**Trilha 2: Métodos, Processos, Técnicas, Práticas e Ferramentas**

**GESTÃO DO CONHECIMENTO APLICADA AOS PROCEDIMENTOS DE RECICLAGEM DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS PARA PROMOVER A ECONOMIA CIRCULAR**

*KNOWLEDGE MANAGEMENT APPLIED TO ELECTRIC VEHICLE BATTERY RECYCLING PROCEDURES FOR PROMOTING THE CIRCULAR ECONOMY*

**Gabriel Simplício Lopes**

Mestrando. Universidade Federal do ABC (UFABC) – Brasil.

gabriel.simplicio@ufabc.edu.br.

**Sergio Ricardo Lourenço**

Doutor. Universidade Federal do ABC (UFABC) – Brasil.

sergio.lourenco@ufabc.edu.br.

**Geraldo Cardoso de Oliveira Neto**

Doutor. Universidade Federal do ABC (UFABC) – Brasil.

geraldo.neto@ufabc.edu.br.

**RESUMO**

O objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de um Modelo de Análise Comparativa para apoiar a tomada de decisão sobre os procedimentos de reciclagem de baterias de veículos elétricos (VEs) sob a ótica da Economia Circular (EC). Sua originalidade reside em abordar o desafio da reciclagem de baterias, tradicionalmente técnico, como um problema de Gestão do Conhecimento (GC), demonstrando um caso prático de aplicação de processos de GC para converter informação fragmentada em conhecimento acionável. A metodologia consistiu em um processo de GC estruturado em duas etapas: (1) uma Revisão Sistemática da Literatura, guiada pelo protocolo PRISMA, para externalizar o conhecimento disperso; e (2) a aplicação de um *framework* de análise híbrido (9R e RESOLVE) para combinar e codificar as informações em um formato comparativo. O principal resultado é um modelo de análise comparativa que sintetiza e estrutura os *trade-offs* entre os métodos de reciclagem (hidrometalurgia, pirometalurgia, reciclagem direta) para as principais químicas de baterias (NMC, NCA, LMO, LCO). A análise revelou que, no cenário atual, a hidrometalurgia representa a rota mais equilibrada para a circularidade da maioria das químicas. Como implicação prática, o modelo funciona como uma ferramenta de apoio à decisão para gestores e formuladores de políticas, facilitando a escolha de tecnologias que maximizam a circularidade e a sustentabilidade na cadeia de valor da eletromobilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gestão do Conhecimento, Economia Circular, Reciclagem de Baterias, Veículos Elétricos.

**ABSTRACT**

*The objective of this article is to present the development of a Comparative Analysis Model to support decision-making on recycling procedures for electric vehicle (EV) batteries from a Circular Economy (CE) perspective. Its originality lies in addressing the traditionally technical challenge of battery recycling as a Knowledge Management (KM) problem, demonstrating a practical case of applying KM processes to convert fragmented information into actionable knowledge. The methodology consisted of a structured KM process in two stages: (1) a Systematic Literature Review, guided by the PRISMA protocol, to externalize dispersed knowledge; and (2) the application of a hybrid analysis framework (9R and RESOLVE) to combine and codify the information into a comparative format. The main result is a Comparative Analysis Model that synthesizes and structures the trade-offs between recycling methods (hydrometallurgy, pyrometallurgy, direct recycling) for the main battery chemistries (NMC, NCA, LMO, LCO). The analysis revealed that, in the current scenario, hydrometallurgy represents the most balanced route to circularity for most chemistries. As a practical implication, the model functions as a decision-support tool for managers and policymakers, facilitating the choice of technologies that maximize circularity and sustainability in the electromobility value chain*.

**KEYWORDS:** *Knowledge Management, Circular Economy, Battery Recycling, Electric Vehicles.*

1. **INTRODUÇÃO**

A transição global para a eletromobilidade, impulsionada pela necessidade de descarbonizar o setor de transportes, representa um avanço significativo para a sustentabilidade. Contudo, esta evolução gera um desafio secundário de enorme magnitude: a gestão do crescente volume de baterias de íon-lítio em fim de vida (HARPER et al., 2019). Um modelo linear de produção e descarte é insustentável, tornando a implementação de uma Economia Circular (EC) — na qual os materiais são mantidos em ciclos de alto valor — um imperativo estratégico. A reciclagem eficaz é o pilar desta circularidade, porém, a escolha da rota tecnológica mais adequada é uma tarefa de alta complexidade (NEUMANN et al., 2022).

Este desafio tecnológico é, em sua essência, um problema de Gestão do Conhecimento (GC). A informação sobre os diferentes métodos de reciclagem (hidrometalurgia, pirometalurgia, reciclagem direta) e suas implicações para as diversas químicas de bateria (NMC, NCA, etc.) é vasta, técnica e fragmentada, existindo primariamente em um estado de conhecimento disperso na literatura acadêmica (VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ et al., 2019). Para que gestores, engenheiros e formuladores de políticas possam tomar decisões estratégicas, é necessário converter este conhecimento tácito e disperso em conhecimento explícito, codificado e acionável (DAVENPORT; PRUSAK, 1998). Este processo de conversão do conhecimento é o cerne da Gestão do Conhecimento eficaz (NONAKA; TAKEUCHI, 1995).

A lacuna identificada, portanto, não é a ausência de tecnologias de reciclagem, mas a ausência de um modelo de análise comparativa de conhecimento consolidado que traduza a complexidade técnica em um formato que facilite a análise comparativa e a tomada de decisão sob a ótica da Economia Circular. Ferramentas que codificam e apresentam o conhecimento de forma estruturada são fundamentais para transformar dados em inteligência competitiva e sustentável.

Portanto, o objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de um modelo de análise comparativa de conhecimento, baseado em revisão sistemática da literatura, para apoiar a tomada de decisão sobre os procedimentos de reciclagem de baterias de VEs, alinhado aos princípios da Economia Circular. Este trabalho, originado de uma dissertação de mestrado, demonstra um caso prático de aplicação de processos de GC para resolver um problema complexo na intersecção entre tecnologia e sustentabilidade. O artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a revisão de literatura sobre GC e reciclagem de baterias; a seção 3 detalha o método de pesquisa; a seção 4 apresenta o modelo de análise comparativa de conhecimento desenvolvido e discute seus resultados; e a seção 5 apresenta as conclusões.

1. **REFERENCIAL TEÓRICO**
   1. GESTÃO DO CONHECIMENTO: CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Na economia contemporânea, o conhecimento é amplamente reconhecido como o principal ativo estratégico e a mais sustentável fonte de vantagem competitiva para as organizações (DAVENPORT; PRUSAK, 1998). No entanto, o conhecimento por si só não gera valor; é a capacidade de uma organização em criar, organizar, compartilhar e aplicar esse conhecimento de forma sistemática que determina seu sucesso. A Gestão do Conhecimento (GC) emerge, portanto, como a disciplina dedicada a gerenciar este ativo intangível, com o objetivo de melhorar o desempenho, fomentar a inovação e apoiar a tomada de decisão (NONAKA; TAKEUCHI, 1995).

A literatura fundamental da GC estabelece uma distinção crucial entre dois tipos de conhecimento: o tácito e o explícito. O conhecimento tácito é pessoal, subjetivo e profundamente enraizado na experiência individual, compreendendo insights, intuições e o "saber-fazer" (*know-how*) que são difíceis de formalizar e comunicar. Por outro lado, o conhecimento explícito é formal e codificado, podendo ser expresso em linguagem, dados, manuais e documentos. Ele é facilmente armazenado, processado e compartilhado (NONAKA; TAKEUCHI, 1995). O grande desafio da GC, e o motor da inovação, reside na capacidade de uma organização em facilitar a conversão do valioso conhecimento tácito de seus membros em conhecimento explícito, que pode ser alavancado por toda a organização (DAVENPORT; PRUSAK, 1998).

Para explicar como essa conversão ocorre, Nonaka e Takeuchi (1995) propuseram o modelo SECI, um dos pilares da teoria da criação do conhecimento organizacional. O modelo descreve um processo dinâmico e contínuo, uma "espiral do conhecimento", onde o conhecimento tácito e explícito interagem e se expandem através de quatro modos de conversão:

* Socialização (de Tácito para Tácito): É o processo de compartilhamento de experiências diretas, criando uma base de conhecimento tácito comum através da observação, imitação e prática conjunta (NONAKA; TAKEUCHI, 1995).
* Externalização (de Tácito para Explícito): Este é o processo crucial de articular o conhecimento tácito em conceitos explícitos, usando metáforas, analogias ou modelos. É o momento em que o conhecimento individual se torna tangível e compartilhável (NONAKA; TAKEUCHI, 1995).
* Combinação (de Explícito para Explícito): Consiste em sistematizar e combinar diferentes corpos de conhecimento explícito para gerar um novo conhecimento mais complexo e sistêmico (NONAKA; TAKEUCHI, 1995).
* Internalização (de Explícito para Tácito): É o processo de incorporação do conhecimento explícito ao conhecimento tácito individual, relacionado ao "aprender fazendo" (*learning by doing*) (NONAKA; TAKEUCHI, 1995).

A aplicação destes processos de GC é cada vez mais reconhecida como fundamental para endereçar desafios complexos de sustentabilidade. A literatura recente reforça que a aplicação de processos de Gestão do Conhecimento, como a criação e o compartilhamento de conhecimento, é um fator chave para potencializar a Economia Circular e fomentar a inovação em sustentabilidade (GAZZOLA; VITORIANO, 2023). No contexto deste artigo, os processos de Externalização (ao extrair e articular o conhecimento disperso na literatura) e **Combinação** (ao sintetizar esse conhecimento em um novo framework comparativo) são essenciais para transformar o cenário de informações fragmentadas sobre a reciclagem de baterias em um corpo de conhecimento estruturado, capaz de apoiar decisões estratégicas em prol da Economia Circular.

2.2 PROCESSOS DE RECICLAGEM DE BATERIAS: UMA VISÃO GERAL

A reciclagem de baterias de íon-lítio em fim de vida é um campo tecnologicamente diverso, com três rotas principais consolidadas ou em desenvolvimento: a hidrometalurgia, a pirometalurgia e a reciclagem direta. A escolha entre elas envolve complexos trade-offs entre eficiência, custo e impacto ambiental, cuja compreensão é fundamental para a análise subsequente (HARPER et al., 2019).

2.2.1 HIDROMETALURGIA

A hidrometalurgia é um processo predominantemente químico que utiliza soluções aquosas, geralmente ácidas, para dissolver seletivamente os metais valiosos contidos no cátodo da bateria (VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ et al., 2019). Após um pré-tratamento físico que gera a "massa preta", esta é submetida a uma lixiviação em baixas temperaturas (abaixo de 100 °C). Subsequentemente, através de etapas de purificação e precipitação, cada metal é recuperado individualmente na forma de sais de alta pureza, como sulfatos e carbonatos (ZENG; LI; SINGH, 2014).

A principal vantagem desta rota é sua alta seletividade e eficiência, permitindo a recuperação de uma vasta gama de metais, incluindo o lítio, com altíssima pureza. Isso viabiliza a produção de matéria-prima secundária de alta qualidade para a fabricação de novas baterias, caracterizando um ciclo fechado de alto valor. Seus maiores desafios, no entanto, residem no consumo intensivo de reagentes químicos (ácidos e bases) e na geração de grandes volumes de efluentes líquidos que exigem tratamento complexo e oneroso (NEUMANN et al., 2022).

2.2.2 PIROMETALURGIA

A pirometalurgia é um processo térmico que emprega fornos de alta temperatura (acima de 1.400 °C) para fundir e separar os componentes da bateria por densidade (MAKUZA et al., 2021). Durante a fundição, os metais mais nobres, como cobalto e níquel, formam uma liga metálica, enquanto os elementos mais leves, como lítio e alumínio, são incorporados a uma fase de escória. Este processo se destaca pela robustez, simplicidade logística e por sua capacidade de processar grandes volumes de baterias com pré-tratamento mínimo (HARPER et al., 2019).

Contudo, a pirometalurgia enfrenta desvantagens significativas do ponto de vista da circularidade. Seu alto consumo de energia resulta em uma pegada de carbono elevada, e, mais criticamente, há a perda quase total de materiais estratégicos como o lítio, que fica aprisionado na escória e cuja recuperação não é economicamente viável. A liga metálica obtida também requer um refino hidrometalúrgico posterior para a separação dos metais, tornando o processo, na prática, uma etapa de pré-concentração (NEUMANN et al., 2022).

2.2.3 RECICLAGEM DIRETA

A reciclagem direta é a abordagem mais recente e inovadora, cujo objetivo não é decompor quimicamente o material do cátodo, mas sim restaurar e rejuvenescer sua estrutura cristalina para reutilização direta (NEUMANN et al., 2022). O processo busca, através de etapas como a "relitiação", corrigir os defeitos estruturais e repor o lítio perdido durante a vida útil da bateria, regenerando o material ativo. Teoricamente, esta é a rota mais sustentável, pois conserva a "energia embutida" no material, minimiza o uso de reagentes e possui o menor consumo energético (HARPER et al., 2019).

O principal obstáculo da reciclagem direta, que atualmente limita sua aplicação em escala industrial, é sua altíssima sensibilidade a impurezas. A contaminação por outros materiais durante o processo de separação pode degradar severamente o desempenho eletroquímico do cátodo regenerado. Portanto, a viabilidade desta rota depende do desenvolvimento de sistemas de triagem e separação de alta precisão que ainda não estão consolidados (NEUMANN et al., 2022; VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ et al., 2019).

2.3 A INTERSECÇÃO: GC APLICADA À SUSTENTABILIDADE E ECONOMIA CIRCULAR

A aplicação dos processos de Gestão do Conhecimento (GC) é cada vez mais reconhecida como um fator fundamental para endereçar os complexos desafios da sustentabilidade e viabilizar a transição de um modelo econômico linear para uma Economia Circular (EC) (UL-DURAR et al., 2022). A literatura recente reforça que a capacidade de uma organização em gerenciar conhecimento ambiental e promover a aprendizagem organizacional são elementos-chave para potencializar a EC e fomentar a inovação em sustentabilidade (GAZZOLA; VITORIANO, 2023; ZHANG et al., 2021). A transição para a EC não é apenas uma mudança de processos produtivos, mas uma profunda transformação que depende da criação, integração e aplicação de novos conhecimentos (UL-DURAR et al., 2022).

Um dos maiores obstáculos para a implementação da EC em nível organizacional e regional é a fragmentação da informação e a existência de "silos de conhecimento" (COHEN; GIL, 2021). Dados sobre fluxos de resíduos, tecnologias de reaproveitamento e oportunidades de simbiose industrial são frequentemente esparsos, heterogêneos e incompatíveis, dificultando a tomada de decisões holísticas (COHEN; GIL, 2021). A GC atua diretamente sobre este problema, oferecendo as ferramentas e os processos necessários para organizar e padronizar informações, harmonizar definições e integrar dados de múltiplos domínios e atores (COHEN; GIL, 2021). Dessa forma, a GC transforma dados brutos e dispersos em uma base de conhecimento estruturada, que é essencial para identificar oportunidades de circularidade e otimizar o uso de recursos (UL-DURAR et al., 2022).

Nesse contexto, a criação do conhecimento organizacional, conforme descrita pelo modelo SECI, torna-se um processo central. A Socialização permite que equipes compartilhem práticas sustentáveis tácitas, enquanto a Externalização é crucial para articular e documentar essas práticas em diretrizes e modelos explícitos para a circularidade (GAZZOLA; VITORIANO, 2023). A Combinação de diferentes conhecimentos explícitos — como dados técnicos de reciclagem, análises de ciclo de vida e modelos de negócio circulares — permite a criação de estratégias inovadoras e sistêmicas (GAZZOLA; VITORIANO, 2023). Por fim, a Internalização garante que essas estratégias sejam absorvidas e aplicadas nas práticas diárias da organização, promovendo uma cultura de melhoria contínua alinhada à EC (ZHANG et al., 2021).

A integração bem-sucedida da GC e da EC culmina no que pode ser chamado de "Economia do Conhecimento Circular" (Circular Knowledge Economy - CKE), um sistema onde a organização utiliza de forma intensiva processos de reacumulação, reutilização e compartilhamento de conhecimento para maximizar a produtividade dos recursos e a ecoeficiência (UL-DURAR et al., 2022). Este conceito vai além de um modelo puramente econômico, integrando o conhecimento como um ativo central para gerar valor de forma sustentável (LUU; CHROMJAKOVÁ, 2024). No contexto deste artigo, a criação de um modelo de análise comparativa de conhecimento que consolida e compara tecnologias de reciclagem de baterias é um exemplo prático de aplicação da GC — especificamente dos processos de Externalização e Combinação — para superar a fragmentação da informação e apoiar decisões estratégicas em prol da Economia Circular.

1. **METODOLOGIA**

O desafio central desta pesquisa, conforme estabelecido, é um problema de Gestão do Conhecimento (GC): a conversão de um corpo vasto e disperso de informação técnica em um conhecimento explícito, estruturado e acionável. A metodologia foi, portanto, delineada como um processo de criação de conhecimento, visando o desenvolvimento de um modelo de análise comparativa para apoiar a tomada de decisão no contexto da Economia Circular (EC). A abordagem é de natureza qualitativa e aplicada, focada na construção de uma solução para um problema prático.

Este processo de GC foi estruturado em duas etapas macro, que se conectam diretamente aos modos de conversão do conhecimento: (1) Mapeamento e Coleta do Conhecimento, correspondendo à Externalização; e (2) Estruturação e Codificação do Conhecimento, correspondendo à Combinação (NONAKA; TAKEUCHI, 1995).

3.1 MAPEAMENTO E COLETA DO CONHECIMENTO (EXTERNALIZAÇÃO)

A primeira etapa consistiu em externalizar o conhecimento disperso na literatura, transformando-o de um estado fragmentado para um corpo de informações consolidadas. Para garantir o rigor e a replicabilidade, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), guiada pelo protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (MOHER et al., 2009).

A base de dados Scopus foi selecionada para a busca, devido à sua abrangência em engenharia e sustentabilidade. A estratégia de busca foi construída a partir da intersecção das palavras-chave "Battery recycling", "Electric Vehicle" e "Circular economy". A aplicação destes critérios resultou em 58 artigos que, por sua alta pertinência ao tema, compuseram a amostra final para análise. Adicionalmente, realizou-se uma análise bibliométrica sobre esta amostra para mapear o estado da arte, fornecendo um panorama quantitativo do campo de conhecimento.

3.2 ESTRUTURAÇÃO E CODIFICAÇÃO DO CONHECIMENTO (COMBINAÇÃO)

Uma vez coletado, o conhecimento explícito foi organizado e sistematizado para gerar um novo conhecimento comparativo. Esta etapa de **Combinação** foi operacionalizada através do desenvolvimento de um *framework* de análise híbrido, que serviu como a estrutura de codificação para avaliar e comparar os procedimentos de reciclagem. O *framework* foi construído sobre dois pilares conceituais da Economia Circular:

1. Framework dos 9R: Utilizado como ferramenta estratégica para classificar cada rota de reciclagem em uma hierarquia de circularidade — desde estratégias de menor valor, como Recuperar (R10), até as de maior valor, como Reciclar (R9) (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Esta classificação permite avaliar a capacidade de cada processo em manter os materiais em ciclos de alto valor.
2. Framework RESOLVE: Para uma análise operacional detalhada, foram selecionados três critérios do *framework* desenvolvido pela Ellen MacArthur Foundation: Loop (avaliando a eficiência em fechar o ciclo dos materiais), Optimize (analisando o consumo de recursos no próprio processo) e Regenerate (mensurando o impacto ambiental resultante). Estes critérios forneceram as variáveis analíticas para a comparação sistemática entre as tecnologias (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

A aplicação sequencial deste framework híbrido aos 58 artigos selecionados permitiu a sistematização das informações e a construção do modelo de análise comparativa apresentado na seção de resultados, que representa o modelo de análise comparativa de conhecimento final deste trabalho.

1. **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O culminar do processo de Gestão do Conhecimento (GC) detalhado na seção anterior é a criação de um modelo de análise comparativa, que sintetiza e estrutura a complexa gama de informações sobre os procedimentos de reciclagem de baterias. Este modelo não é meramente uma análise qualitativa de dados; ele é a materialização do conhecimento explícito, projetado para facilitar a análise sistêmica e apoiar a tomada de decisão estratégica em prol da Economia Circular (EC).

O modelo de análise comparativa foi estruturado para permitir uma perspectiva multifacetada. Os tópicos são organizados por composição química do cátodo (NMC, NCA, LMO, LCO) e pelos respectivos métodos de reciclagem (Hidrometalurgia, Pirometalurgia, Reciclagem Direta). O modelo analisa também através das lentes do *framework* híbrido, avaliando-os segundo os critérios Loop, Optimize e Regenerate, e classificando-os na hierarquia do Framework 9R.

A função deste modelo e análise comparativa é transformar o conhecimento tácito e disperso da literatura em um formato que externaliza os trade-offs inerentes a cada rota tecnológica. Ao cruzar as informações, um gestor ou formulador de políticas pode visualizar diretamente como uma vantagem em um critério (ex: a robustez logística da pirometalurgia) se traduz em uma desvantagem em outro (ex: a perda de materiais críticos no critério *Loop* e o alto impacto ambiental no *Regenerate*).

4.1 MODELO DE ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROEDIMENTOS DE RECICLAGEM

A análise aprofundada dos dados coletados na revisão sistemática, estruturada pelo framework híbrido, permite uma comparação detalhada dos métodos de reciclagem para cada química de bateria, conforme discutido a seguir.

4.1.1 BATERIAS DE NÍQUEL-MANGANÊS-COBALTO (NMC)

Para a química NMC, a hidrometalurgia se destaca como a rota mais equilibrada. Sua principal vantagem é a alta taxa de recuperação (>95%) para todos os metais valiosos (níquel, cobalto, manganês e, crucialmente, o lítio), o que permite um ciclo fechado de alta qualidade e a classifica como R9 - Reciclar (Alto Valor) (VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ et al., 2019). Em termos de otimização, seu consumo de energia é baixo, mas demanda um alto volume de reagentes químicos e água. Sua pegada de carbono é reduzida, mas a geração de efluentes líquidos que necessitam de tratamento complexo é seu principal passivo ambiental (HARPER et al., 2019). Atualmente, é considerada a rota mais madura para a circularidade completa dos materiais.

A pirometalurgia, por sua vez, apresenta falhas críticas do ponto de vista da circularidade. Ocorre a perda quase total de lítio e alumínio na escória, recuperando apenas uma liga metálica que exige refino posterior, o que a posiciona como R10 - Recuperar (NEUMANN et al., 2022; MAKUZA et al., 2021). Sua vantagem é a robustez logística e menor necessidade de pré-tratamento, mas isso ocorre ao custo de um altíssimo consumo de energia. Consequentemente, sua performance ambiental é a mais baixa, com altas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e geração de grande volume de escória (MAKUZA et al., 2021).

Já a reciclagem direta representa o ideal teórico da Economia Circular, classificada como R7 - Remanufaturar (o material). Ela oferece o potencial de um ciclo de materiais de altíssimo valor, com o menor consumo de energia e reagentes, preservando a "energia embutida" no material (HARPER et al., 2019). Contudo, sua extrema sensibilidade a impurezas dificulta a aplicação em escala industrial, tornando-a uma rota tecnologicamente imatura (NEUMANN et al., 2022).

4.1.2 BATERIAS DE NÍQUEL-COBALTO-ALUMÍNIO (NCA)

A análise para a química NCA é semelhante à da NMC. A hidrometalurgia novamente se mostra como a opção mais robusta para a circularidade, classificada como R9 - Reciclar (Alto Valor), por alcançar altas taxas de recuperação (>98%) para níquel, cobalto e lítio (JOULIÉ; LAUCOURNET; BILLY, 2014). Apesar de energeticamente eficiente, seu consumo de reagentes é intensivo e a geração de efluentes salinos exige tratamento robusto.

A pirometalurgia para NCA também é classificada como R10 - Recuperar, pois falha ao perder quase todo o lítio e o alumínio na escória (NEUMANN et al., 2022). Seu alto consumo de energia e a elevada pegada ambiental reforçam sua inadequação para um ciclo de materiais verdadeiramente circular.

A reciclagem direta para NCA, classificada como R7 - Remanufaturar (o material), oferece o ciclo teoricamente mais perfeito. No entanto, a dificuldade em garantir a pureza do material de entrada em escala industrial a mantém como um horizonte ideal, mas ainda tecnicamente imaturo (NEUMANN et al., 2022).

4.1.3 BATERIAS DE ÓXIDO DE LÍTIO-MANGANÊS (LMO)

Para as baterias LMO, a hidrometalurgia se consolida como a única tecnologia madura, viável e eficaz no presente (R9 - Reciclar (Alto Valor)). Sua viabilidade econômica é sustentada pela alta eficiência na recuperação do lítio, o componente de maior valor (MESHRAM; MISHRA; SAHU, 2020). O processo é energeticamente favorável e avanços com reagentes "verdes" melhoram seu perfil ambiental (HARPER et al., 2019).

A pirometalurgia é tecnicamente inadequada para a química LMO, classificada como R10 - Recuperar (Balanço Negativo). Ela quebra completamente o ciclo de materiais, perdendo a totalidade do lítio e do manganês na escória, com um consumo massivo de energia sem gerar um produto de valor (NEUMANN et al., 2022).

A reciclagem direta (R7 - Remanufaturar o material), embora seja a solução mais elegante do ponto de vista da circularidade, permanece no campo da pesquisa, principalmente pela barreira crítica da pureza do material de entrada (ZHANG et al., 2018).

4.1.4 BATERIAS DE ÓXIDO DE LÍTIO-COBALTO (LCO)

No caso das baterias LCO, a hidrometalurgia se destaca como a estratégia superior, sendo considerada o "padrão-ouro" (R9 - Reciclar (Alto Valor)). Ela alia alta lucratividade com taxas de recuperação extremamente altas (>99%) tanto para o cobalto quanto para o lítio, caracterizando um ciclo fechado completo e de altíssimo valor (FAN et al., 2020).

A pirometalurgia é economicamente viável pela recuperação do cobalto, mas é uma solução de circularidade incompleta (R9/R10). O ciclo do cobalto é fechado (com refino), mas o do lítio é completamente quebrado, com alta pegada ambiental (NEUMANN et al., 2022; MAKUZA et al., 2021).

Finalmente, a reciclagem direta para LCO (R7 - Remanufaturar o material) enfrenta menor incentivo econômico para seu desenvolvimento, dada a alta lucratividade e maturidade da rota hidrometalúrgica já estabelecida para esta química (ZHANG et al., 2018).

Em síntese, a discussão revela que o modelo de análise comparativa de conhecimento desenvolvido cumpre sua função primordial: ele capacita o tomador de decisão a ir além de uma análise puramente técnica ou de curto prazo, permitindo uma avaliação estratégica que pondera eficiência de recuperação, otimização de recursos e impacto ambiental, guiando a escolha da tecnologia que melhor promove uma Economia Circular real e sustentável.

1. **CONSIDERAÇÕES FINAIS E IMPLICAÇÕES**

Este artigo abordou o desafio da reciclagem de baterias de veículos elétricos não como um problema puramente técnico, mas como uma questão fundamental de Gestão do Conhecimento (GC). A pesquisa demonstrou um método para converter um vasto e fragmentado corpo de informações acadêmicas em um modelo de análise comparativa de conhecimento explícito e estruturado, capaz de apoiar a tomada de decisão estratégica em prol da Economia Circular (EC). As conclusões a seguir destacam a contribuição do trabalho e suas implicações para a teoria, a prática e a gestão.

5.1 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A crescente transição para a eletromobilidade, embora benéfica para a descarbonização, cria um passivo ambiental iminente relacionado ao descarte de baterias em fim de vida (HARPER et al., 2019). A principal contribuição deste trabalho foi recontextualizar este desafio, enquadrando a seleção da rota de reciclagem mais sustentável como um processo de decisão que depende criticamente da correta gestão da informação. Ao aplicar sistematicamente os processos de Externalização e Combinação do conhecimento (NONAKA; TAKEUCHI, 1995), o estudo produziu um modelo de análise comparativa consolidado que traduz a complexidade técnica em uma ferramenta de análise comparativa. Demonstra-se, assim, o valor prático da GC como disciplina habilitadora para a implementação da EC em setores de alta tecnologia.

5.2 IMPLICAÇÕES TEÓRICAS E PRÁTICAS

Do ponto de vista teórico, este artigo oferece duas contribuições principais. Primeiramente, ele serve como um caso de estudo aplicado que valida a pertinência dos modelos clássicos de GC para resolver problemas contemporâneos de sustentabilidade industrial. Em segundo lugar, ele reforça a abordagem da *Design Science Research* no campo da GC, ao focar no modelo de análise comparativa como um resultado de pesquisa tangível e útil.

Na prática, as implicações são diretas. O modelo de análise comparativa desenvolvido funciona como uma ferramenta de apoio à decisão para engenheiros, pesquisadores e analistas do setor, consolidando em um único local as informações sobre os *trade-offs* de cada tecnologia. Além disso, a metodologia aqui descrita — utilizar a revisão sistemática e um *framework* de análise da EC como um processo de GC — pode ser replicada para criar um modelo de análise comparativa de conhecimento semelhantes para outras tecnologias sustentáveis ou para novas químicas de baterias que venham a surgir.

5.3 IMPLICAÇÕES GERENCIAIS

Para gestores e formuladores de políticas públicas, o modelo de análise comparativa de conhecimento oferece uma base sólida para decisões estratégicas de alto impacto. Ele permite uma avaliação que transcende a análise de custo imediato, incorporando critérios de circularidade e impacto ambiental de longo prazo, essenciais para a EC. Um gerente pode utilizar o modelo de análise comparativa para justificar investimentos em tecnologias como a hidrometalurgia, que, embora possa ter custos operacionais com reagentes, garante um ciclo fechado de materiais críticos como o lítio (NEUMANN et al., 2022). Da mesma forma, governos podem desenhar políticas de incentivo mais eficazes, fomentando as rotas de reciclagem que comprovadamente maximizam a circularidade e a sustentabilidade, em detrimento de opções de menor valor agregado.

5.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA E ESTUDOS FUTUROS

É imperativo reconhecer as limitações deste estudo para contextualizar seus achados e guiar futuras pesquisas. Primeiramente, a análise baseia-se exclusivamente em uma revisão da literatura, refletindo o estado da arte documentado, sem a incorporação de dados primários de plantas industriais. Em segundo lugar, a análise econômica, embora discutida qualitativamente, não foi aprofundada quantitativamente, sendo este um fator determinante para a implementação de qualquer tecnologia. Por fim, o campo de reciclagem de baterias é extremamente dinâmico, e novas inovações podem alterar o balanço comparativo apresentado.

Diante disso, as seguintes direções para pesquisas futuras são sugeridas:

* Validação Industrial: Realizar estudos de caso em plantas de reciclagem para validar e refinar as conclusões do modelo de análise comparativa de conhecimento com dados primários de custo, consumo energético e eficiência.
* Modelagem Tecno-Econômica: Desenvolver análises quantitativas de viabilidade econômica que integrem os critérios de circularidade, oferecendo uma visão ainda mais completa para a tomada de decisão.
* Aplicação a Novas Tecnologias: Utilizar a metodologia de GC aqui proposta para construir um modelo de análise comparativa de conhecimento para químicas de baterias emergentes (ex: estado sólido, sódio-íon), garantindo que a circularidade seja planejada desde o início de seu ciclo de vida.

1. **REFERÊNCIAS**

COHEN, J.; GIL, J. An entity-relationship model of the flow of waste and resources in city-regions: Improving knowledge management for the circular economy. Resources, Conservation & Recycling Advances, v. 12, 2021. DOI: 10.1016/j.rcradv.2021.200058.

DAVENPORT, T. H.; PRUSAK, L. Working knowledge: How organizations manage what they know. Boston: Harvard Business Press, 1998.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Delivering the circular economy: a toolkit for policymakers. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2015. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/a-toolkit-for-policymakers. Acesso em: 14 jul. 2025.

FAN, E.; LI, L.; WANG, Z.; LIN, J.; HUANG, Y.; YAO, Y.; CHEN, R.; WU, F. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. Chemical Reviews, v. 120, n. 14, p. 7020-7063, 2020. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00535.

GAZZOLA, Sara Barbosa; VITORIANO, Marcia Cristina de Carvalho Pazin. Abordagens transversais e verticais na gestão do conhecimento para potencializar a economia circular e a inovação inclusiva. Brazilian Journal of Information Science: research trends, v. 13, publicação contínua, 2023. Dossiê: Transversalidade e Verticalidade na Ciência da Informação. DOI: 10.36311/1981-1640.2023.v17.e023063.

HARPER, G.; SOMMERVILLE, R.; KENDRICK, E.; DRISCOLL, L.; SLATER, P.; STOLKIN, R.; WALTON, A.; CHRISTENSEN, P.; HEIDRICH, O.; LAMBERT, S.; ABBOTT, A.; RYDER, K.; GAINES, L.; ANDERSON, P. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Nature, v. 575, p. 75–86, 2019. DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5.

JOULIÉ, M.; LAUCOURNET, R.; BILLY, E. Hydrometallurgical process for the of high value metals from spent lithium nickel cobalt aluminum oxide based lithium-ion batteries. Journal of Power Sources, v. 247, p. 551–555, 2014. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.08.128.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling, v. 127, p. 221–232, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

LUU, Thanh Van; CHROMJAKOVÁ, Felicita. Knowledge‑based circular economics model for sustainable competitiveness: framework development and analysis. Environment, Development and Sustainability, v. 27, p. 12563–12582, 2025. DOI: 10.1007/s10668-023-04415-2.

MAKUZA, B.; TIAN, Q.; GUO, X.; CHATTOPADHYAY, K.; YU, D. Pyrometallurgical Options for Recycling Spent Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review. Journal of Power Sources, v. 491, p. 229622, 2021. [DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229622](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229622).

MESHRAM, P.; MISHRA, A.; ABHILASH; SAHU, R. Environmental impact of spent lithium ion batteries and green recycling perspectives by organic acids—A review. Chemosphere, v. 242, n. 125291, 2020. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125291.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. PLoS Medicine, v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009. [DOI: 10.1371/journal.pmed.1000097](https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097).

NEUMANN, J.; PETRANIKOVA, M.; MEEUS, M.; GAMARRA, J. D.; YOUNESİ, R.; WINTER, M.; NOWAK, S. Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling. Advanced Energy Materials, v. 12, n. 17, p. 2102917, 2022. [DOI: 10.1002/aenm.202102917](https://doi.org/10.1002/aenm.202102917).

NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation. Oxford university press, 1995.

UL-DURAR, Shajara; AWAN, Usama; VARMA, Arup; MEMON, Saim; MENTION, Anne-Laure. Integrating knowledge management and orientation dynamics for organization transition from eco-innovation to circular economy. Journal of Knowledge Management, v. 27, n. 8, p. 2217–2248, 2023. DOI: 10.1108/JKM-05-2022-0424.

VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ, O.; VALIO, J.; SANTASALO-AARNIO, A.; REUTER, M.; SERNA-GUERRERO, R. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. Batteries, v. 5, n. 4, p. 68, 2019. [DOI: 10.3390/batteries5040068](https://www.google.com/url?sa=E&source=gmail&q=https://doi.org/10.3390/batteries5040068).

ZENG, Xianlai; LI, Jinhui; SINGH, Narendra. Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, Beijing, v. 44, n. 10, p. 1129-1165, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.763578>.

ZHANG, Boyao; COMITE, Ubaldo; YUCEL, Ali Gokhan; LIU, Xintao; KHAN, Mohammed Arshad; HUSAIN, Shahid; SIAL, Muhammad Safdar; POPP, József; OLÁH, Judit. Unleashing the importance of TQM and knowledge management for organizational sustainability in the age of circular economy. Sustainability, v. 13, n. 20, p. 11514, 2021. DOI: 10.3390/su132011514.

ZHANG, X., Li, L., Fan, E., Xue, Q., Bian, Y., Wu, F., & Chen, R. (2018). Toward sustainable and systematic recycling of spent rechargeable batteries. Chemical Society Reviews, 47(19), 7239–7302. https://doi.org/10.1039/c8cs00297e.