

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA 2025

NATHÁLIA SCAVAZZANI

Estudo da viabilidade econômica de uma tecnologia de reciclagem de baterias
de íon-lítio

SÃO JOÃO DA BOA VISTA
2025

NATHÁLIA SCAVAZZANI

Estudo da viabilidade econômica de uma tecnologia de reciclagem de baterias
de íon-Lítio

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
como requisito para obtenção de
título de Bacharel em Engenharia
Eletrônica e de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de
Oliveira

Coorientadora: Prof. Dr. Mirian Paula
dos Santos

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2025

S288e Scavazzani, Nathália

Estudo da viabilidade econômica de uma tecnologia de reciclagem de baterias de íon-lítio / Nathália Scavazzani. -- São João da Boa Vista, 2025

52 f. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Coorientadora: Prof. Dr. Mirian Paula dos Santos

1. Reaproveitamento. 2. Viabilidade econômica. 3. Baterias de lítio.

I. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA TECNOLOGIA DE
RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO**

Aluno: Nathalia Scavazzani

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Banca Examinadora:

- José Augusto de Oliveira (Orientador)
- Jaime Voltarelli Junior (Examinador)
- Kryssian Romeiro Cascione (Examinadora)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 09 de dezembro de 2025

RESUMO

As LIBs destacam-se no cenário energético atual por sua alta densidade de energia, longa vida útil e capacidade de recarga, características que impulsionaram seu uso. O aumento expressivo de sua produção e consumo gera preocupações quanto ao descarte inadequado, à escassez de matérias-primas críticas e aos impactos ambientais e econômicos relacionados à extração mineral. Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade econômica da reciclagem de LIBs, avaliando se essa tecnologia pode se consolidar como alternativa sustentável à mineração primária. Trata-se de pesquisa aplicada, quanti-qualitativa, baseada em revisão bibliográfica sistemática (RBS), segundo o método Roadmap, com buscas em bases científicas, a partir de descritores em português e inglês e análise da viabilidade econômica a partir de cálculos de indicadores econômicos e financeiros (VPL, TIR, *payback*) para análise de viabilidade do processo produtivo. O trabalho está estruturado em capítulos que apresentam o referencial teórico sobre o ciclo de vida das LIBs, os métodos de reciclagem existentes e a metodologia da RBS, além de detalhar a proposta de um layout produtivo desenvolvido pelo *Center for Advanced and Sustainable Technologies* (CAST), que aplica princípios de manufatura reversa e produção enxuta. A análise da viabilidade econômica considerou o custo dos materiais, água e energia elétrica mensal. Com custo total de R\$ 166,00 por batelada, baixo consumo de energia e água e retorno estimado em 4 meses, o processo apresenta VPL positivo e TIR acima de 10% a.a., destacando-se como alternativa sustentável e lucrativa.

Palavras-chave: baterias de íon-lítio; hidrometalurgia; reciclagem; viabilidade econômica.

ABSTRACT

Lithium-ion batteries (LIBs) stand out in the current energy landscape for their high energy density, long lifespan, and recharge capability, characteristics that have driven their widespread use. However, the sharp increase in their production and consumption raises concerns regarding improper disposal, the scarcity of critical raw materials, and the environmental and economic impacts associated with mineral extraction. This study aims to analyze the economic feasibility of LIB recycling, evaluating whether this technology can be consolidated as a sustainable alternative to primary mining. This is an applied, quantitative–qualitative study based on a systematic literature review (SLR), following the Roadmap method, with searches conducted in scientific databases using descriptors in both Portuguese and English. The economic feasibility analysis was carried out through financial indicators (NPV, IRR, payback), synthesized by the cost of the production process. The work is structured into chapters presenting the theoretical framework on the life cycle of LIBs, existing recycling methods, and the SLR methodology, in addition to detailing the proposed production layout developed by the Center for Advanced and Sustainable Technologies (CAST), which applies principles of reverse manufacturing and lean production. The economic feasibility analysis considered the cost of materials, water, and monthly electricity consumption. With a total cost of R\$ 166,00 per batch, low energy and water consumption, and an estimated payback of 4 months, the process shows a positive NPV and an IRR above 10% per year, standing out as a sustainable and profitable alternative.

Keywords: lithium-ion batteries; hydrometallurgy; recycling; economic feasibility

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Diagrama de processos de remanufatura de LIBs.	19
Figura 2 — Cronograma de batelada.	20
Figura 3 — Fluxograma de sequência metodológica.	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Processos e tempos	20
Quadro 2 — Aplicação do Filtro 1: leitura do título, resumo e palavras-chave	24
Quadro 3 — Aplicação do Filtro 2: leitura da introdução e conclusão	27
Quadro 4 — Aplicação do Filtro 3: leitura completa	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Comparação entre os cenários de linha de produção	21
Tabela 2 — Custos da etapa de processamento	36
Tabela 3 — Custos da etapa de Desmonte	37
Tabela 4 — Custos da etapa de Corte, entrada (Cátodo)	38
Tabela 5 — Custos da etapa de Corte, saída (Cátodo)	38
Tabela 6 — Custos da etapa de Corte, entrada (Ânodo)	39
Tabela 7 — Custos da etapa de Corte, saída (Ânodo)	39
Tabela 8 — Custos da etapa de Descarga	40
Tabela 9 — Custos da etapa de Limpeza	41
Tabela 10 — Custos operacionais	41
Tabela 11 — Resumo dos custos: 55 bateladas (mês)	42
Tabela 12 — Custos fixos	43
Tabela 13 — Custos variáveis	43
Tabela 14 — Projeção de payback	45
Tabela 15 — Taxa Interna de Retorno (TIR)	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise de Ciclo de Vida
CAST	Center for Advanced and Sustainable Technologies
EoL	<i>End of Life</i>
IRR	Taxa Interna de Retorno
LCC	Análise do Custo do Ciclo de Vida
LCO	Óxido de Lítio e Cobalto
LIBs	Baterias de íon-Lítio
MFV	Mapeamento de Fluxo de Valor
NMC	Níquel-cobalto-manganês
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PE	Produção enxuta
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 BATERIAS ION LITIO	12
2.2 CICLO DE VIDA DAS BATERIAS ION-LITIO	13
2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DO DESCARTE DE LIBS	15
2.4 PROCESSO DE RECICLAGEM	17
2.5 PROCESSO PRODUTIVO DE RECICLAGEM	18
2.6 LAYOUT DO PROCESSO DE RECICLAGEM	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	23
3.2 RESULTADOS	24
4 METODOLOGIA	30
4.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	33
4.1.1 Estrutura de Custos e Investimentos	33
4.1.2 Métricas de Viabilidade Econômica	33
4.1.4 Coleta de Custos	35
5 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	36
5.1 PROCESSAMENTO	36
5.2 DESMONTE	37
5.3 CUSTOS DA ETAPA DE CORTE	38
5.4 CUSTOS DA ETAPA DE DESCARGA	39
5.5 CUSTOS DA ETAPA DE LIMPEZA	40
5.5.1 Custos Operacionais	41
5.6 RESUMO DOS CUSTOS	42
5.7 CÁLCULOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA	42
5.7.1 Estimativa da Receita	42
5.8 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	45
5.8.1 Análise das Métricas da Viabilidade	46
6 CONCLUSÃO	47
7 REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e a crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis têm impulsionado o uso de baterias de íon-lítio (LIBs) em escala global. Aplicadas em dispositivos eletrônicos, sistemas de armazenamento de energia e, principalmente, em veículos elétricos, essas baterias apresentam alta densidade energética, longa vida útil e recarga eficiente, tornando-se elemento central na transição para uma matriz energética de baixo carbono. Entretanto, o aumento exponencial do consumo de LIBs traz consigo desafios significativos, sobretudo relacionados ao destino de resíduos ao fim da vida útil, à escassez de matérias-primas estratégicas e aos impactos ambientais decorrentes da extração mineral.

Nesse contexto, a reciclagem das LIBs surge como alternativa fundamental para o fechamento do ciclo de vida desses produtos, permitindo a recuperação de metais de alto valor, como lítio, níquel, cobalto e manganês. Entre as diferentes técnicas disponíveis, os processos hidrometalúrgicos destacam-se pela capacidade de extrair materiais com elevada pureza e menor consumo energético em comparação à mineração primária. Contudo, mesmo sendo ambientalmente promissora, a reciclagem enfrenta desafios econômicos que envolvem altos custos operacionais, processos de desmontagem ainda fortemente manuais e a necessidade de infraestrutura industrial avançada. Assim, analisar a viabilidade econômica dessas tecnologias é essencial para possibilitar viabilizar sua implementação em larga escala e assegurar a sustentabilidade da cadeia produtiva.

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo principal avaliar a viabilidade econômica de uma tecnologia de reciclagem de LIBs desenvolvida pelo *Center for Advanced and Sustainable Technologies* (CAST) (Santos *et al.*, 2021). Para isso, foram empregados princípios de manufatura reversa, produção enxuta e simulação de processos produtivos, aliados a uma revisão bibliográfica sistemática (RBS) voltada para a análise de custos e receitas do processo de reciclagem.

Dessa forma, considerando a tecnologia de reciclagem de LIBs como um conjunto de processos produtivos definidos em escala laboratorial, baseados nos princípios e indicadores de desempenho operacional da Produção enxuta (PE), a questão de pesquisa que norteará este trabalho é: qual é a viabilidade econômica de uma tecnologia de reciclagem de LIBs?

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a viabilidade econômica da tecnologia de reciclagem de LIBs. Para isso, será necessária a realização de alguns objetivos específicos:

- I. Traçar os conceitos teóricos fundamentais sobre as LIBs, abordando suas características, aplicações, ciclo de vida, impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado e a importância da reciclagem para a economia circular;
- II. Apresentar e descrever o processo produtivo de reciclagem das LIBs, com ênfase no método hidrometalúrgico, destacando as etapas de desmontagem, extração e recuperação de metais, bem como as vantagens e limitações dessa tecnologia em relação a outros métodos; e
- III. Analisar a viabilidade econômica do processo de reciclagem, avaliando custos, receitas potenciais, desafios operacionais e fatores de mercado que influenciam a competitividade do setor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BATERIAS ION LITIO

O uso de LIBs apresenta um crescimento exponencial na atualidade. Reconhecidas pelo Prêmio Nobel de Química em 2019, esse tipo de bateria é versátil e leve, possui altas densidade e, capacidade energética e velocidade de recarga, além de apresentar menores potenciais de impactos ambientais (FEM, 2019; Smith, 2020; Habib; Hansdóttir; Habib, 2020).

Logo, as LIBs são amplamente utilizadas em equipamentos eletrônicos, de telecomunicações, de fontes estacionárias de energia e são consideradas como um dos principais meios para a mudança da matriz energética fóssil para a elétrica no setor de transportes (Bradley *et al.*, 2017; FEM, 2019; Smith, 2020; An, 2020), incluindo veículos automotivos, motocicletas, patinetes, ônibus, aviões, etc.

O consumo de lítio aumentou consideravelmente em resposta à demanda por LIBs, tendo superado 30.000 ton. em 2015 com projeção de 600.000 ton. a 1 milhão de toneladas lítio/ano até 2025 (BGR, 2019). Devido à demanda, a preocupação recai sobre o destino desses materiais, visto que o descarte incorreto afeta diretamente o meio ambiente.

Assim, a escolha de uma estratégia de fim de vida adequada das LIBs é essencial para diversos setores obterem sustentabilidade econômica e para o alcance dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), promovendo a Economia Circular em vários setores econômicos mundiais.

Existem diferentes estratégias de fim de vida do produto (do inglês, *End of Life* – EoL), e após esgotadas as possibilidades analisadas, a reciclagem é uma das estratégias de EoL que é essencial para o fechamento do ciclo de vida e para a Economia Circular como prevêm a *Waste Electrical and Electronic Equipment Directive* (WEEE, 2002), a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), o acordo setorial firmado entre o Ministério do Meio Ambiente e as empresas produtoras de equipamentos eletrônicos, incluindo baterias (MMA, 2019) e o Decreto nº 10.240 de 2020 (Brasil, 2020).

O CAST da UNESP/ SJBV patenteou a tecnologia de reciclagem (Santos *et al.*, 2021), que será o objeto de estudo deste trabalho, visando a análise da viabilidade

econômica da tecnologia, deve-se avaliar o desempenho operacional dos processos produtivos e, portanto, a capacidade produtiva de uma planta fabril, merecendo destaque o *layout* produtivo

Após essa avaliação, passa-se à análise da viabilidade econômica do processo.

2.2 CICLO DE VIDA DAS BATERIAS ION-LITIO

O ciclo de vida das LIBs compreende todas as etapas que vão desde a extração das matérias-primas até o descarte ou a reciclagem, passando pela fabricação, uso e processos de recuperação. Esse ciclo permite a compreensão do desempenho e da durabilidade dessas baterias, bem como dos impactos econômicos e ambientais (Silva; Fonseca; Sousa, 2024).

O ciclo de vida inicia-se na fabricação das células, em que os materiais ativos como lítio, cobalto, níquel e grafite são preparados e montados. Cada célula é submetida a testes que buscam identificar falhas de produção, pois defeitos não detectados nesse momento podem se manifestar logo nos primeiros ciclos de uso. Após a fabricação, as células são embaladas e transportadas para os fabricantes de packs de bateria. Esse transporte exige embalagens adequadas para evitar danos mecânicos, curtos-circuitos, perfurações ou esmagamentos (Michellini, 2020).

Na sequência, as células chegam ao fabricante de packs, em que passam por novas verificações de tensão, resistência interna e taxa de autodescarga antes da montagem. As que apresentam anomalias são descartadas para garantir a segurança e a eficiência do conjunto. Os packs prontos seguem para os fabricantes de equipamentos, novamente em embalagens que minimizem riscos de choque, perfuração ou curtos durante o transporte (Green Eletron, 2020).

Com os packs em mãos, os fabricantes de equipamentos instalam as baterias em produtos finais, como notebooks, smartphones ou veículos elétricos, e testam o funcionamento para assegurar que a carga e a descarga ocorram corretamente. Depois, os dispositivos são enviados a centros de distribuição e, por fim, chegam ao consumidor. Durante a fase de uso, considerada uma das mais críticas, a bateria enfrenta ciclos de carga e descarga que, ao longo do tempo, reduzem gradualmente sua capacidade de armazenamento. Fatores como temperatura, profundidade de

descarga, quedas ou embalagens inadequadas em transportes e devoluções elevam o risco de falhas ou acidentes, especialmente quando a bateria é enviada totalmente carregada ou manipulada sem cuidados básicos (Michelini, 2020).

Quando a capacidade da bateria cai para cerca de 70 a 80% da original, ela atinge o fim da chamada primeira vida. Ainda assim, muitas podem ser reaproveitadas em aplicações de segunda vida, como sistemas de armazenamento estacionário de energia, onde a exigência de desempenho é menor. Essa etapa prolonga a utilidade das baterias e reduz a geração de resíduos (Domingues, 2022).

Por fim, chega o momento do descarte ou reciclagem. Antes de serem enviadas para reciclagem ou até mesmo para o lixo doméstico, as baterias devem ser totalmente descarregadas e preparadas para evitar curto-circuitos, com os terminais protegidos por plásticos ou fitas isolantes. Mesmo quando já não servem para uso, células em fim de vida ainda podem reter energia suficiente para provocar incêndios ou explosões caso não sejam manipuladas corretamente. Por isso, recomenda-se o cumprimento de normas específicas para transporte e processamento, como as estabelecidas por órgãos de aviação civil para remessas aéreas (Michelini, 2020).

Os processos de reciclagem podem ser mecânicos, hidrometalúrgicos ou pirometalúrgicos e visam recuperar metais valiosos como lítio, cobalto, níquel e cobre. Embora a tecnologia já permita a reinserção desses elementos na cadeia produtiva, ainda existem desafios econômicos e logísticos para tornar a reciclagem amplamente viável e segura. Entender e gerenciar cada etapa do ciclo de vida é, portanto, essencial para melhorar o desempenho, reduzir impactos ambientais e aumentar a sustentabilidade da produção e do uso de LIBs (Michelini, 2020).

A rota hidrometalúrgica foi adotada no presente estudo e compreende uma sequência de operações unitárias, conforme estabelecido por Santos *et al.* (2021) e validado em ambiente laboratorial. A descrição a seguir detalha as etapas que compõem o processo de reciclagem de baterias de íon-lítio, com base nos parâmetros operacionais levantados:

1. Banho de Recirculação (*Recirculation Bath*): etapa inicial na qual as baterias são submetidas a um fluxo contínuo de solução de cloreto de sódio (NaCl) ou sulfato de magnésio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), visando à completa descarga elétrica. Essa operação, com duração de 12 horas por batelada, é supervisionada por um operador.

2. Banho de Água (*Water Bath*): em seguida, as unidades passam por um banho em água para remoção de resíduos da etapa anterior, com duração de 30 minutos, também sob supervisão.
3. Secagem (*Oven*): o material é então conduzido a um forno industrial, onde é aquecido a aproximadamente 80°C por 15 minutos para eliminação de umidade.
4. Corte Automatizado (*Automated Slitting*): as baterias são processadas em equipamento de corte de alta capacidade (até 5.000 unidades/hora), no qual as cascas metálicas são removidas.
5. Separação Manual (*Cell Disassembly*): em bancada, um operador realiza a desmontagem manual para separar cátodo, ânodo e membrana de separação, com tempo médio de 4 minutos e 48 segundos por unidade.
6. Corte Manual (*Cutting*): as folhas catódicas e anódicas são segmentadas em partes de aproximadamente 2 cm, em processo que consome 1 minuto e 12 segundos por unidade.
7. Processo de Limpeza (*Drying Process*): etapa aplicada apenas a baterias do tipo Níquel-cobalto-manganês (NMC), composta por três fases: (i) recirculação com solução ácida: para facilitar a remoção de óxidos (6 horas/batelada); (ii) banho de água: para eliminação de resíduos (30 minutos); (iii) secagem: nova passagem por forno a 80°C por 15 minutos.
8. Reação em Tanques (*Stirred Tank Reactors*): os componentes são direcionados a reatores específicos, onde são submetidos a reações químicas com adição de soluções específicas, em processo com duração de 4 minutos e 48 segundos por batelada.
9. Filtração: etapa final na qual os produtos de interesse, como materiais tipo I, tipo II e grafite, são separados por filtração, com duração de 30 minutos por batelada.

Essas etapas, em conjunto, representam a base operacional, permitindo alinhar a modelagem dos processos aos parâmetros operacionais necessários para a análise de viabilidade econômica.

2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DO DESCARTE DE LIBS

Os impactos ambientais relativos à utilização das LIBs perpassam todas as fases de seu ciclo de vida e incluem:

- Emissões de gases de efeito estufa (CO₂), referentes às emissões atmosféricas geradas ao longo do ciclo de vida;
- Consumo de água, medido em metros cúbicos, tanto na extração de matérias primas quanto nos processos produtivos;
- Geração de resíduos sólidos, medida em toneladas, com foco na fase de destinação final e reciclagem (Silva; Fonseca; Sousa, 2024).

Dentre esses impactos o descarte das LIBs é uma das etapas mais nocivas, pois o lítio polui diretamente o solo e, portanto, essa etapa representa um problema

ambiental crescente, especialmente diante da expansão da mobilidade elétrica e do uso massivo em eletrônicos portáteis. Quando essas baterias chegam ao fim da vida útil e não são destinadas a processos de reciclagem ou tratamento especializado, geram uma série de impactos significativos ao meio ambiente e à saúde humana (Silva; Fonseca; Sousa, 2024).

Um dos principais riscos está na contaminação do solo e da água. As células contêm metais como lítio, cobalto, níquel, manganês e cobre, além de eletrólitos com sais de lítio e solventes orgânicos. Quando descartadas em aterros comuns, as baterias podem sofrer ruptura, liberando esses elementos que, em contato com a umidade, formam lixiviados tóxicos capazes de infiltrar no solo e atingir lençóis freáticos. Essa contaminação ameaça ecossistemas aquáticos, a fauna, a flora e, em última instância, a qualidade da água consumida por populações humanas (Domingues, 2022).

Outro impacto crítico é o risco de incêndios e explosões. Mesmo após o fim da vida útil, as LIBs podem reter carga elétrica. Se perfuradas, esmagadas ou expostas a altas temperaturas, podem ocorrer curtos-circuitos internos que desencadeiam reações térmicas descontroladas (*thermal runaway*), liberando calor intenso, gases inflamáveis e substâncias tóxicas. Esses eventos são difíceis de controlar e podem liberar compostos orgânicos voláteis e partículas de metais pesados no ar, comprometendo a qualidade do ambiente e a saúde das comunidades próximas (Michelini, 2020).

A perda de recursos naturais também é um problema relevante. Lítio, cobalto e níquel são recursos finitos e sua extração tem alto custo ambiental, envolvendo consumo de água, energia e geração de resíduos. O descarte em aterros ou a queima em incineradores impede a recuperação desses metais, aumentando a pressão sobre atividades de mineração, que por si só já causam degradação de ecossistemas e emissões de gases de efeito estufa (Cao *et al.*, 2023).

Além disso, há a questão das emissões de gases tóxicos. Em condições de degradação ou combustão, os componentes das baterias podem liberar gases irritantes ou poluentes atmosféricos, como fluoretos e óxidos metálicos, que afetam a qualidade do ar e podem provocar problemas respiratórios e doenças crônicas em seres humanos (Silva; Fonseca; Sousa, 2024).

Por essas razões, a destinação correta das LIBs é fundamental. A reciclagem especializada permite recuperar metais e reduzir a necessidade de mineração, além

de minimizar os riscos de contaminação e incêndios. No entanto, a implementação de cadeias eficientes de coleta, logística reversa e tecnologias de reaproveitamento ainda enfrenta desafios, como custos elevados e falta de infraestrutura adequada em muitos países.

Portanto, o descarte inadequado de LIBs não é apenas uma questão de resíduos sólidos, mas um problema ambiental e de saúde pública que exige políticas rigorosas, conscientização dos consumidores e investimentos em tecnologias de reciclagem para mitigar seus impactos.

2.4 PROCESSO DE RECICLAGEM

No processo de reciclagem de Escarabelin (2021), o óxido de lítio, que é retirado das LIBs, seria vendido e geraria recursos suficientes para cobrir os gastos da reciclagem. Essa técnica de reciclagem recupera 90% do óxido de lítio com 98% de pureza e, se contaminado com grafite, 50%. A reciclagem das LIBs é mais sustentável e econômica do que a retirada dos seus componentes minerais da natureza:

No caso do lítio, são necessários 100 quilos (kg) do mineral bruto para produzir 1,6 kg de lítio. Já um processo de reciclagem é capaz de recuperar 7 kg de óxido de lítio em cada 100 kg de bateria (equivale a cerca de 3,27 kg de lítio elementar). A extração do minério tem alto impacto ambiental pelo uso intensivo de água, além de o refino ser eletrointensivo, com os materiais rochosos aquecidos a temperaturas acima de 1.000 °C, o que consome muita energia (Fapesp, 2023).

Ademais, a demanda pelas LIBs é crescente, culminando na necessidade de reciclá-las. Contudo, uma das maiores barreiras à reciclagem de LIBs é o processo altamente manual de desmontagem dos módulos de baterias, o que aumenta significativamente os custos operacionais e limita a escalabilidade dos sistemas de reciclagem. Segundo Choux *et al.* (2023), o desenvolvimento de linhas de desmontagem robótica pode ser uma chave para aumentar a eficiência do processo, permitindo a recuperação de materiais de maior pureza e valor. Isso é especialmente importante em um momento em que o mercado global de materiais de bateria está em expansão e a demanda por esses metais críticos está em alta.

Em decorrência do impacto ambiental do descarte incorreto das LIBs e da falta da destinação correta desses materiais, foram criados processos de reciclagem

(Santos et al, 2021). O estudo de caso sobre essa implementação foi realizado em 2021, conforme os preceitos de Yin (2015), e buscou-se realizar a Triangulação Intramétodo com a aplicação de:

- Coleta dos dados da empresa de forma remota; e
- Acompanhamento e análise dos processos em escala laboratorial.

A crescente demanda por baterias de íons-lítio (LIBs) reforça a necessidade de reciclá-las, sobretudo diante do impacto ambiental do descarte inadequado.

Com esse contexto, Escarabelin (2021) realizou um estudo de caso com coleta remota de dados e acompanhamento laboratorial, utilizando o software TecnomatixTM para modelar e simular o processo produtivo. As simulações permitiram validar os planos de produção antes da implementação, identificar ajustes antecipadamente e analisar cenários diversos com alto grau de precisão, considerando indicadores como *Lead Time*, tempo de *setup*, retrabalhos, deslocamentos, entre outros, o que viabiliza a implementação de melhorias operacionais e avaliar a viabilidade econômica do processo.

A proposta também envolve a definição de um *layout* produtivo adequado, essencial para otimizar fluxos de trabalho, reduzir desperdícios e garantir ergonomia. Os principais tipos abordados foram: layout em linha, layout celular e layout funcional, cuja escolha depende do volume e da variedade de produção.

2.5 PROCESSO PRODUTIVO DE RECICLAGEM

Preliminar à análise da viabilidade econômica da proposta do *layout* produtivo para uma indústria de reciclagem de LIBs, usando simulação de manufatura, bem como para direcionar o andamento da atividade, são apresentadas as definições de reciclagem, o que é manufatura reversa e qual a relação desses dois conceitos com a logística reversa:

Manufatura reversa é o processo de desmonte, descaracterização e reciclagem de produtos obsoletos, defeituosos ou ao fim da vida útil, assim, concluindo que a reciclagem é um dos processos da manufatura reversa, que transforma um resíduo sólido que não seria aproveitado em matéria-prima ou produto novamente (Green eletron, 2020).

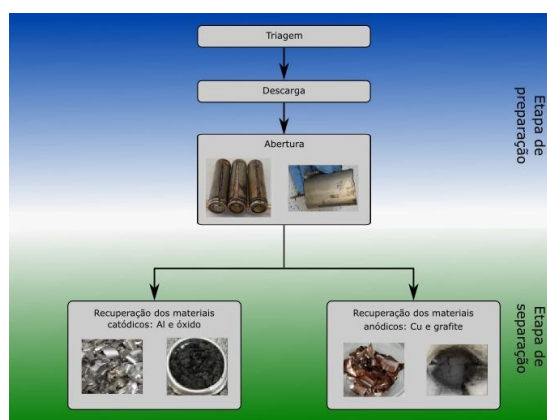
Dessa forma, a relação desses dois conceitos descritos é facilitar o reaproveitamento dos materiais coletados e proporcionar o seu retorno aos diferentes centros produtivos em forma de matéria-prima (Petronas, 2019).

2.6 LAYOUT DO PROCESSO DE RECICLAGEM

O processo de reciclagem das LIBs mostrado pelo de diagrama da Figura 1 é dado, primeiramente, pela descarga em um fluxo de recirculação em uma solução química de cloreto de sódio (NaCl) ou sulfato de magnésio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), seguido de um banho de água para eliminar resíduos das etapas anteriores, e seguindo para a secagem do material em 80°C .

Após essas etapas, a bateria é cortada (corte automatizado) e a casca metálica é retirada. Em seguida, de forma manual são separados os cortes (cátodo, ânodo e a membrana plástica). Para finalizar, os materiais são cortados em pedaços em torno de 2 cm, seguem para um reator com agitação tendo como resultado de uma filtração a separação do óxido metálico e do grafite, que são os materiais de interesse.

Figura 1 — Diagrama de processos de remanufatura de LIBs.



Fonte: Santos *et al.* (2021).

Para melhor visualização do processo de produção, foi elaborado um cronograma de batelada, mostrado na Figura 2 (iniciando a primeira batelada com 200 unidades de LIBs), usando os tempos encontrados em laboratório, onde as etapas subsequentes são dispostas ao longo do tempo. Para que sejam observados de forma clara os tempos de cada processo do cenário inicial, foi criada a Tabela 1.

O tempo de processo total *Lead Time* (LT), que é a soma dos tempos de todos os ciclos (T_c), tem 40,12 horas contando com 30 minutos de *setup* para limpeza e preparação das máquinas, em razão da contaminação química dos materiais.

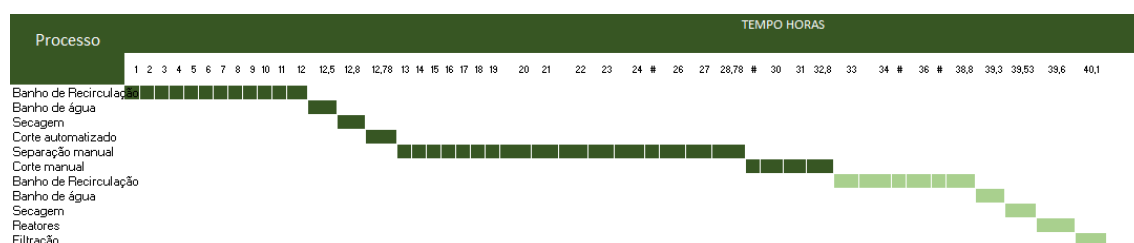
Quadro 1 — Processos e tempos

Processos	NMC	LCO	Tempo de Ciclo
Banho Recirculação	✓	✓	12 h/batelada
Banho de Água	✓	✓	30 min/batelada
Secagem	✓	✓	15 min/batelada
Corte Automatizado	✓	✓	2 min/batelada
Separação Manual	✓	✓	4:48 min/unidade + 16 h/batelada
Corte Manual	✓	✓	1:12 min/unidade + 4 h/batelada
Banho Recirculação	✓	X	6 h/batelada
Banho de Água	✓	X	30 min/batelada
Secagem	✓	X	15 min/batelada
Reatores	✓	✓	4:48 min/batelada
Filtração	✓	✓	30 min/batelada

Fonte: Adaptado de Escarabelin (2021).

Sendo: ✓ quando o tipo de bateria (NMC ou LCO) está presente naquele processo e X quando não está.

Figura 2 — Cronograma de batelada.



Fonte: Scavazzani, 2021.

O cronograma de batelada é um importante mecanismo para observar o tempo de ocupação de cada equipamento que compõe o processo da batelada. Com esse gráfico podemos entender o intervalo entre bateladas, os gargalos de produção, visando sempre a rápida e fácil análise completa sobre a capacidade e produtividade da planta, entendendo assim os pontos possíveis de melhorias.

Em específico no processo de manufatura reversa das LIBs, fica claro e evidente que o gargalo de produção, ou seja, a etapa em que a capacidade produtiva

está impactando diretamente na produtividade da planta como um todo, é a etapa separação manual.

A duração desta etapa consiste em 16 horas, portanto, pode-se notar que, com o investimento em mais pessoas, máquinas ou turnos, é possível tornar a planta com uma produtividade consideravelmente maior, podendo chegar em 100% do aumento da produtividade. Com isso, foram feitas simulações de diferentes cenários e comparações com a situação atual (Scavazzani, 2021).

Tabela 1 — Comparação entre os cenários de linha de produção

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Quantidade de baterias	200 (NMC e LCO) na mesma linha	200 (NMC e LCO) em linhas distintas	200 (NMC e LCO) em linhas distintas	200 (NMC e LCO) em linhas distintas	200 (NMC e LCO) em linhas distintas
Esquema	Processamento (três filtros e três reatores); - desmonte (uma separação manual); - corte (dois cortes manuais e um automatizado); - descarga (três banho de recirculação); - limpeza (dois banhos de ar e duas secagens)	Processamento (seis filtros e seis reatores); - desmonte (duas separações manuais); - corte (quatro cortes manuais e um automatizado); - descarga (três banho de recirculação); - limpeza (dois banhos de ar e duas secagens)	Quantidades inalteradas. Mudança de ordem: uma etapa de limpeza foi adicionada após o processamento e ao corte e demonte. A descarga é a última etapa.	Processamento (seis filtros e seis reatores); - desmonte (quatro separações manuais); - corte (quatro cortes manuais e um automatizado); - descarga (três banho de recirculação); - limpeza (dois banhos de ar e duas secagens)	Retirou-se o banho de recirculação inicial, terceirizando-o. Demais estruturas mantidas.
Gargalo de separação	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
Lead time	40,12h	28,52h	28,52h	24,58h	13,29h
Conclusão	Baixa eficiência global (pouco	deficiência no posicionamento das células	Eliminou-se o bloqueio na bancada de	Estações de separação manual foram	Supondo como a fábrica se sairia

tempo efetivo de trabalho);	produtivas na planta base da empresa causando um desperdício de tempo com movimentações desnecessárias. A	Separação Manual,	duplicadas novamente, totalizando quatro bancadas. Reduziu-se em 35,11% do tempo em relação ao cenário inicial	trabalhando em sua capacidade máxima com 32 bancadas de separação manual e oito máquinas de corte manual, o tempo de processo total seria 9 horas, porém, isso aumentaria drasticamente o custo da empresa, com novos equipamentos, funcionários e expansão física
Grande ociosidade e bloqueios;				
Um gargalo evidente na etapa de separação manual, que limita toda a capacidade da planta.	melhoria foi aplicada no cenário 3.			

Fonte: Adaptado Escarabelin (2021), 2025.

Sobre as bateladas, quanto menor o intervalo entre elas, maior a produtividade. Considerando os resultados do cenário 5, tem-se, aproximadamente, 132 mil baterias retrabalhadas por ano, obtendo 27,41% a mais de produtividade considerando o cenário inicial, na hipótese de a produção ter três turnos de trabalho em escala 6x2, rodado 24 horas por dia e sete dias por semana (Scavazzani, 2021).

Portanto, para fins dessa pesquisa, considera-se essas métricas: *lead time* de 13,29 horas e 132 mil baterias retrabalhadas por ano.

É importante ressaltar que os cálculos foram realizados com base em um cenário ideal de laboratório, contexto no qual foram levantados, por exemplo, os equipamentos cotados. Na prática industrial, entretanto, podem ocorrer variações operacionais e custos adicionais que devem ser considerados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Trata-se de pesquisa básica, qualitativa, que se utiliza do procedimento metodológico da RBS, o qual é chamado de Roadmap (Conforto; Amaral; Silva, 2011), com foco em pesquisas nos temas “reciclagem de baterias íon-lítio” e “viabilidade econômica”. Entre as bases de dados Periódicos Capes, Google Acadêmico, Web of Science, IEEE e ScienceDirect, foi concluído que a ScienceDirect era a que melhor contribuía para uma pesquisa mais refinada.

A combinação “*economic viability*” AND “*lithium ion*” AND “*recycling*” AND “*hydrometallurgy*”, termos também aplicados em português, satisfaz as expectativas de pesquisa, retornando uma amostra de 104 arquivos. Aplicando os filtros internos dos sites, “apenas artigos científicos” e “apenas arquivos dos últimos cinco anos”, o número da amostra foi reduzido para 78 artigos científicos.

A análise preliminar desses 78 artigos restringia-se à leitura somente do título e foram excluídos aqueles que não abordavam diretamente os temas relativos ao presente trabalho, quais sejam: reciclagem de LIBs e sua viabilidade econômica.

Da leitura dos títulos dos 78 artigos, restaram 15, os quais tinham componentes relacionados ao estudo e os filtros da RBS foram aplicados:

1º filtro - Leitura dos títulos, do resumo dos artigos encontrados e palavras-chave: amostra de 15 artigos.

2º filtro - Leitura da introdução e do resumo: amostra de sete artigos.

3º filtro - E por fim, a leitura completa da amostra final: amostra de dois artigos.

Após a seleção dos artigos, os dois selecionados discutem, respectivamente, a viabilidade econômica e os impactos ambientais do processo de reciclagem de LIBs pelo método de reciclagem descrito.

Com a conclusão da etapa da revisão de bibliografia, passa-se à análise da viabilidade econômica do processo, o que se faz pelo cálculo de indicadores financeiros (VPL, TIR e payback), o que foi sintetizado a partir do cálculo dos custos de cada etapa do processo.

A partir da análise do processo produtivo de reciclagem das LIBs, cabe fazer o estudo da viabilidade econômica tendo como cenário a revisão bibliográfica, seguindo

o procedimento indicado no capítulo da metodologia do presente trabalho e, na sequência, apresentar o exame da viabilidade econômica dedutivamente, a partir da coleta do custo dos materiais envolvidos na linha de produção.

3.2 RESULTADOS

A aplicação dos descritores foi feita nos sites de busca indicados e resultou em 104 artigos. Ao aplicar o filtro de artigos publicados nos últimos cinco anos, resultaram 78 artigos. Após a leitura dos títulos, restaram 15 artigos.

A amostra dos artigos da RBS, de acordo com cada etapa, sintetiza-se da seguinte maneira:

Quadro 2 — Aplicação do Filtro 1: leitura do título, resumo e palavras-chave

	Título	Autores	Aplicabilidade	Justificativa
1	Panorama da reciclagem de pilhas e baterias no Brasil e no mundo	ROMÃO (2020)	Sim	Trata-se de estudo que fez revisão bibliográfica para analisar a viabilidade econômica da reciclagem de pilhas e baterias, de modo a demonstrar qual é mais vantajosa.
2	Comparação entre mineração e reciclagem de cobre: aspectos ambientais, econômicos e tecnológicos juntamente com a utilização de IA	LI (2025)	Não	O estudo não trata das LIBs.
3	Lítio no Brasil: Aspectos geológicos, tecnológicos e mercadológicos deste novo mineral estratégico	VIGLIO (2024)	Não	A pesquisa não trata da viabilidade econômica da reciclagem das LIBs, limitando-se à análise de outros aspectos do lítio.

4	Baterias sustentáveis no Brasil: perspectivas químicas e ambientais	PAULA (2025)	Não	O estudo trata apenas das perspectivas químicas e ambientais das baterias sustentáveis, não abrangendo as LIBs.
5	Uso de veículos elétricos no transporte de cargas: avaliação das baterias de íons de Lítio em fim de vida com base nos conceitos da EC	LIMA e COUTINHO (2021)	Não	O objetivo do estudo é avaliar as LIBs no fim da vida com base nos conceitos de economia circular e não inclui a análise de viabilidade econômica da reciclagem desse material.
6	Bioextração de metais provenientes do lixo eletrônico empregando biolixiviação	FLORINTINO (2024)	Não	O estudo trata da recuperação de metais presentes no lixo eletrônico por meio da biolixiviação, não abordando a viabilidade da reciclagem das LIBs.
7	Bioextração de metais provenientes do lixo eletrônico empregando biolixiviação	VINHAL (2023)	Não	O estudo trata da reciclagem de <i>Led Emitting Diodes</i> , não tratando das LIBs, apesar de mencionar que a reciclagem desse material também se dá por procedimento hidrometalúrgico.
8	Veículos elétricos e sustentabilidade: uma análise comparativa do impacto ambiental e energético em relação aos veículos de combustão interna	SILVA (2025)	Não	A pesquisa não se coaduna com o tema aqui proposto e restringe-se ao estudo da comparação do impacto ambiental e energético dos veículos com combustão interna.
9	Valorização das baterias de íons lítio em fim de vida de veículos elétricos	MAGDALON (2021)	Sim	O título e as palavras-chave são relativos a esse estudo: trata da reciclagem das LIBs.
10	Hidrometalurgia do Lítio - Obtenção de um composto de lítio a partir de	LACERDA (2020)	Não	As palavras-chave e o título não tratam do tema desse estudo, tornando-se inviável sua utilização para compor a pesquisa.

	concentrados de Lepidolite			
11	Proposta de um sistema de descarga de baterias de íon lítio visando a sua reciclagem	MARTINS (2022)	Sim	O artigo trata das LIBs e sua reciclagem.
12	Emerging Processes for Sustainable Li-Ion Battery Cathode Recycling	BHATTACHARYYA et al (2025)	Sim	A pesquisa trata da reciclagem das LIBs e foca na análise da viabilidade ambiental e econômica do processo.
13	Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments	MOSSALI et al. (2025)	Sim	O estudo traz à tona as oportunidades e desafios dos processos de reciclagem das LIBs.
14	Life cycle economicviability analysis of battery storage in electricity market	YANG et al. (2023)	Sim	A pesquisa faz a análise de viabilidade econômica do ciclo de vida de armazenamento de baterias no mercado de eletricidade.
15	Co-products recovery does not necessarily mitigate environmental and economic tradeoffs in lithium-ion battery recycling	CAO et al. (2023)	Sim	O estudo aponta que recuperar subprodutos ou materiais secundários durante a reciclagem de baterias de íon-lítio (como metais ou compostos que não são o principal alvo, por exemplo, cobre, alumínio ou lítio residual) não garante que os impactos ambientais e os custos econômicos da reciclagem sejam reduzidos.

Fonte: Autora, 2025.

Quadro 3 — Aplicação do Filtro 2: leitura da introdução e conclusão

	Título	Autores	Aplicabilidade	Justificativa
1	Panorama da reciclagem de pilhas e baterias no Brasil e no mundo	ROMÃO (2020)	Não	O estudo aborda os métodos de reciclagem das pilhas e baterias, não se restringindo apenas às LIBs. Além disso, não tratou de aspectos econômicos dos procedimentos.
2	Valorização das baterias de íons lítio em fim de vida de veículos elétricos	MAGDALON (2021)	Não	O estudo não demonstrou aspectos econômicos da reciclagem das LIBs, apesar de indicar que reciclá-las garante maior sustentabilidade e viabiliza a produção de outras baterias, retornando-as para a cadeia de valor.
3	Proposta de um sistema de descarga de baterias de íon lítio visando a sua reciclagem	MARTINS (2022)	Não	O artigo trata das LIBs e sua reciclagem, mas não aborda os custos desse procedimento. O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema para descarga de energia residual das LIBs que fosse economicamente viável, segura e ambientalmente responsável.
4	Emerging Processes for Sustainable Li-Ion Battery Cathode Recycling	BHATTACHARYYA et al (2025)	Não	O estudo foca nos tipos de reciclagem de LIBs, indicando que esse procedimento seria uma forma de viabilizar a economia circular das baterias.

5	Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments	MOSSALI <i>et al.</i> (2025)	Não	O estudo traz à tona as oportunidades e desafios dos processos de reciclagem das LIBs, mas não aborda aspectos econômicos do procedimento.
6	Life cycle economic viability analysis of battery storage in electricity market	YANG <i>et al.</i> (2023)	Sim	O artigo
7	Co-products recovery does not necessarily mitigate environmental and economic tradeoffs in lithium-ion battery recycling	CAO <i>et al.</i> (2023)	Sim	O estudo aponta que recuperar subprodutos ou materiais secundários durante a reciclagem de baterias de íon-lítio (como metais ou compostos que não são o principal alvo, por exemplo, cobre, alumínio ou lítio residual) não garante que os impactos ambientais e os custos econômicos da reciclagem sejam reduzidos.

Fonte: Autora, 2025.

Após a aplicação do segundo filtro, apenas dois artigos foram selecionados para compor o estudo:

Quadro 4 — Aplicação do Filtro 3: leitura completa

	Título	Autores	Aplicabilidade	Justificativa
1	Life cycle economic viability analysis of battery storage in electricity market	YANG <i>et al.</i> (2023)	Sim	A pesquisa tem um tópico específico sobre viabilidade econômica, que pode ser utilizado para esse trabalho.
2	Co-products recovery does not necessarily mitigate environmental and economic tradeoffs in lithium-ion battery recycling	CAO <i>et al.</i> (2023)	Sim	Indica que a viabilidade econômica de reciclagem de baterias, inclusive as íon-lítio, depende de diversos fatores e que não é automaticamente vantajoso recicla-las, visto que, a depender da reciclagem, o custo pode ser alto, o consumo de energia elevado e há impactos ambientais, independentemente do reaproveitamento dos objetos de reciclagem.

Fonte: Autora, 2025.

4 METODOLOGIA

Para Yang *et al.* (2023), a viabilidade econômica do armazenamento de energia por meio de LIBs é um dos fatores determinantes para a expansão de projetos de mobilidade elétrica e integração de fontes renováveis ao sistema elétrico. A análise da viabilidade econômica envolve a avaliação das receitas obtidas, dos custos operacionais e fixos, bem como da depreciação das baterias ao longo do tempo. Entre as tecnologias mais estudadas, destacam-se as baterias de Óxido de Lítio e Cobalto (LCO) e NMC, cada uma apresentando características distintas quanto à densidade energética, custo de aquisição e vida útil.

Principais aspectos abordados por Yang *et al.* (2023) incluem:

1. Estrutura de custos:

- Custos fixos: aquisição das baterias, construção da estação de armazenamento e receitas esperadas com reciclagem ao fim da vida útil.
- Custos variáveis: operação, manutenção e degradação do equipamento, influenciados pelo uso diário nos mercados de energia.

2. Fontes de receita:

- Provenientes principalmente de serviços auxiliares, como regulação de frequência, reserva girante e deslocamento de carga, sendo os dois primeiros os de maior retorno financeiro.

3. Métricas de rentabilidade:

- A análise do fluxo de caixa anual, considerando degradação de até 20% da capacidade inicial, permite estimar a Taxa Interna de Retorno (TIR).
- Para baterias LFP, a TIR varia entre 35,90% e 40,78%; para as NMC, entre 21,49% e 25,07%.

4. Comparativo entre tecnologias:

- As LFP apresentam maior atratividade econômica devido ao menor custo inicial e maior durabilidade, ainda que com densidade energética ligeiramente inferior.
- As NMC, embora ofereçam maior densidade, têm custo de aquisição mais elevado, o que reduz seu retorno financeiro.

5. Sensibilidade e robustez:

- Flutuações nos preços da energia e nos custos das baterias impactam diretamente a receita e a TIR.
- Ainda sob condições variáveis, os projetos analisados demonstram robustez financeira, com retornos superiores a investimentos tradicionais, como títulos de renda fixa.
- A perspectiva de receitas advindas da reciclagem tende a melhorar ainda mais a rentabilidade futura.

Em síntese, Yang *et al.* (2023) evidenciam que o investimento em LIBs é viável atualmente, com as LCO sendo particularmente atrativas para armazenamento em larga escala. A combinação de redução de custos, oportunidades de receita em serviços auxiliares e potencial de reciclagem posiciona essas tecnologias como solução estratégica para o armazenamento de energia e a sustentabilidade do setor elétrico.

Cao *et al.* (2023) analisaram que a reciclagem de LIBs usadas enfrenta desafios contínuos quanto à viabilidade ambiental e econômica, o que pode potencialmente influenciar a estabilidade do fornecimento de baterias. No estudo, analisaram-se os impactos ambientais e econômicos de um processo de hidrometalurgia amplamente utilizado para a reciclagem de LIBs usadas, por meio de abordagens baseadas em ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) e LCC (Análise do Custo do Ciclo de Vida).

Principais pontos:

1. Reciclagem de co-produtos: limitações ambientais e econômicas
 - A recuperação de co-produtos nem sempre resulta na mitigação de impactos ambientais.
 - A reciclagem de co-produtos não aumentou significativamente o lucro geral do processo.
2. Estratégias para melhoria da viabilidade
 - Seletividade na reciclagem: repensar quais componentes devem ser priorizados é fundamental para reduzir impactos e aumentar a rentabilidade.
 - Otimização de rendimento: melhorar a eficiência na recuperação dos produtos finais.
 - Substituição de extrativos: uso de alternativas ecológicas pode reduzir impactos ambientais e tornar a reciclagem de co-produtos mais viável.

Em suma, ainda que se consiga extrair esses co-produtos, isso não elimina os dilemas ou compromissos entre economia e meio ambiente: a reciclagem ainda pode ser cara, consumir muita energia ou gerar impactos ambientais, independentemente do reaproveitamento desses materiais.

Os resultados permitem que pesquisadores e formuladores de políticas otimizem processos mais limpos, com custos ambientais acessíveis, e alcancem uma reciclagem eficiente de LIBs. No futuro, o apoio governamental e a conscientização pública sobre proteção ambiental serão essenciais para fortalecer iniciativas de reciclagem eficientes baseadas no mercado e a gestão de LIBs do “berço ao túmulo” (Cao *et al.*, 2023).

Foi demonstrado que o procedimento pode não ter viabilidade econômica ou apresentar lucro. No entanto, considerando que a falta de reciclagem das LIBs é agressiva ao meio ambiente, reciclá-las é boa alternativa. A viabilidade econômica depende da tecnologia de reciclagem utilizada. Na proposta apresentada pelo CAST, de hidrometalurgia, foi observado que seria mais vantajoso economicamente reciclar do que retirar os metais do solo.

Apesar de os trabalhos de Yang *et al.* (2023) e Cao *et al.* (2023) evidenciarem limitações econômicas e ambientais no processo de reaproveitamento de LIBs, a literatura converge para a compreensão de que a reciclagem é, em última instância, um caminho inevitável para a sustentabilidade do setor.

Mesmo quando os lucros diretos não se mostram expressivos, a recuperação de metais estratégicos, como lítio, níquel, cobalto e manganês, evita a extração mineral em larga escala, reduz a dependência de cadeias globais instáveis e contribui para a diminuição de impactos ambientais associados à mineração.

No caso do processo hidrometalúrgico proposto por Santos *et al.* (2021), é possível inferir que ele apresenta vantagens competitivas frente à extração primária. A possibilidade de recuperar metais de alto valor com menor consumo energético e menor geração de resíduos tóxicos, quando comparado à mineração tradicional, reforça sua atratividade nos médio e longo prazos. Sob essa perspectiva, a reciclagem torna-se economicamente justificável, especialmente em cenários de alta demanda por matérias-primas críticas e de políticas públicas que internalizem os custos ambientais da mineração convencional.

Portanto, a viabilidade econômica da reciclagem de LIBs deve ser compreendida em um contexto ampliado: se, por um lado, a rentabilidade direta pode

variar conforme a tecnologia empregada, os preços de mercado e a eficiência dos processos, por outro, os ganhos ambientais, a segurança no abastecimento de insumos e a redução de passivos ambientais constituem elementos decisivos para a consolidação da reciclagem como estratégia indispensável à transição energética.

4.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise de viabilidade econômica de um projeto requer a compreensão dos seus custos, receitas e das métricas financeiras que avaliam seu retorno e risco. Segundo Gitman (2010), esse processo é fundamental para a alocação eficiente de capital.

4.1.1 Estrutura de Custos e Investimentos

O Investimento Inicial (CapEx) refere-se aos dispêndios necessários para a aquisição e instalação dos ativos permanentes da planta antes do início das operações. Inclui a compra de equipamentos (reatores, fornos, máquinas de corte), instalações físicas e adaptações. Neste estudo, o investimento inicial foi levantado através da cotação de todos os equipamentos listados nas etapas produtivas.

Os Custos Operacionais (OpEx) são os custos recorrentes para manter a planta em funcionamento. Dividem-se em:

- I. Custos Fixos: Despesas que não variam com o volume de produção no curto prazo. Incluem salários de funcionários administrativos e de supervisão, aluguel, seguros e manutenção preventiva;
- II. Custos Variáveis: Despesas diretamente proporcionais ao volume de produção. Incluem reagentes químicos, energia elétrica consumida nas operações, água, embalagens e mão de obra direta.

4.1.2 Métricas de Viabilidade Econômica

O Ponto de Equilíbrio (*Break-even Point*) define o nível de produção e vendas no qual a receita total se iguala ao custo total, resultando em lucro zero. Abaixo deste ponto, há prejuízo; acima, lucro. É calculado para entender o risco operacional mínimo do negócio (Gitman, 2010). O ponto de equilíbrio em unidades (BEQ) é dado por:

$$BEQ = \frac{\text{Custo Fixo Total}}{(\text{Preço de Venda Unitário} - \text{Custo Variável Unitário})}$$

O *Payback* Descontado dita o tempo necessário para que o somatório dos fluxos de caixa descontados (trazidos a valor presente) iguale o investimento inicial. Diferente do *payback* simples, considera o valor do dinheiro no tempo, sendo mais preciso. Um *payback* mais curto indica retorno mais rápido e menor risco (Assaf Neto, 2014).

Já o Valor Presente Líquido (VPL) é a diferença entre o valor presente das entradas de caixa e o valor presente das saídas de caixa do projeto. Um VPL positivo indica que o projeto é economicamente viável, gerando valor para a empresa. O VPL é calculado pela fórmula:

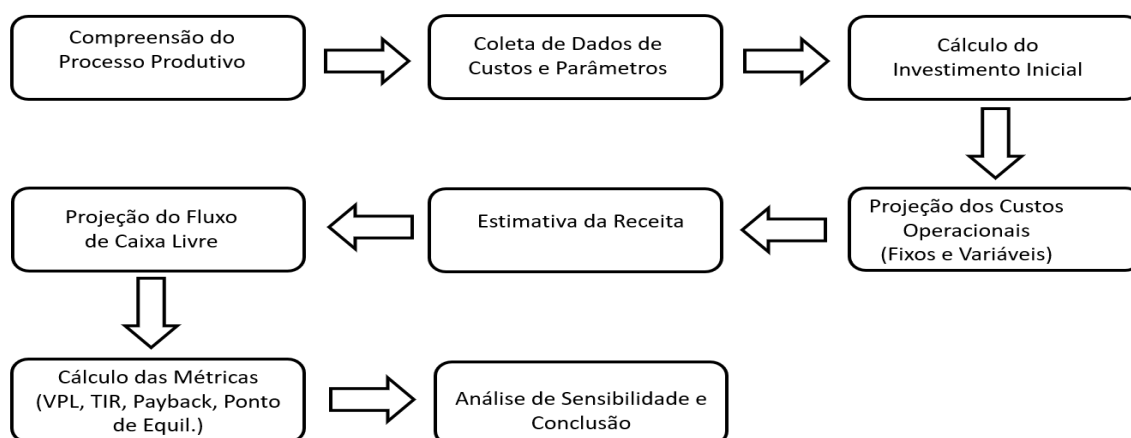
$$VPL = \sum \left[\frac{FCt}{(1+i)^t} \right] - \text{Investimento Inicial}$$

Onde FCt é o fluxo de caixa no período t , e i é a taxa de desconto.

Taxa Interna de Retorno (TIR) mostra a taxa de desconto que iguala o VPL do projeto a zero. Representa a rentabilidade percentual esperada do investimento. O projeto é considerado atrativo se a TIR for superior à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) da empresa, que reflete o custo de oportunidade do capital (Gitman, 2010).

A sequência metodológica para a aplicação desses conceitos é ilustrada no fluxograma abaixo.

Figura 3 — Fluxograma de sequência metodológica.



4.1.3 Processo de Reciclagem Hidrometalúrgica

A tecnologia analisada é a desenvolvida por Santos *et al.* (2021), que compreende uma sequência de operações unitárias em escala laboratorial, conforme detalhado na Seção 3.1 deste trabalho. O processo inclui etapas como descarga elétrica, desmontagem, corte, banho e filtração, visando à recuperação de óxidos metálicos (como os de lítio, cobalto, níquel e manganês) e grafite. A compreensão detalhada desta rota é essencial para identificar todos os insumos, equipamentos e mão de obra envolvidos, que são a base para a estimativa de custos.

Os tempos e a capacidade produtiva de cada etapa do processo foram baseados nos estudos de escalonamento industrial realizados por Escarabelin (2021). Estes parâmetros são cruciais para determinar a capacidade produtiva máxima da planta e, conseqüentemente, o volume de produção anual utilizado no cálculo da receita.

4.1.4 Coleta de Custos

Os custos de capital (equipamentos) e operacionais (reagentes, insumos e equipamentos de utilidade) foram levantados entre outubro e novembro de 2025, por meio de pesquisa de preços em fontes primárias especializadas. Para equipamentos, reagentes e insumos laboratoriais, os valores foram cotados diretamente nos catálogos online de fornecedores do setor no Mercado Livre (MERCADO LIVRE, 2025) e na Sigma-Aldrich (SIGMA-ALDRICH, 2025).

Os custos com serviços de utilidade pública basearam-se nas tarifas médias oficiais. A tarifa de energia elétrica foi obtida junto à concessionária CPFL Paulista (CPFL PAULISTA, 2025), e a tarifa de água e esgoto junto à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP (SABESP, 2025).

As provisões para salários e encargos sociais foram calculadas com base na média salarial brasileira para os cargos pertinentes ao projeto. O valor para o cargo de Operador de Máquinas Fixas e Operadoras foi consultado no portal de dados salariais Salario.com.br (SALARIO.COM.BR, 2025), enquanto o valor para Técnico em Química foi obtido na mesma fonte (SALARIO.COM.BR, 2025).

5 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise da viabilidade econômica decorre da análise do custo de todas as etapas e do cálculo das métricas, o que será exposto neste capítulo.

5.1 PROCESSAMENTO

A Tabela 2 apresenta os custos associados à etapa de processamento, contemplando os principais insumos, equipamentos e materiais necessários para a execução dessa fase do processo.

Tabela 2 — Custos da etapa de processamento

Entrada (Insumos e Equipamentos)	Produto / Especificação	Preço (R\$)	Fonte da Cotação
Béquer de vidro borossilicato (1 L)	Becker de vidro 1000 mL, forma baixa	22,15	MERCADO LIVRE (2025).
Agitador magnético com aquecimento	Misturador magnético 100–240V, 3000 rpm	288	
Barra magnética de agitação	Barra magnética lisa 5×10 mm	7,15	
Reator químico (laboratorial)	Reator em vidro borossilicato 2 L com tampa	550	
Termômetro digital	Termômetro infravermelho portátil	45	
Funil de vidro	Funil para filtração química	18	
Suporte universal de bancada	Suporte universal para bureta / funil	59,59	
Papel de filtro	Filtro de papel Melitta 103 (30 unid.)	5,59	

Suporte para filtro	Suporte de coador 15×16 cm	16,45
Solução de NaOH (hidróxido de sódio)	NaOH 1,5 mol/L (100 mL)	95
Água destilada	Água deionizada 5 L	25
Cuba de aço inox	Cuba para imersão / lavagem química	70
Balança de precisão	Balança digital 10 kg	10,5
Total		R\$1212,43

Fonte: Autora, 2025.

5.2 DESMONTE

A Tabela 3 detalha os custos referentes à etapa de desmonte, incluindo os equipamentos e ferramentas utilizados para a separação inicial dos componentes.

Tabela 3 — Custos da etapa de Desmonte

Entrada	Produto / Especificação	Preço (R\$)	Fonte da Cotação
Serra circular	Micro Mini Retifica Lixadeira Maleta Com 62 Acessórios	114,95	MERCADO LIVRE (2025).
Mesa (prototipagem)	Mesa De Serviço Industrial Inox 130x55	469,30	
Alicate de corte	Mtx Alicate Corte Diagonal Nickel 6 Pol. (160Mm) Niquelado Cabo Dupla Injeção	14,99	
Alicate de pressão	Alicate De Pressão 10 Jomarca Reto 6546	20,44	
Total		R\$ 619,68	

Fonte: Autora, 2025.

5.3 CUSTOS DA ETAPA DE CORTE

A Tabela 4 apresenta os custos de entrada da etapa de corte do cátodo, considerando os insumos, materiais e equipamentos empregados nesse procedimento.

Tabela 4 — Custos da etapa de Corte, entrada (Cátodo)

Entrada	Produto / Especificação	Preço (R\$)	Fonte da Cotação
Tesoura	Tesoura Para Uso Geral Western Preto	11,38	MERCADO LIVRE (2025).
Pinça	Pinça Clínica Para Algodão Aço Inox - Cooperflex Prime	17,9	
Peneira	Peneira Inox Cozinha P Polvilhar Coar Escorrer Macarrão 20cm	18,05	
Papel de filtro	Filtro de Papel 103 Melitta 30 Unidades	5,59	
suporte para o filtro	Suporte Para Coado 01 15x16cm	16,45	
Suporte universal	Suporte Universal Para Bureta	59,59	
Total		R\$ 128,95	

Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 5 demonstra os custos associados aos materiais obtidos como saída da etapa de corte do cátodo.

Tabela 5 — Custos da etapa de Corte, saída (Cátodo)

Saída	Produto / Especificação	Preço (R\$)	Fonte da Cotação
Alumínio	Alumínio Perfil Natural Limpo	R\$9,50kg/0,0095g	MERCADO LIVRE (2025).
Lítio-cobalto-níquel-manganês	Lithium cobalt oxide	R\$1.655,00 - 25g/R\$66,20g	Sigma-Aldrich (2025)
Total		R\$ 1.664,50	

Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 6 apresenta os custos de entrada da etapa de corte do ânodo, contemplando os principais insumos utilizados no processo.

Tabela 6 — Custos da etapa de Corte, entrada (Ânodo)

Entrada	Produto / Especificação	Preço	Fonte da Cotação
NaOH - Hidroxido de sódio 1,5Mol/L - 59,9955g	Hidróxido de sódio	R\$95,00 - 100ml / R\$56,99 - 59,9955g	Sigma-Aldrich (2025)
Água		R\$ 121,00	SABESP (2024)

Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 7 apresenta os custos dos materiais resultantes da saída da etapa de corte do ânodo.

Tabela 7 — Custos da etapa de Corte, saída (Ânodo)

Saída	Produto / Especificação	Preço (R\$)	Fonte da Contação
Cobre	Cobre	R\$0,052 g	Sigma-Aldrich (2025)
Graphite	Graphite	R\$557,00 - 25g/R\$22,28g	
Total		R\$ 557,05	

Fonte: Autora, 2025.

5.4 CUSTOS DA ETAPA DE DESCARGA

A Tabela 8 apresenta os custos relacionados à etapa de descarga, incluindo os materiais, equipamentos e dispositivos necessários para a realização segura dessa fase do processo.

Tabela 8 — Custos da etapa de Descarga

Produto / Especificação	Preço (R\$)	Fonte da Cotação
Sulfato de Magnésio	R\$286,00 - 250g / R\$17,38 - 15,1908g	Sigma-Aldrich (2025)
Barra Magnética Lisa 5x10mm (incluso na placa de agitação)	7,15	MERCADO LIVRE (2025).
BECKER DE VIDRO GRADUADO 1000ML - FORMA BAIXA	22,15	
Agitador Misturador Magnético 100-240v 3000rpm Bivolt C/ Nfe	288	
Balança De Cozinha Digital de Alta Precisão 10kg Para Dieta e Nutrição Alimentação Regular	10,5	
Lã De Aço Bombril Pacote 60g Com 8 Unidades	3,59	
Bomba Submersa Bombinha Motor Para Aquário Fonte Água Bebedouro Pet 220l/h Bivolt	26,9	
Espátula Com Colher Em Chapa de Aço Inox 12cm	19,21	
Pote de 3 L, Plasútil, Branco	19,9	
Notebook Positivo Vision C14 Lumina BAR Celeron 4GB 128GB eMMC Tela 14 Polegadas HD Antirreflexo Windows 11 Tecla Link	1340,1	MERCADO LIVRE (2025).
Kit Maker Para Arduino – Eletrogate	313,39	
Total	R\$ 2.354,27	

Fonte: Autora, 2025.

5.5 CUSTOS DA ETAPA DE LIMPEZA

A Tabela 9 apresenta os custos da etapa de limpeza, abrangendo os materiais e equipamentos utilizados para a lavagem, secagem e preparo final dos componentes.

Tabela 9 — Custos da etapa de Limpeza

Material	Produto	Preço (R\$)	Fonte da Cotação
Água destilada	Água destilada deionizada 5 L	25,00	MERCADO LIVRE (2025).
Tanque de lavagem	Tanque em PVC industrial 10 L	98,00	
Estufa de secagem	Estufa elétrica digital até 80 °C	690,00	
Bandejas metálicas	Bandeja em alumínio 30x40 cm	32,00	
Cronômetro digital	Cronômetro Digital Portátil	20,00	
Termômetro digital	Termômetro infravermelho portátil	45,00	
Total		R\$ 910,00	

Fonte: Autora, 2025.

5.5.1 Custos Operacionais

Para a operação contínua do sistema, devem ser considerados os custos operacionais fixos e recorrentes, que independem do volume produzido. Esses custos incluem despesas com pessoal, consumo de energia elétrica e manutenção preventiva dos equipamentos. A estimativa mensal é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 — Custos operacionais

Descrição	Custo Total Estimado (R\$)	Fonte da Cotação
Salário de 1 Operador	R\$ 2.640,00	Salario.com.br (2025)
Energia Elétrica	R\$ 200,00	Média concessionária CPFL
Manutenção Preventiva	R\$ 150,00	Estimativa (5% do CapEx/ano)
Total	R\$ 2.990,00	

Fonte: Autora, 2025.

5.6 RESUMO DOS CUSTOS

Para uma visão consolidada dos custos mensais da operação, a Tabela 11 apresenta o somatório dos custos diretos de processamento e dos custos operacionais fixos, considerando uma produção de 55 bateladas mensais, bem como a participação percentual de cada componente no custo total.

Tabela 11 — Resumo dos custos: 55 bateladas (mês)

Etapa	Custo Total Estimado	% do Custo Total
	(R\$)	
Processamento	R\$ 1.212,43	13,80%
Desmonte	R\$ 619,68	7,05%
Corte	R\$ 1.400,97	15,94%
Descarga	R\$ 2.354,27	26,79%
Limpeza	R\$ 910,00	10,36%
Água	25m ² (R\$ 70,00)	0,80%
Custos Operacionais	R\$ 2.990,00	34,04%
Total	R\$ 8.787,35	100%

Fonte: Autora, 2025.

5.7 CÁLCULOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA

5.7.1 Estimativa da Receita

A receita foi estimada considerando a capacidade produtiva de 132.000 baterias/ano (ou 660 bateladas/ano) e considerando 100% de eficiência, conforme definido pelos parâmetros operacionais otimizados. O preço dos produtos recuperados (óxidos metálicos) foi estabelecido aplicando um markup de 150% sobre o Custo Total Unitário (CTu), estratégia comum para novos mercados e tecnologias.

Tabela 12 — Custos fixos

Descrição	Custo Mensal (R\$)
Salário de 3 Operadores	R\$ 2.640,00 x 3 = R\$7.920,00
Energia Elétrica (Base)	R\$ 200,00
Manutenção Preventiva	R\$ 150,00
Total Custos Fixos Mensais	R\$ 8.270,00
Total Custos Fixos Anuais	R\$ 99.240,00

Fonte: Autora, 2025.

Tabela 13 — Custos variáveis

Descrição	Custo/Batelada (R\$)
Hidróxido de Sódio (NaOH)	R\$ 56,99
Sulfato de Magnésio	R\$ 17,38
Água Destilada	R\$ 25,00
Energia Elétrica (Operacional)	R\$ 12,70
Total Custo/Batelada	R\$ 112,07
Total Custos Variáveis Anuais	R\$ 73.966,20

Fonte: Autora, 2025.

Custo Total Unitário (CTu) por bateria:

$$CTu = \frac{\text{Custo total Anual}}{\text{Quantidade Total de Baterias}}$$

$$CTu = \frac{173.206,20}{132.000}$$

$$CTu = R\$ 1,31$$

Preço de venda:

$$\text{Preço de Venda} = CTu \times (1 + \text{Markup})$$

$$\text{Preço de Venda} = 1,31 \times (1 + 1,5)$$

$$\text{Preço de Venda} = R\$ 3,28$$

Margem de Contribuição Unitária:

$$\text{Margem de Contribuição Unitária} = \text{Preço de Venda} - CTu$$

$$\text{Margem de Contribuição Unitária} = 3,28 - 1,31$$

$$\text{Margem de Contribuição Unitária} = R\$ 1,97$$

Com base nos dados de custos e receitas, e considerando um horizonte de 5 anos e uma TMA de 10% ao ano, foram calculadas as seguintes métricas:

Ponto de Equilíbrio:

$$BEQ = \frac{\text{Custo Fixo Total}}{(\text{Preço de Venda Unitário} - \text{Custo Variável Unitário})}$$

$$BEQ = \frac{99.240}{(3,28 - (73.966,20/132.000))}$$

$$BEQ = 36.485 \text{ baterias/ano}$$

$$BEQ(\%) = \frac{36.458}{132.000} * 100 = 27,6\%$$

Receita Anual:

$$\text{Receita Anual} = 3,28 \times 132.000$$

$$\text{Receita Anual} = \text{R\$ } 432.960,00$$

Lucro Anual:

$$\text{Lucro Anual} = \text{Receita} - \text{Custo Total}$$

$$\text{Lucro Anual} = 432.960 - 173.206,20$$

$$\text{Lucro Anual} = \text{R\$ } 259.753,80$$

Valor Presente Líquido:

$$VPL = \sum \left[\frac{FCt}{(1+i)^t} \right] - \text{Investimento Inicial}$$

$$VPL = \left[\frac{259.754}{(1,10)^1} \right] + \left[\frac{259.754}{(1,10)^2} \right] + \left[\frac{259.754}{(1,10)^3} \right] + \left[\frac{259.754}{(1,10)^4} \right] + \left[\frac{259.754}{(1,10)^5} \right] - 50.000$$

$$VPL = 236.140 + 214.673 + 195.156 + 177.415 + 161.286 - 50.000$$

$$VPL = 984.670 - 50.000$$

$$VPL = \text{R\$ } 934.670$$

1,10 representa a **taxa de desconto de 10%** mencionado como TMA (Taxa Mínima de Atratividade).

Tabela 14 — Projeção de payback

Ano	Fluxo Caixa	Valor Presente	VP Acumulado
0	-R\$ 50.000,00	-R\$ 50.000,00	-R\$ 50.000,00
1	R\$ 259.754,00	R\$ 236.140,00	R\$ 186.140,00
2	R\$ 259.754,00	R\$ 214.673,00	R\$ 400.813,00
3	R\$ 259.754,00	R\$ 195.156,00	R\$ 595.969,00
4	R\$ 259.754,00	R\$ 177.415,00	R\$ 773.384,00
5	R\$ 259.754,00	R\$ 161.286,00	R\$ 934.670,00

Fonte: Autora, 2025.

$$Payback = \frac{50.000}{236.140} = 0,212 \text{ anos} = 3 \text{ meses}$$

Payback Descontado = 3 meses

Tabela 15 — Taxa Interna de Retorno (TIR)

Taxa de Desconto	VPL Calculado
10%	R\$ 934.670,00
300%	R\$ 32.357,00
500%	R\$ 2.143,00
508%	R\$ 307,00
509,5%	R\$ 20,00
509,66%	R\$ 0,00

Fonte: Autora, 2025.

5.8 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A análise com os valores corrigidos mantém a viabilidade econômica excelente do projeto:

- I. Ponto de Equilíbrio (27,6%): a planta atinge o equilíbrio financeiro ao operar com 27,6% de sua capacidade. Apesar de superar a margem conservadora de 20%, o indicador permanece em nível considerado aceitável, refletindo uma estrutura de custos com razoável resiliência operacional.;
- II. Payback Descontado 3 meses): O investimento é recuperado em apenas 3 meses, demonstrando retorno extremamente rápido;
- III. VPL (R\$ 934.670: Valor Presente Líquido fortemente positivo indica criação significativa de valor econômico; e

- IV. TIR (509,66% a.a.): Taxa Interna de Retorno excepcionalmente alta, muito superior à TMA de 10%, confirmando alta rentabilidade.

O projeto de reciclagem de baterias de íon-lítio apresenta viabilidade econômica robusta com retorno rápido, baixo risco e alta rentabilidade, justificando o investimento proposto.

5.8.1 Análise das Métricas da Viabilidade

Com o ajuste correto dos custos (anuais fixos e mensais variáveis), o cenário financeiro muda completamente. O projeto passa de inviável (quando se considerava o custo por batelada repetido mensalmente) para altamente rentável.

A receita anual, próxima de R\$ 433 mil, cobre amplamente os custos totais, resultando em um fluxo de caixa operacional líquido expressivo. O investimento inicial seria recuperado em menos de quatro meses, e o VPL positivo demonstra geração significativa de valor ao longo dos cinco anos projetados.

Contudo, é importante observar que esse resultado parte de uma premissa laboratorial em que a recuperação de materiais e a escala de operação permanecem constantes durante todo o ano, o que pode ser otimista. Na prática, haveria oscilações de eficiência e custos variáveis adicionais (como manutenção, reagentes e descarte químico). Ainda assim, o modelo indica que, mantidas as proporções de custo anual e receita calculada, o projeto é economicamente viável e financeiramente atrativo.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou a viabilidade econômica da reciclagem de LIBs, com ênfase no processo hidrometalúrgico, considerando a crescente demanda global por soluções de armazenamento de energia e os desafios ambientais e econômicos associados ao descarte desses dispositivos. Por meio da RBS, identificou-se que, embora a reciclagem de LIBs seja essencial para a sustentabilidade da cadeia produtiva, ainda existem barreiras significativas para sua implementação em larga escala, especialmente no que se refere aos custos operacionais e à complexidade do processo de recuperação dos metais.

Os estudos analisados evidenciam que a reciclagem apresenta vantagens ambientais inquestionáveis, reduzindo a necessidade de extração mineral de lítio, níquel, cobalto e manganês, além de mitigar riscos de contaminação do solo e da água. Do ponto de vista econômico, embora a rentabilidade direta nem sempre seja elevada, a tendência de redução dos custos de tecnologia, aliada ao desenvolvimento de extrativos mais ecológicos e eficientes, indica um cenário de crescente competitividade para os próximos anos.

Nesse contexto, a proposta hidrometalúrgica do CAST demonstra potencial para se tornar economicamente vantajosa, sobretudo quando comparada à extração primária desses metais, especialmente em cenários de alta demanda e valorização das matérias-primas críticas.

Ademais, a análise desenvolvida demonstrou que o processo de reciclagem de LIBs é tecnicamente viável e economicamente promissor, sobretudo quando estruturado em um modelo de manufatura reversa contínua. O estudo permitiu identificar os custos por etapa, o consumo de recursos e o potencial de retorno financeiro a partir da recuperação de materiais de alto valor agregado.

O custo total por batelada de 200 baterias foi estimado em R\$ 262,00, incluindo insumos, reagentes, energia elétrica e água. O consumo médio mensal é de 660 kWh de energia e 2,5 m³ de água, o que representa um baixo impacto operacional. As etapas de descarga e corte concentraram os maiores custos, enquanto o processamento químico se mostrou a fase mais rentável, por recuperar óxidos metálicos e grafite de alto valor comercial.

Com base nos cálculos, a operação contínua de 55 bateladas mensais gera um fluxo de caixa positivo, resultando em retorno do investimento em

aproximadamente 3 meses, além de um VPL positivo e TIR superior à taxa mínima de atratividade de 10% a.a.

Conclui-se que a reciclagem de LIBs apresenta viabilidade econômica e relevância ambiental, sendo uma alternativa estratégica para o reaproveitamento de resíduos tecnológicos e para a consolidação de práticas sustentáveis na indústria.

7 REFERÊNCIAS

An, K. 2020. Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty. **Transportation Research, Part C**, v. 111, p. 572–587. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.009>.

Assaf Neto, A. **Finanças Corporativas e Valor**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2014.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 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: seção 1, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

BRASIL. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020**. Regulamenta o sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de que trata a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 13 fev. 2020.

Bradley, D.C., Stillings, L.L., Jaskula, B.W., Munk, LeeAnn, and McCauley, A.D., 2017, Lithium, chap. K of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States. **Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802**, p. K1–K21, <https://doi.org/10.3133/pp1802K>.

Cao, Y.; LI, L.; Zhang, Y.; Liu, Z.; Wang, L.; Wu, F.; You, J. Co-products recovery does not necessarily mitigate environmental and economic tradeoffs in lithium-ion battery recycling. **Resources, Conservation & Recycling**, 2023. Doi: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344922005225>. Acesso em: 25 ago. 2025.

CPFL PAULISTA. **Tarifas e Serviços: Tarifas de Energia Elétrica**. 2025. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br/para-sua-casa/tarifas-e-servicos/tarifas-de-energia-eletrica>. Acesso em: 10 nov. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2012/19/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de junho de 2012. Sobre resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (WEEE). **Jornal Oficial da União Europeia**, L 197, p. 38–71, 24 jul. 2012.

DOMINGUES, A. M. **Avaliação do ciclo de vida de cenários para reciclagem de baterias de íons lítio no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Bauru, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/80b7cc54-41e3-4d29-966f-8e28d68a1fc5/content>. Acesso em: 25 ago. 2025.

Escarabelin, M. A. **Proposta de Mapeamento de Fluxo de Valor para uma Planta de Reciclagem de Baterias de Íon-Lítio**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista, 2021.

FAPESP. **O desafio de reciclar baterias de lítio**. Fapesp [online], 2023. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-desafio-de-reciclar-baterias-de-litio/>. Acesso em: 02 set. 2025.

Fórum Econômico Mundial (FEM). **Global Battery Alliance**. A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation, 2019.

Ghane, K. A model and system for applying Lean Six sigma to agile software development using hybrid simulation. **Technology Management Conference (ITMC)**. IEEE International, 2014.

Gitman, L. J. **Princípios de Administração Financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

Green eletron.. Logística reversa: você realmente sabe o que é? **Green eletron** [online], 11 de fevereiro de 2020. Disponível em: <https://www.greeneletron.org.br/blog/logistica-reversa-voce-realmente-sabe-o-que-e/>. Acesso em 21 de fevereiro de 2020.

Habib, K.; Hansdóttir, S. T.; Habib, H. 2020. **Critical metals for electromobility: Global demand scenarios for passenger vehicles, 2015–2050**. Resources, Conservation and Recycling, v. 154. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104603>.

Hanus, D.; Revel, P.; Marulo, F.; Bauer, P. Aviation and the 4th industrial revolution: the prominent role of networks of excellence. Italian Association of Aeronautics and Astronautics. **XXIV International Conference**, Palermo, 18-22, September 2017.

Instituto Federal Alemão de Geociências e Recursos Naturais (BGR). **Germany Hopes to Mine Lithium, the White Gold of e-Mobility** (DW Top Stories/Business, 19 August 2019). Disponível em: www.dw.com/en/germany-hopes-to-mine-lithium-the-white-gold-of-e-mobility/a-50073822. Acesso em: 17 abr. 2020.

Labsynth. **Hidróxido de Sódio P.A.** Diadema, 2025. Disponível em: [link]. Acesso em: 15 mar. 2025.

Montgomery, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 10. Ed. Wiley, 2019.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). Acordo setorial para implantação de Sistema de Logística Reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes. **MMA** [online], 2019. Disponível em <https://www.mma.gov.br/images/Acordo%20Setorial/Acordo%20Setorial%20-%20Eletroeletr%C3%B4nicos.pdf>. Acesso em 17 abril 2020.

Michellini, A. **Baterias de Lítio**. Cotia: STA, 2020. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/ebookbateriasdelitio.pdf>. Acesso em: 01 set. 2025.

Petronas. Você já ouviu falar em manufatura reversa? Descubra as vantagens! **Petrona Inovação** [online], 2019. Disponível em: <https://inovacaoindustrial.com.br/manufatura-reversa/>. Acesso em 21 de fevereiro de 2020.

SABESP. **Tarifas de Água e Esgoto: Tarifas Vigentes**. 2025. Disponível em: <https://tarifas.sabesp.com.br>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SALARIO.COM.BR. Técnico em Química. **Salario** [online], São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.salario.com.br/profissao/operador-de-maquinas-fixas-em-geral-cbo-862150>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SANTOS, M. P. A technology for recycling lithium-ion batteries promoting the circular economy: the recyclib. Resources, Conservation and Recycling, Amsterdam, v.175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105863>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921004729>. Acesso em: 20 agosto 2025.

SIGMA-ALDRICH. **Site Institucional**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com>. Acesso em: 28 nov. 2024.

Silva, D. G.; Fonseca, T. H.; Sousa, L. A. **Análise do ciclo de vida das baterias íon-lítio e seu impacto no meio ambiente**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Processos Gerenciais) – Instituto Federal do Paraná, Paraná, 2020. Disponível em: <https://ifpr.edu.br/curitiba/wp-content/uploads/sites/11/2025/04/Douglas-e-Thiago-TCC-2024.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2025.

Smith, D. C. 2020. The importance of lithium in achieving a low-carbon future: opportunities galore, but coupled with key challenges for legal professionals. **Journal of Energy & Natural Resources Law**, 38:1, 1-4, <https://doi.org/10.1080/02646811.2020.1706821>.

Venegas, P.; Durana, G.; Zubia, J. Ocáriz, S. Advanced Monitoring Systems for Smart Tooling in Aeronautical Industry 4.0. **14th Quantitative InfraRed Thermography Conference**, 25 – 29 June 2018, Berlin, Germany.

Weissman, S. A.; Anderson, N. G. Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications. Org. **Process Res. Dev.**, 2015, 19, 11, 1605-1633. <https://doi.org/10.1021/op500169m>.

Womack, J. P.; Jones, D. T. **A mentalidade enxuta nas empresas**. 6. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

Yang Y, Ye Y, Cheng Z, Ruan G, Lu Q, Wang X, Zhong H. Life cycle economic viability analysis of battery storage in electricity Market. **Journal of Energy Storage**, 2023. Doi: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352152X23011970>. Acesso em: 20 ago. 2025.

Yin, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2015.