduzido
Q11	Múltipla escolha	19	Elevado
Q12	V/F	19	Elevado

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A análise dos resultados obtidos na aplicação conjunta dos capítulos 3 e 5 evidencia tendências importantes no desempenho conceitual dos estudantes e na forma como diferentes abordagens – experimentação, contextualização e problematização – contribuíram para a aprendizagem. Considerando os 22 estudantes válidos, o conjunto das 12 questões apresentou uma média geral de 69% de acertos, indicando um desempenho satisfatório da turma e sugerindo que grande parte dos conteúdos trabalhados ao longo da aula foi compreendida de maneira significativa.

Ainda assim, a distribuição interna dos percentuais revela diferenças importantes entre os blocos avaliados, bem como entre os tipos de habilidades cognitivas mobilizadas. O primeiro bloco foi composto por sete questões (Q1 a Q7), voltadas para a avaliação dos conceitos químicos revisados durante a aula, enquanto o segundo bloco reuniu cinco questões (Q8 a Q12), relacionadas às etapas do ciclo de vida de *smartphones*.

Ao observar o desempenho apresentado no Quadro 12, nota-se que a Q1, destinada à identificação da polaridade dos eletrodos em pilhas e em eletrólise, apresentou nível de domínio intermediário, com 12 acertos. Embora tenha sido estruturada em formato de verdadeiro/falso com a intenção de oferecer uma entrada mais simples ao *quiz*, o tempo médio de resposta de apenas 6,7 segundos, se mostrou insuficiente para uma leitura atenta do comando. A impulsividade observada neste item é possivelmente um reflexo da euforia inicial e da competitividade própria da plataforma, uma vez que, no *Kahoot* responder com rapidez aumenta a pontuação e melhora a posição no *ranking*.

É válido pontuar que a análise imediata do desempenho na Q1 permitiu identificar que a agitação da turma poderia interferir na precisão das respostas. Diante disso, tornou-se necessária uma intervenção imediata, alertando os estudantes a moderarem o ritmo,

voltarem sua atenção para a leitura cuidadosa do enunciado e priorizarem o raciocínio antes de responder. Essa mediação buscou assegurar que o desempenho posterior refletisse de forma mais assertiva o domínio conceitual real dos alunos, e não apenas a dinâmica competitiva da atividade.

Já a partir da Q2, relacionada ao experimento de galvanização, os tempos médios de resposta aumentaram de forma consistente, mostrando que os estudantes passaram a ler com mais atenção e a ponderar suas escolhas com maior cuidado. Nesse item, o tempo médio saltou para 28,3 segundos e foi acompanhado de um aumento no número de acertos, resultando em um nível de domínio elevado. Entre os cinco erros registrados, quatro corresponderam à alternativa “A reação é espontânea e converte energia elétrica em energia química”, indicando uma compreensão parcial dos processos eletroquímicos discutidos em aula. Neste caso, os alunos reconheceram um princípio válido, porém aplicado ao fenômeno erroneamente, confundindo a eletrólise (não espontânea) com a pilha (espontânea).

Na Q3, referente à reação global da pilha de limão, o desempenho se manteve em domínio intermediário, com 15 acertos e tempo médio de 33,9 segundos. Apesar de o conceito ter sido discutido tanto durante o experimento quanto nos *slides*, parte dos estudantes demonstrou dificuldade em articular a observação macroscópica da pilha com sua representação simbólica. Essa demanda implica em maior processamento de informações que a questão anterior, o que explica tanto o aumento do tempo quanto a dispersão dos erros.

A Q4 investigou a compreensão da etapa de redução na galvanização, apresentando domínio elevado (16 acertos) e tempo médio de 31,2 segundos. No entanto, a análise qualitativa mostra que entre os seis erros registrados, quatro estudantes escolheram a afirmação “É oxidado no ânodo, variando seu NOX de 0 para +2”, que é conceitualmente correta, porém responde a outra etapa do processo e não à solicitada. Esse padrão não indica uma lacuna estritamente conceitual, mas um problema de interpretação do comando, evidenciando que o desafio envolveu mais a seleção adequada da informação do que o entendimento do fenômeno químico em si.

O aumento consistente do tempo médio de resposta após a Q2, acompanhado de maior precisão, sugere maior esforço cognitivo, indicando que os estudantes passaram a mobilizar conceitos de forma mais deliberada, e não apenas a responder impulsivamente, como observado inicialmente. Esse movimento é coerente com a perspectiva de Ausubel (2003), para quem a aprendizagem não ocorre de forma imediata, mas por meio da

reorganização progressiva do conhecimento previamente adquirido, demandando tempo de processamento e disposição ativa para relacionar novos elementos conceituais a estruturas cognitivas já existentes. Nesse sentido, o maior tempo de resposta pode ser interpretado positivamente, não como dificuldade, mas como indicador de uma postura mais reflexiva diante da tarefa, condição necessária para a consolidação gradual dos conteúdos discutidos.

As duas questões seguintes (Q5 e Q6), por sua vez, marcaram uma mudança significativa no nível de dificuldade cognitiva demandada pelo bloco. A Q5 tratava da eletrólise ígnea do alumínio e apresentou domínio reduzido (10 acertos) com tempo médio de 39,4 segundos. Os erros concentraram-se principalmente em duas alternativas: (i) “O alumínio é oxidado, passando de NOX +3 para 0” (6 respostas), revelando inversão completa do conceito de oxidação; e (ii) “O carbono atua como agente oxidante e recebe elétrons” (4 respostas), que mistura definições corretas, porém aplicadas ao elemento errado. Erros relacionados ao impacto ambiental apareceram em menor frequência, totalizando duas respostas. Assim, as dificuldades principais foram de natureza conceitual, relacionadas ao entendimento do papel dos eletrodos e da variação correta de NOX no processo.

A Q6, sobre a bateria lítio-iodo, apresentou o mesmo domínio da Q5, porém com o maior tempo médio de resposta do bloco (50,8 segundos). Após a resposta correta, a alternativa mais marcada foi “O lítio é reduzido, pois seu potencial de redução é negativo”, com seis respostas. Embora valores negativos indiquem menor tendência à redução ($E^\circ(\text{Li}^+/\text{Li}) = -3,04 \text{ V}$), esses estudantes interpretaram o número negativo como indicativo de maior facilidade para ocorrer o processo, sem compará-lo ao potencial positivo do iodo ($E^\circ(\text{I}_2/2\text{I}^-) = +0,54 \text{ V}$). Assim, além da dificuldade conceitual, há um componente de interpretação matemática, que exige que o aluno faça uma leitura comparativa dos potenciais, o que nem sempre é intuitivo.

É importante destacar que essas duas questões foram intencionalmente elaboradas para extrapolar os sistemas diretamente observados nos experimentos e avaliar a capacidade dos alunos em transferir os princípios estudados para outros contextos. Desse modo, a dificuldade de transposição conceitual não deve ser interpretada apenas como falha individual dos estudantes, mas como reflexo da própria complexidade do campo de estudo.

A revisão sistemática de Goes, Nogueira e Fernandez (2020) evidencia que tópicos de oxirredução e eletroquímica apresentam obstáculos persistentes no ensino

médio, incluindo problemas na compreensão do fluxo de elétrons, diferenciação entre ânodo e cátodo, ponte salina, conservação de cargas e interpretação de potenciais-padrão. Esses desafios dialogam com características estruturais da química enquanto disciplina, que requer a articulação entre fenômenos observáveis (nível macroscópico), modelos teóricos (submicroscópico) e linguagens simbólicas de representação (Mortimer; Machado; Romanelli, 2000), o que reforça a compreensão de aprendizagem como processo reconstrutivo e não linear (Ausubel, 2003).

Encerrando o bloco de química, a Q7 apresentou o maior desempenho entre todas as questões desse conjunto, registrando 18 acertos. O objetivo da questão era verificar se os estudantes reconheciam a função do limão como ponte salina na pilha, julgando a afirmativa como verdadeira ou falsa. Ao estabelecer um paralelo com a Q1, observa-se um contraste importante: enquanto a primeira questão revelou impulsividade e domínio apenas intermediário, a Q7 mostrou respostas igualmente rápidas, porém fundamentadas em compreensão conceitual mais consistente – indício de que, ao longo do *quiz*, os estudantes ajustaram sua postura, passando a responder com maior atenção e precisão.

O segundo bloco do *quiz* (Q8 a Q12), dedicado às etapas do ciclo de vida dos *smartphones*, apresentou um padrão de desempenho nitidamente distinto do observado no bloco de química. Das cinco questões aplicadas, quatro exibiram níveis de domínio elevado ou muito elevado, todas com percentuais de acerto superiores aos encontrados em questões de nível equivalente no bloco anterior. Esse contraste está possivelmente relacionado à diferença na complexidade dos temas, uma vez que processos eletroquímicos e mecanismos de oxirredução exigem maior abstração e a apropriação de linguagem e simbolismo próprios da química.

Em contrapartida, conceitos associados ao ciclo de vida (como emissão de poluentes, fontes renováveis e não renováveis de energia e seus impactos ambientais) são discutidos em outras disciplinas escolares, como geografia e biologia, além de terem ganhado grande visibilidade na atualidade, impulsionada tanto pelo aumento dos eventos climáticos extremos quanto pela crescente preocupação pública com a sustentabilidade em escala global.

Entre as questões classificadas como elevadas (Q11 e Q12), observou-se desempenho consistente, com 19 acertos em ambas. Os tempos médios (24,0 segundos para Q11 e 9,7 segundos para Q12) indicam que os estudantes assimilaram as estratégias de redução de impactos discutidas nos *slides* finais e compreenderam seu papel enquanto consumidores, reconhecendo que decisões tomadas na fase de uso (como prolongamento

da vida útil, cuidado, manutenção e reuso) influenciam diretamente o fluxo de resíduos e reduzem a necessidade de extração e refino na fase de produção. Além disso, os resultados apontam para uma possível ampliação da compreensão dos alunos sobre a importância do descarte correto na fase final, elemento essencial para o retorno dos materiais ao ciclo produtivo e para a mitigação dos impactos ambientais associados às fases anteriores.

A Q10 constitui o único ponto de inflexão do bloco, apresentando o menor número de acertos de todo o *quiz*, com apenas quatro respostas corretas, e tempo médio de 23,6 segundos. Nesse caso, a dificuldade residiu na necessidade de estabelecer relações entre frequência e magnitude de consumo energético, além de reconhecer que a fonte de energia é o elemento determinante para avaliar impactos. A distribuição dos erros reforça isso: 11 estudantes superestimaram a fase de uso por associarem recargas ao cotidiano, enquanto 7 subestimaram a produção por ser pontual.

Esses resultados sugerem que os alunos ainda não diferenciam claramente as escalas de consumo envolvidas e, por isso, não reconheceram que, mesmo com inúmeras recargas ao longo da vida útil do aparelho, o impacto energético do uso permanece muito inferior ao da etapa de produção do *smartphone*, caracterizada por processos industriais intensivos em energia.

Esse tipo de percepção parcial já foi relatado na literatura. De Waard, Prins e Van Joolingen (2020) identificaram que estudantes tendem a privilegiar aspectos mais visíveis ou intuitivos de um produto, enquanto demonstram compreensão limitada das etapas produtivas e de seus impactos. Em estudo posterior, analisando a ACV do ácido polilático, os mesmos autores observaram que a compreensão dos estudantes torna-se mais ampla quando o ciclo é apresentado de maneira mais completa, permitindo que percebam que a sustentabilidade envolve múltiplas dimensões (De Waard; Prins; Van Joolingen, 2022).

À luz desses achados, o resultado da Q10 sugere que uma abordagem que contemple o ciclo de vida de *smartphones* de forma mais completa poderia favorecer uma visão mais integrada dos seus impactos. Assim, uma sequência didática distribuída ao longo de mais aulas, ou organizada em etapas aplicadas separadamente, permitiria retomar conexões entre produção, uso e fontes de energia de maneira mais estruturada, oferecendo condições mais favoráveis para que os alunos diferenciem escalas de impacto e reconheçam a importância da fase da produção nos indicadores ambientais.

A análise dos resultados também exige considerar tanto as potencialidades quanto os limites do método de avaliação adotado. O *Kahoot* mostrou-se uma ferramenta

eficiente para promover engajamento, dinamismo e participação dos discentes, além de permitir, em poucos minutos, um panorama amplo do desempenho da turma. No entanto, conforme já indicado na análise inicial das questões, alguns estudantes relataram ter marcado alternativas incorretas influenciados por fatores externos: a pressa para pontuar mais rapidamente, a associação automática às cores exibidas na tela e até mesmo a influência de colegas que verbalizavam respostas em voz alta durante o jogo.

Esse comportamento observado na turma encontra respaldo na literatura sobre o uso educacional do *Kahoot*. Wang e Tahir (2020) apontam que a plataforma, de fato, favorece o engajamento e torna as atividades avaliativas mais estimulantes, aumentando o interesse e a participação dos alunos. No entanto, os autores também identificam que a dinâmica competitiva e o foco na rapidez podem induzir respostas impulsivas ou escolhas baseadas em pistas visuais, e não em análise conceitual. De modo semelhante, Zhang e Yu (2021) destacam que sistemas gamificados⁷ combinam efeitos positivos, como motivação ampliada e maior envolvimento, com limitações relacionadas ao tempo reduzido para tomada de decisão e à tendência a priorizar pontuação, o que pode comprometer a precisão das respostas.

Esses elementos, inerentes à lógica competitiva da plataforma, introduzem um viés nos resultados e podem inflacionar ou reduzir os índices de acerto, produzindo erros que não necessariamente refletem lacunas de aprendizagem, mas sim a própria dinâmica lúdica do instrumento escolhido. Por esse motivo, os percentuais obtidos devem ser interpretados como indicadores gerais de tendências de compreensão, e não como medidas absolutas do domínio individual dos conteúdos avaliados.

Ainda assim, quando o desempenho no *quiz* é analisado em conjunto com o engajamento observado nos dois experimentos, o resultado global de 69% indica que a aplicação dos capítulos alcançou seu objetivo principal: articular os processos de oxirredução e os fenômenos eletroquímicos às etapas de produção e uso do ciclo de vida de *smartphones*, favorecendo a aprendizagem por meio da contextualização e da experimentação. Os dados mostram que conceitos diretamente associados às práticas experimentais foram melhor assimilados, ao passo que tópicos que exigiam graus maiores de abstração simbólica e transferência para novos sistemas demandam aprofundamentos adicionais.

⁷ Nesta dissertação, o *Kahoot* é considerado um jogo digital educacional por incorporar elementos típicos da gamificação, como pontuação, tempo cronometrado, ranqueamento e *feedback* imediato. Por essa razão, sua utilização aproxima-se das discussões apresentadas por Zhang e Yu (2021) sobre sistemas gamificados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo geral integrar a sustentabilidade e a economia circular ao ensino de química no ensino médio, tomando o ciclo de vida de *smartphones* como eixo articulador de uma proposta contextualizada e interdisciplinar. A motivação para o desenvolvimento deste trabalho está vinculada ao reconhecimento de que o percurso produtivo desses dispositivos envolve uma ampla presença da química – desde a extração e transformação de matérias-primas até a reciclagem desses dispositivos – o que constitui uma oportunidade significativa para que os estudantes se apropriem desses conhecimentos em diálogo com questões socioambientais.

Nesse sentido, o *e-book* “Ciclo de vida de *smartphones* como metodologia para o ensino de química” foi desenvolvido como uma ferramenta de apoio ao professor, com a finalidade de subsidiar práticas de mediação que articulem conceitos químicos a debates sobre impactos, demandas produtivas e escolhas de consumo, promovendo abordagens alinhadas à educação para a sustentabilidade.

A elaboração do recurso educacional envolveu, portanto, um processo cuidadoso de pesquisa, organização e sistematização, que exigiu a seleção criteriosa de informações, o estabelecimento de conexões didáticas e a construção de atividades alinhadas a diferentes dimensões da química. Compreende-se que esse percurso constituiu não apenas a produção de um material didático, mas também um processo formativo contínuo, favorecendo o desenvolvimento progressivo de competências de investigação, escrita acadêmica, curadoria de fontes, organização didática e tomada de decisões pedagógicas por parte da professora pesquisadora, especialmente diante da inexistência de materiais semelhantes que pudessem servir como referência.

A revisão bibliográfica indicou que, para o conjunto de palavras-chave adotado nesta pesquisa, não há registros de estudos que articulem o ensino de química à EC ou que utilizem o ciclo de vida de produtos, em particular, *smartphones*, como estrutura metodológica. Esse resultado ressalta o potencial de originalidade da proposta, ao mesmo tempo em que evidencia o desafio e a amplitude do trabalho envolvido na criação de um recurso educacional concebido integralmente para esse fim.

A avaliação do *e-book* foi realizada por meio de sua aplicação parcial, visto que as limitações impostas pela carga horária das turmas e pelas demandas curriculares em curso impossibilitaram a implementação integral dos seis capítulos. Dessa forma, foram trabalhados apenas os capítulos 1, 3, 5 e 6, enquanto os capítulos 2 e 4 permaneceram não

aplicados. O capítulo 1, por apresentar os fundamentos conceituais do ciclo de vida e da economia circular, foi utilizado de maneira transversal ao longo de todas as atividades desenvolvidas.

A aplicação conjunta dos capítulos 3 e 5 permitiu observar, por meio da integração entre experimentação, explicação conceitual e avaliação formativa, indícios consistentes de mobilização dos conteúdos trabalhados. O desempenho médio de 69% no *quiz* evidenciou boa compreensão dos itens diretamente relacionados às práticas experimentais e às discussões guiadas. Por outro lado, as maiores dificuldades concentraram-se nas questões que demandavam maior capacidade de análise, abstração simbólica e transferência conceitual para novos contextos.

Esses resultados, somados às limitações observadas no uso da plataforma *Kahoot* – especialmente quanto à influência da dinâmica competitiva sobre a precisão das respostas –, indicam a necessidade de aperfeiçoar tanto os instrumentos avaliativos quanto as estratégias didáticas. Em intervenções futuras, destaca-se a importância de ampliar práticas que promovam maior flexibilidade conceitual, incluindo retomadas que articulem de forma mais sistemática as representações macroscópicas, submicroscópicas e simbólicas da química.

No tocante a aplicação do capítulo 6, a elaboração dos cartazes e a argumentação oral demonstraram a capacidade dos estudantes de selecionar informações, sistematizar ideias e construir posicionamentos fundamentados sobre impactos e responsabilidades associados à etapa final do ciclo de vida de *smartphones*. No entanto, essa etapa também revelou a necessidade de reformulação dos temas inicialmente propostos, uma vez que apresentavam sobreposições conceituais e predominância de aspectos ambientais em detrimento do conteúdo químico de separação de misturas. Essa constatação levou à reorganização dos temas e à construção de uma proposta mais equilibrada e passível de ser avaliada em estudos futuros.

Desse modo, os resultados obtidos demonstram o potencial formativo do *e-book*, demonstrando sua capacidade de favorecer práticas docentes mais integradas, contextualizadas e sensíveis às demandas socioambientais que permeiam o ciclo de vida de *smartphones*. As limitações enfrentadas ao longo da aplicação, longe de fragilizar o estudo, apontam a relevância de sua aplicação integral em investigações futuras, considerando que os capítulos não trabalhados podem ampliar os efeitos formativos observados. Além disso, o caráter modular do recurso permite que ele seja adaptado e

reconfigurado conforme diferentes objetivos pedagógicos, níveis de ensino e objetos de estudo, fortalecendo o uso da análise de ciclos de vida como estratégia didática.

Conclui-se que o percurso investigativo desenvolvido nesta dissertação e o recurso educacional produzido se consolidam como contribuições relevantes para o ensino de química, favorecendo a contextualização dos conteúdos da disciplina em diálogo com outras áreas do conhecimento. Ao disponibilizar aos professores uma proposta que articula conceitos químicos a atividades experimentais, atividades colaborativas e recursos complementares, o presente trabalho amplia as possibilidades de mediação pedagógica e enriquece o repertório didático disponível para a educação básica, contribuindo tanto para o letramento científico dos estudantes quanto para a promoção de práticas educativas comprometidas com a educação para o desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, F. A.; SAMPAIO, A. C. F. Os novos princípios e conceitos inovadores da Economia Circular. **Entorno geográfico**, n. 15, p. 82-102, 2018.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:2009 — Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044:2009 — Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.
- ACEVEDO-DÍAZ, J. A. Reflexiones sobre las finalidades de la enseñanza de las ciencias: educación científica para la ciudadanía. **Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias**, v. 1, n. 1, p. 3-16, 2004.
- AIKENHEAD, G. S. Research into STS science education. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 9, n. 1, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/4005>. Acesso em: 2 de outubro de 2025.
- AIKENHEAD, G. S. **Science education for everyday life: Evidence-based practice**. Teachers College Press, 2006. 192 p.
- ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. **Green Chemistry: theory and practice**. Oxford: University Press, 1998.
- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 968, de 7 de novembro de 2024**. Estabelece as especificações dos óleos diesel destinados a veículos ou equipamentos dotados de motores do ciclo Diesel e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam o produto em território nacional. Brasília, 2024. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-968-2024-estabelece-as-especificacoes-dos-oleos-diesel-destinados-a-veiculos-ou-equipamentos-dotados-de-motores-do-ciclo-diesel-e-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-comercializam-o-produto-em-territorio-nacional>. Acesso em: 30 de agosto de 2025.
- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biodiesel**. 2025a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em: 30 de agosto de 2025.
- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Decisão de Diretoria nº 462/2025, de 24 de julho de 2025**. Revisão da Resolução ANP nº 807/2020 da especificação da gasolina para adequação ao percentual obrigatório de etanol anidro (E30). Brasília, 2025b. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/decisao-de-diretoria-n-462-2025-revisao-da-resolucao-anp-no-807-de-23-de-janeiro-de-2020-da-especificacao-da-gasolina>. Acesso em: 29 de outubro de 2025.
- APEL, C. et al. Safe-and-sustainable-by-design: State of the art approaches and lessons learned from value chain perspectives. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 45, 100876, 2024.
- APPLE. **iPhone 14 Pro Product Environmental Report**. 2022. Disponível em: https://www.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iPhone_14_Pro_PER_Sept2022.pdf. Acesso em: 04 de dezembro de 2025.
- AQUINO, J. G.; OLIVEIRA, L. M. S. R.; CUNHA FILHO, M. Aspectos socioeconômicos do descarte de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos de uso doméstico. **A educação ambiental em uma perspectiva interdisciplinar**, Editora Científica Digital, 2020. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/200901305>. Acesso em: 25 de maio de 2025.
- ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.
- AUSUBEL, D. P. **The acquisition and retention of knowledge: A cognitive view**. Dordrecht: Springer, 2003.
- BALDÉ, C. P. et al. **The Global E-waste Monitor 2024**. 2024. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>. Acesso em: 11 de maio de 2025.
- BARBOSA, A. F. M. **Metais pesados no lixo urbano: uma sequência didática nos moldes da atividade experimental problematizada (AEP)**. 1. ed. Vila Velha: Instituto Federal do Espírito Santo, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2022. 64p. ISBN 978-85-8263-618-3.

BARDIN, L. Análise de conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2011, 229p.

BELLINI, E. M.; MARQUES, R.; XAVIER, C. R. Um estudo sobre a análise do ciclo de vida de pilhas e a sustentabilidade ambiental. **Contemporânea – Revista de Ética e Filosofia Política**, v. 2, n. 5, 2022.

BENDER, D.; ZOCH, A. N. **A avaliação do ciclo devida (acv) do jeans como proposta para abordagem de ciências no 9º ano**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática), Rio Grande do Sul: Universidade de Passo Fundo, 2021. Disponível em: <https://repositorio.upf.br/items/b05813d5-55ed-41bc-b106-d5944bc7311e>. Acesso em: 27 de setembro de 2025.

BLAIR, K.; BANES, L.; LEE, M. Fostering noticing of classroom discussion features through analysis of contrasting cases. **Instructional Science**, v. 52, p. 417-452, 2024.

BOCCHI, N.; BIAGGIO, S. R.; ROCHA-FILHO, R. C. Prêmio Nobel de Química de 2019: láurea pelo desenvolvimento das baterias de íons lítio. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 41, n. 4, p. 320–326, nov. 2019. Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc41_4/03-AQ-76-19.pdf. Acesso em: 12 de junho de 2024.

BOFF, L. **Sustentabilidade: O que é – O que não é**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2012.

BOOKHAGEN, B. et al. Metallic resources in smartphones. **Resources Policy**, v. 68, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101750>. Acesso em: 02 de junho de 2024.

BRADY, J.E.; HUMISTON, G. E. **Química geral**, v. 1, 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1986.

BRASIL. **COP30 Brasil Amazonia**. 2025. Disponível em: <https://cop30.br/pt-br>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2026.

BRASIL. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020**. R Regulamenta o inciso VI do **caput** do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2020a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm. Acesso em: 04 de maio de 2024.

BRASIL. **Decreto nº 10.388, de 5 de junho de 2020**. Regulamenta o § 1º do **caput** do art. 33 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e institui o sistema de logística reversa de medicamentos domiciliares vencidos ou em desuso, de uso humano, industrializados e manipulados, e de suas embalagens após o descarte pelos consumidores. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2020b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10388.htm. Acesso em: 04 de maio de 2024.

BRASIL. **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2022a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm. Acesso em: 04 de maio de 2024.

BRASIL. **Decreto nº 11.300, de 21 de dezembro de 2022**. Regulamenta o § 2º do art. 32 e o § 1º do art. 33 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e institui o sistema de logística reversa de embalagens de vidro. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2022b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11300.htm. Acesso em: 04 de maio de 2024.

BRASIL. **Decreto nº 12.688, de 21 de outubro de 2025**. Regulamenta o art. 32, § 1º, e o art. 33, § 1º, da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e institui o sistema de logística reversa de embalagens de plástico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2025. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20232026/2025/decreto/D12688.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2012.688%2C%20DE%2021,reversa%20de%20embalagens%20de%20pl%C3%A1stico. Acesso em: 23 de novembro de 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.305, 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. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 04 de maio de 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024**. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao

Biometano [...]. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/114993.htm. Acesso em: 30 de agosto de 2025.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Social. **Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Brasília, 2016. Disponível em: https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/brasil_amigo_pesso_idosa/agenda2030.pdf. Acesso em: 16 de abril de 2024.

BRASIL. Secretaria de Relações Institucionais. **Brasil cumpriu sete dos oito objetivos de desenvolvimento do milênio**. Disponível em: <https://www.gov.br/sri/pt-br/backup-secretaria-de-governo/portalfederativo/arquivos-privados/noticias/internacionais/brasil-cumpriu-sete-dos-oito-objetivos-de-desenvolvimento-do-milenio>. Acesso em: 23 de novembro de 2025.

BRASIL. Subsecretaria de Edições Técnicas. **Protocolo de Quioto e legislação correlata**. Brasília: Subsecretaria de Edições Técnicas do Senado Federal, v. 3 (Coleção Ambiental), 2004.

BROWN, T. L.; LEMAY, H.; BURSTEN, B. E. **Química: a ciência central**. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRIS CONVENTIONS. SECRETARIAT OF THE BASEL, ROTTERDAM AND STOCKHOLM CONVENTIONS. **Waste or Wealth? – Keeping in Touch Need Not Cost the Earth**. Nairobi: UNEP, 2015. Disponível em: <https://www.brsmeas.org/Resources/Shared/scripts/appPubKit/docs/04bBaselConvention-WasteOrWealth.English.pdf>. Acesso em: 11 de maio de 2025.

BRUNNING, A. The chemical elements of a smartphone. **Compound Interest**, 2014. Disponível em: <https://www.compoundchem.com/2014/02/19/the-chemical-elements-of-a-smartphone/>. Acesso em: 02 de junho de 2024.

BUCKLER, C.; CREECH, H. **Shaping the future we want: UN Decade of Education for Sustainable Development; final report**. Unesco, 2014. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000230171>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2016.

BUENO, A. B.; MORAES, C. A. M. **Importação e exportação de resíduos sólidos urbanos (RSU) e industriais (RSI) no Brasil**. Instituto ATMOS, São Leopoldo, 2023. Disponível em: https://institutoatmos.org/wp-content/uploads/2024/08/Relatorio_Gaia_Importacao_Exportacao_Residuos_Mar_2023.doc.pdf. Acesso em: 18 de junho de 2025.

BURMEISTER, M.; RAUCH, F.; EILKS, I. Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 13, n. 2, p. 59-68, 2012.

CAMPANER, V. P.; LUIZ-SILVA, W. Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil. **Química Nova**, v. 32, p. 146-152, 2009.

CARVALHO, A. O. P. **Avaliação da prática docente como contributo à melhoria profissional: o desafio de avaliar quem sempre avalia**. 2019. 317f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-graduação em Educação, Fortaleza (CE), 2019.

CHASSOT, A. **Alfabetização científica: questões e desafios para a educação**. 8. ed. Ijuí: Unijuí, 2018. 360p.

CMMAD. COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso Futuro Comum**, 2. ed., Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

CNDH. CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS. **Relatório sobre o rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o Vale do Rio Doce**. Brasília, 2017.

CNT. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Diesel Verde**. 2024. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/e849b8df-fa16-4959-a119-2130d76fc7ad>. Acesso em: 30 de agosto de 2025.

CONSTANTINO, M. G. **Química Orgânica: curso básico universitário**. Volume 1, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CONSTANTINO, V. R. L. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**, v. 25, p. 490-498, 2002.

CURI, A. **Lavra de minas**. Oficina de Textos, 2017.

DA SILVA JR, G. D. **Lixo, resíduo ou rejeito? Reflexões sobre a aprendizagem significativa no ensino médio**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2022.

DE FREITAS, A. L. C.; FREITAS, L. A. A. A educação problematizadora em Paulo Freire: Desafios para a sociedade contemporânea. **Revista on Line De Política E Gestão Educacional**, v. 26, n. 00, 2022.

- DE LIMA, I. J. et al. A experimentação no ensino de química: análise de uma proposta de sequência didática para o ensino do conteúdo de metais pesados. **Sustentabilidade, Meio Ambiente e Responsabilidade Social**, v. 8, Belo Horizonte: Poisson, 2025. DOI: 10.36229/978-65-5866-536-6.CAP.05.
- DE OLIVEIRA, M. C. C. **Sequência didática investigativa para o ensino de eletroquímica abordando o descarte de pilhas e baterias**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2020.
- DE SOUZA, C. C. O. **Experimentos de química verde numa abordagem CTS no ensino médio: ferramenta de construção de aprendizagens e promoção de desenvolvimento sustentável**. Paraná: Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2020.
- DE WAARD, E. F.; PRINS, G. T.; VAN JOOLINGEN, W. R. Engaging Preuniversity Students in Sustainability and Life Cycle Assessment in Upper-Secondary Chemistry Education: The Case of Polylactic Acid (PLA). **Journal of Chemical Education**, v. 99, n. 8, p. 2991-2998, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.2c00374>. Acesso em: 11 de abril de 2023.
- DE WAARD, E. F.; PRINS, G. T.; VAN JOOLINGEN, W. R. Pre-university students' perceptions about the life cycle of bioplastics and fossil-based plastics. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 21, p. 908-921, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C9RP00293F>. Acesso em: 11 de abril de 2023.
- DIAS, P. et al. Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic. **Cleaner Waste Systems**, v. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100022>. Acesso em: 11 de maio de 2025.
- DIAS, P. et al. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 7–16, 2018.
- DOS SANTOS, A. T. **EDUCOMUNICAÇÃO AMBIENTAL: sequências didáticas sobre aprendizagem de química em uma perspectiva transdisciplinar**. 1. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2021.
- DOS SANTOS, W. L. P. Contextualização no ensino de ciências por meio de temas CTS em uma perspectiva crítica. **Ciência & Ensino**, vol. 1, número especial, 2007.
- EATON, A. C.; DELANEY, S.; SCHULTZ, M. Situating sustainable development within secondary chemistry education via systems thinking: A depth study approach. **Journal of Chemical Education**, v. 96, n. 12, p. 2968-2974, 2019.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese – Balanço Energético Nacional 2025 (ano base 2024)**. Rio de Janeiro, 2025.
- ERCAN, M. et al. Life Cycle Assessment of a Smartphone. **4th International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S 2016)**. Atlantis Press, 2016. p. 124-133. DOI:10.2991/ict4s-16.2016.15.
- EUCHEMS. EUROPEAN CHEMICAL SOCIETY. **EuChemS Periodic Table – Element Scarcity**, 2. ed., Bruxelas, 2023. Disponível em: <https://www.euchems.eu/euchems-periodic-table/>. Acesso em: 25 de maio de 2025.
- FALCI, P. A. **Repensando práticas em educação ambiental: proposta de uma sequência didática**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2019.
- FEDERIZZI, T.; BOCARDI, J. M. B.; COSTA JUNIOR, I. L. **Química verde, sustentabilidade e educação ambiental: uma sequência didática para o tema eletroquímica no ensino técnico subsequente**. Medianeira: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2023.
- FGV. FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Brasil tem mais dispositivos digitais em uso do que habitantes, revela pesquisa da FGV**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://portal.fgv.br/noticias/brasil-tem-mais-dispositivos-digitais-em-uso-do-que-habitantes-revela-pesquisa-da-fgv>. Acesso em: 23 de outubro de 2025.
- FIDELIS, L. F. S. **Sequência didática: mineração**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2020. Série: Química em Rede, nº 002.
- FORTI, V. O crescimento do lixo eletrônico e suas implicações globais. **Panorama setorial da Internet**, n. 4, p. 1-20, 2019.

- FREITAS, S. O.; COSTA, C. R.; MAIA, P. I. S. **Material de apoio:** uma proposta de sequência didática para a abordagem do tema metais no ensino médio. Uberaba: Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2019. Série: Química em Rede, nº 002.
- FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR. **Completando a figura:** como a economia circular ajuda a enfrentar as mudanças climáticas. 2019. Disponível em: www.ellenmacarthurfoundation.org/publications. Acesso em: 20 de maio 2025.
- FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR. **Towards the Circular Economy:** Economic and business rationale for an accelerated transition. 2013.
- GEORGITZIKIS, K. et al. **Sustainability aspects of Bauxite and Aluminium.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. ISBN 978-92-76-40039-4. DOI: 10.2760/702356.
- GOES, L. F.; NOGUEIRA, K. S. C.; FERNANDEZ, C. Limitations of teaching and learning redox: A systematic review. **Problems of Education in the 21st Century**, v. 78, n. 5, p. 698–718, 2020.
- GONÇALVES, R. P. N.; GOI, M. E. J. Experimentação como proposta metodológica para o ensino de química na educação básica. **EducArMais**, v. 6, p. 687-703, 2022.
- GRANT, K. et al. E. Health consequences of exposure to e-waste: a systematic review. **The Lancet Global Health**, v. 1, n. 6, p. e350-e361, 2013. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70101-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70101-3). Acesso em: 26 de outubro de 2024.
- GREENHOUSE GAS PROTOCOL. **IPCC global warming potential values.** 2024. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-PotentialValues%20%28August%202024%29.pdf>. Acesso em: 04 de dezembro de 2025.
- GUARIEIRO, L. L. N. et al. Reaching Circular Economy through Circular Chemistry: The Basis for Sustainable Development. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 33, p. 1353-1374, 2022.
- GUVENTIK, M. **De Smartphone a Futurephone:** Assessing the Environmental Impacts of Different Circular Economy Scenarios of a Smartphone Using LCA. Master Thesis. Delft University of Technology and Leiden University, 2014.
- HASANBEIGI, A.; SPRINGER, C.; SHI, D. **Aluminum climate impact:** an international benchmarking of energy and CO₂ intensities. 2022. Disponível em: <https://www.bluegreenalliance.org/wp-content/uploads/2021/04/Aluminumreportdesign-FinalFeb2022.pdf>. Acesso em: 29 de outubro de 2025.
- HICKEL, J.; KALLIS, G. Is green growth possible? **New political economy**, v. 25, n. 4, p. 469-486, 2020.
- HOFFMANN, J. **Avaliação Mediadora:** uma prática em construção da pré-escola à universidade. 17ª ed. Porto Alegre: Mediação, 2000.
- HWANG, J. Y.; MYUNG, S. T.; SUN, Y. K. Sodium-ion batteries: present and future. **Chemical Society Reviews**, v. 46, n. 12, p. 3529-3614, 2017.
- IARC. INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **Agents classified by the IARC Monographs, Volumes 1–139.** Lyon: IARC, 2025. Disponível em: <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>. Acesso em: 8 de agosto de 2024.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais e Coordenação de Geografia, n. 10, 2015. 352p. ISSN 1517-1450.
- IBICIT. INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Pensamento do ciclo de vida:** negócios conscientes à caminho da sustentabilidade. Cuiabá, MT: Sebrae, 2017.
- INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Primary aluminium smelting energy intensity.** 2024. Disponível em: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-energy-intensity/>. Acesso em: 19 de agosto de 2025.
- IPCC. INTERNATIONAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023:** Synthesis Report. Geneva, 2023.
- JOSE, S. A. et al. Solid-State Lithium Batteries: Advances, Challenges, and Future Perspectives. **Batteries**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/batteries11030090>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2026.
- JOWITT, S. M. et al. Recycling of the rare earth elements. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 1-7, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452223617301256?via%3Dihub>. Acesso em: 02 de junho de 2024.

- KAMBEROVIĆ, Ž. et al. Hydrometallurgical process for selective metals recovery from waste-printed circuit boards. **Metals**, v. 8, n. 6, p. 1–19, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/6/441>. Acesso em: 11 de maio de 2025.
- KEIJER, T.; BAKKER, V.; SLOOTWEG, J. C. Circular chemistry to enable a circular economy. **Nature Chemistry**, v. 11, p. 190–195, 2019.
- KOTZÉ, L.; J.; ADELMAN, S. Environmental law and the unsustainability of sustainable development: a tale of disenchantment and of hope. **Law and Critique**, v. 34, p. 227–248, 2023.
- KRUSE, B. C.; CUNHA, L. A. G. Reflexões críticas acerca do desenvolvimento (in) sustentável. **Revista IDEAS**, v. 16, p. 1–24, 2022. ISSN 1984-9834
- KUMAR, A.; HOLUSZKO, M.; ESPINOSA, D. C. R. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 32–42, 2017.
- LAMB, R. K. **Elementos terras raras, lixo doméstico e água potável: propostas para o ensino de Química no Novo Ensino Médio**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2021.
- MANCINI, L. et al. Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, p. 100–116, 2015. DOI 10.1007/s11367-014-0808-0.
- MARTIM, H. C.; DOS SANTOS, V. M. L. Avaliação de impactos ambientais em mineradoras de cobre utilizando redes de interação. **Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental**, v. 17, n. 17, p. 3246–3257, 2014.
- MARTINS, M. C. **Proposta de sequência didática para o ensino de educação ambiental com enfoque do descarte de resíduos sólidos eletrônicos através da eletroquímica**. Volta Redonda: Universidade Federal Fluminense, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2020.
- MATLIN, S. A. et al. Chemistry must respond to the crisis of transgression of planetary boundaries. **Chemical Science**, v. 13, p. 11710–11720, 2022.
- MICROCHEMICALS. **Silicon ingot production process for wafers**. Copyright 2025. Basics of Microstructuring. Disponível em: <https://www.microchemicals.com/DOWNLOADS/Application-Notes/>. Acesso em: 19 de agosto de 2025.
- MIGUIRE, G. **China cuts electricity emissions to record lows in 2025**. Reuter, Colorado, 2025. Disponível em: https://www.reuters.com/markets/commodities/china-cuts-electricity-emissions-record-lows-2025-2025-07-16/?utm_source. Acesso em: 13 de agosto de 2025.
- MIR, S.; DHAWAN, N. A comprehensive review on the recycling of discarded printed circuit boards for resource recovery. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 178, 2022.
- MORAES, P. H. S. **Smartphones e ensino de história: ferramenta pedagógica ou elemento de distração?** 2017. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de História, Universidade Federal do Tocantins, Araguaína, 2017.
- MORAN, J. M. Tecnologias digitais para uma aprendizagem ativa e inovadora. 2017. Atualização do capítulo 4 de: MORAN, José Manuel. **A educação que desejamos: novos desafios e como chegar lá**. 5 ed. Campinas, SP: Papyrus, 2012. Disponível em: https://moran.eca.usp.br/wpcontent/uploads/2017/11/tecnologias_moran.pdf. Acesso em: 27 de setembro de 2025.
- MOREIRA JÚNIOR, S. S.; CALLEGARIO, L. J. **Consumismo e o descarte de aparelhos celulares: organização de um clube de ciências online visando a alfabetização científica**. VILA VELHA: Instituto Federal do Espírito Santo, 2020. Série: Ensino de Química, nº 005. ISBN: 978-65-86361-77-3.
- MORTIMER, E. F.; MACHADO, A. H.; ROMANELLI, L. I. A Proposta Curricular de Química do Estado de Minas Gerais: Fundamentos e Pressupostos. **Química Nova**, v. 23, n. 2, p. 273–283, 2000.
- MORTIMER, E. F.; SCOTT, P. H. **Meaning making in secondary science classrooms**. London: Open University Press, 2003.
- MU, J. et al. Eletrólitos poliméricos de estado sólido em baterias de lítio: progressos recentes e perspectivas. **Polymer Chemistry**, v. 15, n. 6, p. 473–499, 2024. DOI: 10.1039/D3PY01311A.
- OHAJINWA, C. et al. Health risks of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and metals at informal electronic waste recycling sites. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 6, p. 906, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph16060906>. Acesso em: 26 de outubro de 2024.

OKE, E. A.; POTGIETER, H. Discarded e-waste/printed circuit boards: a review of their recent methods of disassembly, sorting and environmental implications. **Environmental Science and Pollution Research**, 2024.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 21**. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/outcomedocuments/agenda21>. Acesso em: 16 de abril de 2024.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Como as Nações Unidas apoiam os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 23 de novembro de 2025.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima. **Adoção do Acordo de Paris**. Paris, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2024.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração do Milênio**. Nova Iorque, 2000. Disponível em: <https://www.undp.org/pt/brazil/publications/declaracao-do-milenio>. Acesso em: 16 de abril de 2024.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Preparation of the World Summit on Sustainable Development ("Rio [plus] 10"), Johannesburg, June 2002: follow-up to Agenda 21, chapters 19, 20 and 21: report of the Secretary-General on the management of toxic chemicals and hazardous and radioactive wastes: note / by the Secretariat**. Genebra, 2001. 10p. Disponível em: https://digitallibrary.un.org/record/441585?utm_source=&v=pdf. Acesso em: 15 de abril de 2024.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Report of the United Nations Conference on the Human Environment**. 1972. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>. Acesso em: 15 de abril de 2024.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **The future we want**. Rio de Janeiro, Brazil, 2012. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/educacaoambiental/images/stories/biblioteca/rio_20/the-future-we-want.pdf. Acesso em: 16 de abril de 2024.

PASCOIN, A. F.; CARVALHO, J. W. P. Objeto digital de aprendizagem como proposta pedagógica para o ensino de Química. **Revista Eletrônica Científica Ensino Interdisciplinar**, Mossoró, v. 6, n. 11, p. 438-452, 2020. Disponível em: <https://periodicos.apps.uern.br/index.php/RECEI/article/view/2293>. Acesso em: 27 de setembro de 2025.

PEREIRA, C. C.; PICANÇO, J. L. Caracterização geotécnica e geoquímica dos rejeitos da barragem da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), em decorrência do desastre de 25/01/2019. In: XXVIII CONGRESSO {VIRTUAL} DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 2020, Campinas. Anais eletrônicos. Campinas: UNICAMP, 2020. Disponível em: <<https://prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2020P17419A28108O492.pdf>>. Acesso em: 04 de dezembro de 2025.

PEREIRA, J. G. N.; SAMPAIO, C. G. A experimentação no ensino de química durante a educação básica no Brasil: reflexões de uma revisão da literatura. **REDEQUIM – revista debates de ensino de química**, v. 8, p. 319-337, 2022.

PRABHANSU; KUMAR, N. **Emerging trends in energy storage systems and industrial applications**. London: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2023.

PRAUCHNER, M. J. et al. Combustíveis derivados do petróleo: obtenção, propriedades e usos. **Revista Virtual de Química**, v. 15, n. 1, p. 43-60, 2023. Disponível em: <https://rvqsub.sbgq.org.br/index.php/rvq/article/view/4369/1016>. Acesso em: 30 de agosto de 2025.

RIECKMANN, M. **Education for sustainable development goals: Learning objectives**. UNESCO, 2017.

RODRIGUES, C. A. **Teoria, prática e estudos in loco: uma sequência didática em Química envolvendo questões ambientais no Ensino Médio**. Ilhéus: Universidade Estadual de Santa Cruz, Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2019.

ROHRIG, B. Smartphones: smart chemistry. **ChemMatters**, Washington, DC: American Chemical Society, 2015. Disponível em: <https://www.acs.org/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2014-2015.html>. Acesso em: 02 de junho de 2024.

RUBERTI, M. The chip manufacturing industry: Environmental impacts and eco-efficiency analysis. **Science of The Total Environment**, v. 858, parte 2, 159873, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972206973X>. Acesso em: 04 de dezembro de 2025.

- SAMSUNG. **Galaxy S24 Ultra Product Environmental Report**. 2024. Disponível em: https://www.samsung.com/global/sustainability/media/pdf/Galaxy_S24_Ultra_Environmental_Report_EN.pdf. Acesso em: 04 de dezembro de 2025.
- SANDERSON, V. M. **O brilho da química: cartilha para aplicação de uma sequência didática para ensino de química inorgânica com mineralogia temática**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2023.
- SANTOS, W. L. P. Educação científica na perspectiva de letramento como prática social: funções, princípios e desafios. **Revista brasileira de educação**, v. 12, n. 36, p. 474-492, 2007.
- SASSERON, L. H.; DE CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em ensino de ciências**, v. 16, n. 1, p. 59-77, 2011.
- SCHNETZLER, R. P. Concepções de Docência em 50 anos de Educação Química Brasileira. **Revista da Sociedade Brasileira de Ensino de Química**, v. 5, n. 01, p. e052408-e052408, 2024.
- SCHROEDER, P.; ANGGRAENI, K.; WEBER, U. The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 77-95, 2019.
- SHRIVER, D.; ATKINS, P. **Química inorgânica**. 4. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2008.
- SJÖSTRÖM, J.; EILKS, I. Reconsidering different visions of scientific literacy and science education based on the concept of Bildung. In: **Cognition, metacognition, and culture in STEM education: Learning, teaching and assessment**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 65-88.
- SLOOTWEG, J. C. Sustainable chemistry: green, circular, and safe-by-design. **One Earth**, v. 7, n. 5, p. 754-758, 2024.
- SOLOMONS, T. W. G.; FRYHLE, C. B.; SNYDER, S. A. **Química Orgânica**. v. 1, 13. ed., LTC: Rio de Janeiro, 2024.
- SOUZA, T. A. **(Re)Elaborações de concepções sobre docência, experimentação e ciência na formação inicial de professores de química**. Tese (Doutorado em Educação), São Paulo: Universidade Metodista de Piracicaba, 2018.
- SPERANDIO, G. H. **Uma proposta de ensino de eletrólise por experimentação com uso de resíduo eletroeletrônico**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional, 2019.
- SSC. SECRETARIAT OF THE STOCKHOLM CONVENTION. **Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs)**. Geneva: United Nations Environment Programme (UNEP), 2023. Disponível em: <https://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?e=UNEP-POPS-COP-CONVTEXT-2023.English.pdf>. Acesso em: 19 de agosto de 2025.
- STRIEDER, R.; KAWAMURA, M. R. D. Educação CTS: parâmetros e propósitos brasileiros. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 1, p. 27-56, 2017.
- SUCKLING, J., LEE, J. Redefining scope: the true environmental impact of smartphones? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 8, p. 1181-1196, 2015.
- TARDIF, M. **Saberes docentes e formação profissional**. 17 ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2014.
- TUKKER, A. Product services for a resource-efficient and circular economy—a review. **Journal of cleaner production**, v. 97, p. 76-91, 2015.
- UNCTAD. UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. **Digital Economy Report 2024: Shaping an environmentally sustainable and inclusive digital future**. Geneva, 2024. Disponível em: https://unctad.org/system/files/official-document/der2024_en.pdf. Acesso em: 19 de agosto de 2025.
- UNEP. United Nations Environment Programme. **Can the Democratic Republic of the Congo's mineral resources provide a pathway to peace?** Nairobi, 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/can-democratic-republic-congos-mineral-resources-provide-pathway-peace>. Acesso em: 7 de junho de 2024.
- UNESCO. **Educação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Unesco, 2017.
- UNFCCC. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **First global stocktake**. 2023. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_L17_adv.pdf. Acesso em: 23 de novembro de 2025.

UNFCCC. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its third session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021**. 2022. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/617444>. Acesso em: 23 de novembro de 2025.

UNFCCC. UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **UN Climate Change Conference - Belém**. 2025. Disponível em: <https://unfccc.int/cop30#sessions>. Acesso em: 20 de março de 2026.

USGS. U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2025**. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, versão 1.2, 2025. 212 p.

VIBRA ENERGIA. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ) – Óleo Diesel Marítimo**. Nº FISPQ BR0106, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://vibraenergia.com.br/sites/default/files/pdfs/fispq-oleodiesel-maritimo-a.pdf>. Acesso em: 29 de outubro de 2025.

VILELA, M.; MORAES, C.; PAIVA, J. C. Inquiry-based science education in high chemistry: Enhancing oral and written communication skills through authentic and problem-based learning activities. **Education Sciences**, v. 15, n. 3, 2025.

WANG, A. I.; TAHIR, R. The effect of using Kahoot! for learning – A literature review. **Computers & Education**, v. 149, 2020.

WILSON, D. et al. Impact of bauxite mining on vegetation health in Jamaica: NDVI and aerosol optical depth analysis using remote sensing. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 140, 2025.

XERRI, B. Neoextrativismo no triângulo do lítio, alterações ambientais e lutas comunitárias. **Paradigma**, v. 46, n. 1, 2025.

YU, H. et al. Activation and Stabilization Strategies of Aluminum Metal Anode Toward High Performance Aqueous Al Metal Batteries. **Advanced Materials**, v. 37, n. 38, 2025.

YUAN, X. et al. Product quality research in the industrialized preparation of electronic grade polysilicon: a review of impurity sources and control strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 214, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032125002424>. Acesso em: 18 de agosto de 2025.

ZABALA, A. **A prática educativa: como ensinar**. Porto Alegre: Penso, 2015.

ZHANG, Q.; YU, Z. A literature review on the influence of Kahoot! on learning outcomes, interaction, and collaboration. **Education and Information Technologies**, v. 26, p. 4507–4535, 2021.

APÊNDICE A – CÁLCULO DO CONSUMO ANUAL ESTIMADO DE ENERGIA POR *SMARTPHONE*

Este apêndice descreve o procedimento adotado para estimar a energia consumida por *smartphones* em uma carga completa e ao longo de um ano, com base em Knigth (2009). Os valores obtidos por meio desse cálculo estão apresentados no Quadro 4 (p. 40), incluído na etapa referente ao uso no ciclo de vida desses aparelhos.

1º Passo: Conversão da capacidade da bateria

As baterias de smartphones têm sua capacidade expressa em miliampère-hora (mAh), unidade de carga elétrica relacionada à quantidade total de corrente que a bateria pode fornecer durante um intervalo de tempo. Entretanto, as equações empregadas no cálculo da energia utilizam a unidade ampère-hora (Ah). Assim, torna-se necessária a conversão:

$$1 \text{ Ah} = 1000 \text{ mAh}$$

$$q(\text{Ah}) = \frac{q(\text{mAh})}{1000}$$

$$\text{Para o iPhone 16: } q = \frac{3561}{1000} = 3,561 \text{ Ah}$$

Para o Galaxy S24:

$$q = \frac{4000}{1000} = 4,0 \text{ Ah}$$

2º Passo: Cálculo da energia em watt-hora (Wh)

Considerando que as baterias de íons de lítio utilizadas em *smartphones* operam, em média, com 3,7 V, a relação utilizada para calcular a energia elétrica armazenada na bateria é dada por:

$$E = q \times V$$

Onde:

E = energia potencial elétrica (Wh)

q = carga elétrica ou capacidade da bateria (Ah)

V = tensão elétrica (V)

Para o iPhone 16:

$$E = 3,561 \times 3,7 \cong 13,2 \text{ Wh}$$

Para o Galaxy S24:

$$E = 4,0 \times 3,7 = 14,8 \text{ Wh}$$

3º Passo: Converter a energia para kWh

Para converter Wh para kWh, divide-se o valor por 1000. Assim, para o iPhone obtêm-se 0,0132 kWh, enquanto para o Galaxy S24 obtêm-se 0,0148 kWh.

4º Passo: Estimativa do consumo anual de energia

Assumindo que o usuário realiza apenas uma carga completa por dia, calcula-se o consumo anual multiplicando a energia por carga pelo número de dias do ano.

Para o iPhone:

$$E = 0,0132 \times 365 \cong 4,82 \text{ kWh/ano}$$

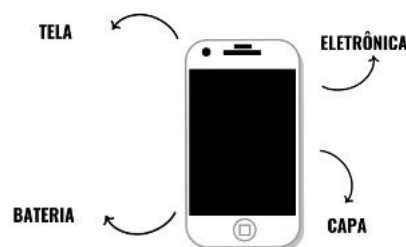
Para o Galaxy S24:

$$E = 0,0148 \times 365 \cong 5,40 \text{ kWh/ano}$$

Referência bibliográfica:

KNIGHT, R. D. **Física:** uma abordagem estratégica. v 2. Bookman Editora, 2009.

APÊNDICE B – *SLIDES* UTILIZADOS NA APLICAÇÃO DO CAPÍTULO 6



E como funciona a reciclagem do lixo eletrônico?



COLETA:

A reciclagem de lixo eletrônico começa com a coleta em postos específicos, como mercados, centros comerciais e revendedores. Nesses locais, a população pode entregar seus produtos sem uso, que podem variar desde pequenos dispositivos até eletrodomésticos de maior porte.



TRIAGEM:

Após a coleta, inicia-se a triagem. Essa triagem pode ser feita manualmente, por um processo físico de catção, ou com auxílio de sistemas computadorizados.



DESMONTAGEM E SEPARAÇÃO:

Nessa etapa, ocorre a desmontagem sistemática dos produtos descartados: primeiro, retiram-se as partes externas, como carcaças, painéis e botões; em seguida, os componentes internos, como placas eletrônicas, baterias, cabos, motores e compressores.



PROCESSAMENTO:

É nessa etapa do processo de reciclagem que diferentes técnicas de separação de misturas são usadas para recuperar materiais valiosos dos diversos componentes presentes no lixo eletrônico.



DESTINAÇÃO FINAL:

Os materiais recuperados podem voltar à indústria eletrônica ou ganhar novos usos em diferentes setores produtivos.

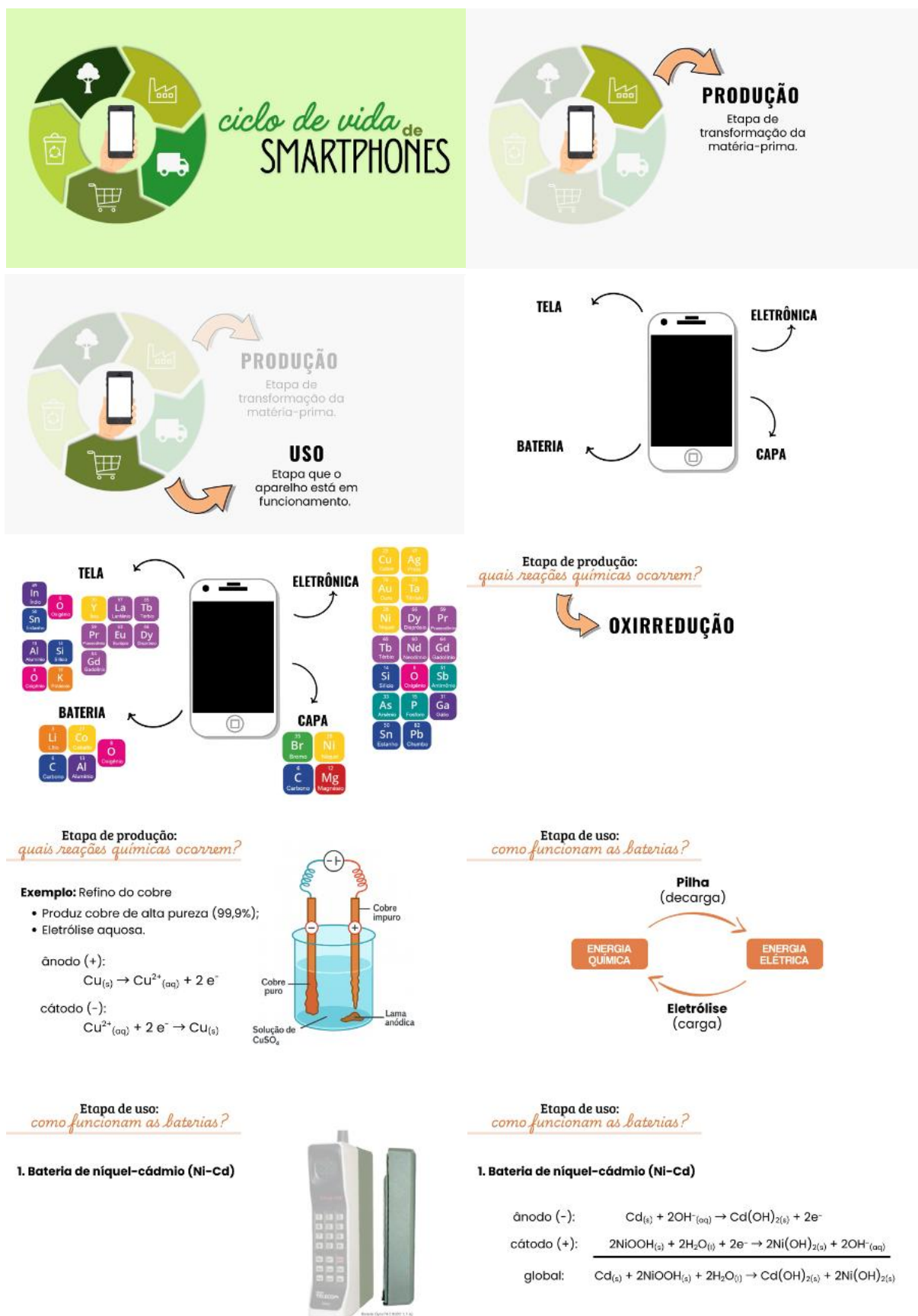
Encontre os pontos de coleta mais próximos de você!

ENCONTRE PONTOS

Associação Brasileira de Reciclagem de Eletrônicos e Eletrodomésticos (ABRETE)
<https://abrete.org.br/abrete-de-reciclagem/>



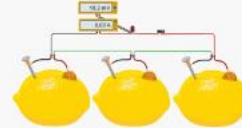
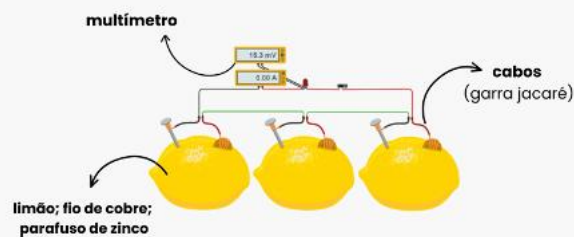
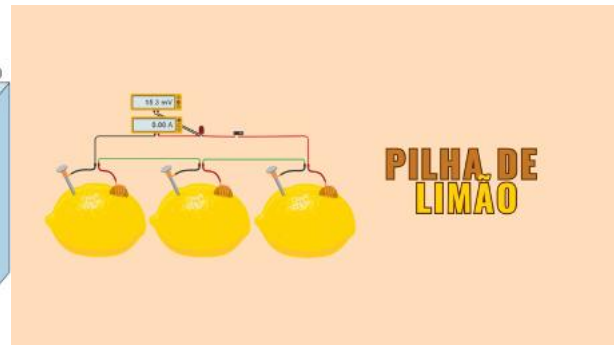
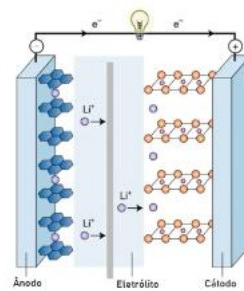
APÊNDICE C – *SLIDES* UTILIZADOS NA APLICAÇÃO CONJUNTA DOS CAPÍTULOS 3 E 5



Etapas de uso:
como funcionam as baterias?

2. Bateria de íon-lítio

- Durante a descarga, os íons Li^+ migram do ânodo para o cátodo por meio do eletrólito.
- Na recarga, a corrente externa força o retorno dos íons Li^+ ao grafite, reiniciando o processo.

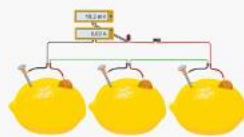


Reações envolvidas

ânodo (-): $\text{Zn}_{(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}_{(aq)} + 2e^-$

cátodo (+): $2\text{H}^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow \text{H}_{2(g)}$

global: $\text{Zn}_{(s)} + 2\text{H}^+_{(aq)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}_{(aq)} + \text{H}_{2(g)}$



Cálculo da voltagem

$$\text{DDP} = E^{\circ}_{(\text{RED}) \text{ CATODO}} - E^{\circ}_{(\text{RED}) \text{ ANODO}}$$

$$\text{DDP} = 0,00 - (-0,76)$$

$$\text{DDP} = +0,76\text{V}$$

(valor teórico por célula)

$$\text{DDP} = +0,76 \times 4 = +3,04 \text{ V}$$

(valor teórico para a associação em série)

**principais
IMPACTOS
ambientais**



Pegada de carbono no ciclo de vida de smartphones*

Modelo	Pegada total (kg CO ₂ e)	Produção	Uso	Transporte/Distribuição	Fim de vida
iPhone 14 Pro	65,0	81,0%	15,0%	3,0%	<1,0%
Galaxy S24 Ultra	66,4	85,7%	8,4%	4,2%	1,7%

*Os valores apresentados correspondem à pegada de carbono total estimada para a produção, uso, transporte e fim de vida de uma unidade da aparelha, expressa em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂e).

**principais
soluções**

1. Otimizar o uso de matérias-primas e ampliar a estrutura de reciclagem;
2. Aumentar a eficiência energética e inventar fontes renováveis de energia;
3. Projetar produtos mais duráveis e com design circular;
4. Prolongar o tempo de uso, preservar o aparelho e evitar trocas frequentes.

APÊNDICE D – ROTEIRO DO EXPERIMENTO DE GALVANIZAÇÃO ELETROLÍTICA DE UMA MOEDA

Materiais necessários

- Fonte de corrente contínua (carregador de celular adaptado).
- 1 béquer de 250 mL.
- 1 moeda.
- 1 placa de cobre.
- Solução aquosa de sulfato de cobre II (CuSO_4).

Procedimento

1. Preparo da solução:

- Em um recipiente à parte, adicione cerca de 50 mL de água.
- Com o auxílio de uma colher, adicione o sulfato de cobre, aos poucos e sob agitação, até obter uma solução de cor azul intenso.

2. Montagem do circuito:

- Conecte os fios da fonte de corrente contínua:
 - O polo negativo (fio preto) deve ser conectado à moeda (cátodo);
 - O polo positivo (fio vermelho) deve ser conectado à placa de cobre (ânodo).
- Transfira a solução para o recipiente de vidro escolhido.
- Mergulhe os metais na solução, garantindo que não se toquem.
- Observe o sistema por cerca de dois minutos, com a fonte desligada.
- Ligue a fonte de corrente contínua e observe a reação por cerca de 2 minutos ou até observar a formação de uma camada avermelhada sobre a moeda e o desbotamento da coloração azul da solução.
- Desligue a fonte e retire os eletrodos.

APÊNDICE E – ROTEIRO DO EXPERIMENTO DE PILHAS DE LIMÃO EM SÉRIE

Materiais necessários

- 4 limões.
- 1 faca.
- 1 multímetro digital.
- 4 pregos galvanizados limpos (eletrodo de zinco).
- 4 fios rígidos de cobre metálico.
- 5 cabos de conexão com garras jacaré.

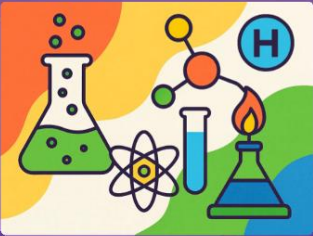
Procedimentos

- Use a faca para fazer dois pequenos cortes em cada limão para inserir os eletrodos, uma placa de zinco e uma placa de cobre, sem que se toquem.
- Conecte os limões em série:
 - Utilize um cabo com garras jacaré para unir o eletrodo de cobre de um limão ao eletrodo de zinco de outro limão.
 - Repita esse processo até que reste apenas um eletrodo de zinco e um de cobre, em limões diferentes, sem conexão.
- Com os dois cabos restantes, conecte:
 - O eletrodo de zinco sem conexão ao polo negativo do voltímetro.
 - O eletrodo de cobre sem conexão ao polo positivo do voltímetro.
- Observe o funcionamento do sistema.

APÊNDICE F – ITENS AVALIATIVOS DO QUIZ NA PLATAFORMA KAHOOT

1 - Slide

PARTE II



Perguntas sobre reações de oxirredução e eletroquímica. Preparados? Vamos lá!

2 - Verdadeiro ou falso

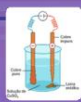
Tanto na pilha quanto na eletrólise, o cátodo é sempre o polo positivo, e o ânodo, o negativo.



◆ Verdadeiro ▲ Falso ✓

3 - Quiz

O processo de eletrólise requer uma fonte externa de energia elétrica porque:



A reação é espontânea e converte energia elétrica em energia química.
 ▲ A reação ocorre com ddp positiva.

A reação não é espontânea e depende da corrente elétrica para ocorrer. ✓
 Os elétrons circulam naturalmente entre o ânodo e o cátodo.

4 - Quiz

No experimento da pilha de limão, a reação global é dada por: $\text{Zn} + 2 \text{H}^+ \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{H}_2$. Essa equação indica que:



O zinco foi reduzido, formando gás hidrogênio no cátodo.
 Os elétrons migraram espontaneamente do cátodo para o ânodo.

O hidrogênio foi oxidado, originando íons H^+ .
 O zinco foi oxidado, liberando elétrons para reduzir os íons H^+ . ✓

5 - Quiz

Na galvanização, íons Cu^{2+} são transformados em cobre metálico: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$. Isso acontece porque o cobre:

É reduzido no cátodo, variando seu NOX de +2 para 0. ✓
 É oxidado no ânodo, variando seu NOX de 0 para +2.

Reage com a água, formando um composto insolúvel.
 Sofre condução elétrica, mas não altera seu estado químico.

6 - Quiz

O alumínio metálico é produzido a partir de uma eletrólise ígnea: $2 \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{C} \rightarrow 4 \text{Al} + 3 \text{CO}_2$. Nesse processo:

O alumínio é oxidado, passando de NOX +3 para 0.
 A semirreação do cátodo é indicada por $\text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Al}$. ✓

O CO_2 produzido não gera impacto ambiental significativo.
 O carbono atua como agente oxidante e recebe elétrons durante o processo.

7 - Quiz

Considerando os potenciais de redução, é correto afirmar que em uma bateria lítio-iodo:

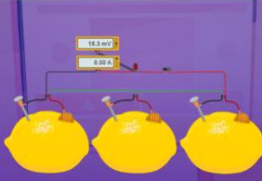
$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li} \quad E^\circ = -3,05 \text{ V}$
 $\text{I}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I}^- \quad E^\circ = +0,54 \text{ V}$

O lítio é reduzido, pois seu potencial de redução é negativo.
 O iodo ganha elétrons no ânodo, atuando como agente oxidante.

A reação global é espontânea e possui $\Delta E^\circ = -3,58 \text{ V}$.
 O lítio sofre oxidação no ânodo, doando elétrons para o iodo. ✓

8 - Verdadeiro ou falso

Na pilha de limão, o limão atua como ponte salina, mantendo o fluxo de íons e o equilíbrio elétrico do sistema.



◆ Verdadeiro ✓ ▲ Falso

9 - Slide

PARTE 2!



Perguntas sobre as etapas do ciclo de vida de smartphones. Preparados? Vamos lá!

10 - Quiz

Qual ideia representa melhor a visão geral do ciclo de vida dos smartphones?



▲ Cada etapa do ciclo funciona de forma independente.	◆ O ciclo termina no uso, já que a reciclagem não interfere nas outras fases.
● O ciclo reúne todas as fases, da extração de matérias-primas até o descarte. ✓	■ Esse ciclo não tem relevância para os impactos ambientais atuais.

11 - Verdadeiro ou falso

As etapas de produção e uso não estão ligadas, pois as decisões de design não influenciam a durabilidade do aparelho.

◆ Verdadeiro ▲ Falso ✓

12 - Quiz

O alto consumo de energia elétrica é um dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida de smartphones. O impacto é:



▲ Sempre o mesmo, independentemente da fonte de energia utilizada.	◆ Maior na fase de uso, pois as recargas consomem mais energia.
● Maior na fase de produção, pois ocorre apenas uma única vez.	■ Menor quando a energia provém de fontes renováveis. ✓

13 - Quiz

A produção de smartphones envolve uma grande quantidade de recursos. Uma forma eficiente de reduzir essa demanda é:

▲ Reduzir o número de acessórios enviados com o aparelho.	◆ Reciclar metais presentes em aparelhos descartados, reduzindo a mineração. ✓
● Aumentar a produção de novos modelos para tornar o processo mais eficiente.	■ Substituir todos os metais por plásticos biodegradáveis.

14 - Verdadeiro ou falso

Ao escolher produtos duráveis e evitar trocas frequentes, o consumidor ajuda a diminuir os impactos do ciclo de vida.

◆ Verdadeiro ✓ ▲ Falso

15 - Slide

VOCÊS FORAM ÓTIMOS! :)



Obrigado