EVENTO ON-LINE

ConBRepro

XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

02 a 04 de dezembro de 2026

Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Logística Reversa De Baterias De Veículos Elétricos No Brasil: Uma Análise Multicritério Para Priorizar Alternativas de Destinação

Paulo Henrique Campos Borges
Engenharia de Transportes – UFSC

Ricardo Villarroel Dávalos
Engenharia de Transportes – UFSC

Resumo: A expansão da mobilidade elétrica exige soluções para a logística reversa de baterias de íons de lítio. Este artigo propõe um modelo multicritério baseado no TOPSIS para comparar três alternativas de destinação: hidrometalurgia, segunda vida seguida de reciclagem e pirometalurgia. A comparação considera esforço logístico, desempenho de carbono, recuperação de materiais, conformidade regulatória e viabilidade operacional. Tupy S.A., Energy Source Participações e Lorene Importação e Exportação Ltda. são utilizadas como referências institucionais para contextualizar as alternativas. O modelo demonstra as etapas do cálculo e a análise de sensibilidade. No cenário-base, a hidrometalurgia obteve o maior coeficiente de proximidade da solução ideal; com maior peso para o critério logístico, a pirometalurgia passou à primeira posição. A mudança mostra a influência dos pesos na ordenação e como o modelo pode auxiliar na tomada de decisão final

Palavras-chave: logística reversa; baterias de íons de lítio; economia circular; decisão multicritério; veículos elétricos.

Reverse Logistics for Electric Vehicle Batteries in Brazil: A Multicriteria Analysis to Prioritize Disposal Alternatives

Abstract: The expansion of electric mobility calls for solutions for the reverse logistics of lithium-ion batteries. This article proposes a TOPSIS-based multicriteria model to compare three end-of-life alternatives: hydrometallurgy, second-life use followed by recycling, and pyrometallurgy. The comparison considers logistics effort, carbon performance, material recovery, regulatory compliance, and operational feasibility. Tupy S.A., Energy Source Participações, and Lorene Importação e Exportação Ltda. are used as institutional references to contextualize the alternatives. The model demonstrates the calculation steps and sensitivity analysis. In the baseline scenario, hydrometallurgy achieved the highest proximity coefficient to the ideal solution; when greater weight was assigned to the logistics criterion, pyrometallurgy ranked first. This change shows the influence of criterion weights on the ranking and how the model can support the final decision

Keywords: reverse logistics; lithium-ion batteries; circular economy; multicriteria decision-making; electric vehicles.

1. Introdução

A transição para a mobilidade elétrica desloca parte dos desafios ambientais do uso de combustíveis para a gestão de componentes complexos ao final de sua primeira vida. As baterias de íons de lítio reúnem materiais de valor econômico, substâncias que exigem

controle, riscos de segurança e diferentes possibilidades de reaproveitamento. A decisão sobre sua destinação, portanto, está longe de ser somente a escolha da menor distância ou da tecnologia com maior recuperação potencial. Ela envolve: transporte, energia, emissões, segurança, legalidade, qualidade dos produtos recuperados e capacidade de operação (AZADNIA; ONOFREI; GHADIMI, 2021; SOPHA; PURNAMASARI; MA'MUN, 2022).

No Brasil, a logística reversa integra a Política Nacional de Resíduos Sólidos e está associada à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. O art. 33 da Lei nº 12.305/2010 inclui pilhas e baterias entre os produtos sujeitos a sistemas de logística reversa, enquanto órgãos públicos destacam a necessidade de coleta, armazenamento, transporte e destinação ambientalmente adequada (BRASIL, 2010; IBAMA, 2022). Essa moldura normativa não determina, por si só, qual rota tecnológica deve ser selecionada. Ela cria, contudo, a necessidade de avaliar as alternativas segundo múltiplos critérios.

Métodos multicritério têm sido empregados para examinar partes desse problema. Chen et al. (2023) combinaram o método Best-Worst (BWM) e o TOPSIS para avaliar e ordenar fontes de risco de segurança em atividades relacionadas ao fim da vida útil de baterias de íons de lítio. Em outro recorte, Le et al. (2026) aplicaram AHP–TOPSIS para comparar estratégias de cadeia reversa de baterias de veículos elétricos no Vietnã, considerando alternativas como reciclagem direta, segunda vida e diferentes configurações de reciclagem. O primeiro estudo avalia riscos, o segundo compara estratégias de cadeia reversa. Embora ambos sustentem o uso de ferramentas multicritério, seus resultados não devem ser transferidos diretamente para as alternativas ou empresas brasileiras examinadas neste artigo.

Diante disso, o problema que orienta este artigo é: como comparar, de maneira explícita e rastreável, alternativas de destinação de baterias de veículos elétricos quando a decisão envolve dimensões logísticas, ambientais, materiais, regulatórias e operacionais? O objetivo geral é apresentar uma proposta metodológica multicritério baseada no TOPSIS para comparar três alternativas: hidrometalurgia, segunda vida seguida de reciclagem e pirometalurgia, em um cenário ilustrativo. Especificamente, o artigo define alternativas, critérios e pesos, demonstra as etapas do cálculo, examina a ordenação obtida, e verifica sua sensibilidade à alteração dos pesos. Sua contribuição é mostrar uma estrutura de comparação e seus limites.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Logística reversa de baterias

A logística reversa compreende as atividades necessárias para fazer produtos e materiais retornarem após o uso, seja para aproveitamento em novos ciclos produtivos, seja para destinação ambientalmente adequada. No caso das baterias de veículos elétricos, esse processo não se resume ao deslocamento entre um ponto de coleta e uma instalação de tratamento. É preciso identificar as unidades recebidas, conhecer sua condição, organizar o armazenamento e o transporte, realizar a triagem e encaminhá-las a atividades compatíveis com suas características. Estudos de redes de logística reversa de baterias mostram que a localização das instalações, a distribuição dos fluxos e a escolha das tecnologias afetam conjuntamente os custos e as emissões do sistema (FAN et al., 2023).

A triagem e o diagnóstico ocupam uma posição central nesse fluxo. A retirada de uma bateria do veículo não significa, necessariamente, que ela esteja apta à segunda vida, nem que precise seguir diretamente para a reciclagem. Para avaliar uma nova utilização, são necessárias informações sobre sua condição e seu desempenho remanescente, especialmente o estado de saúde da bateria. Sem essa avaliação, a destinação pode ser definida com base apenas na disponibilidade de uma instalação ou na distância de

transporte, sem considerar se a bateria atende aos requisitos da aplicação pretendida (KUMAR; HUYN; VENNELAKANTI, 2023).

A decisão também depende da rastreabilidade entre as etapas. Informações sobre origem, condição, movimentação e encaminhamento da bateria ajudam os agentes da cadeia a planejar o transporte e a relacionar cada unidade a uma alternativa de aproveitamento ou reciclagem. Kumar, Huyn e Vennelakanti (2023) destacam que a fragmentação dessas informações entre os participantes da cadeia dificulta a previsão dos retornos, a estimativa do valor remanescente e a escolha do destino. Portanto, a qualidade dos dados não é apenas uma questão administrativa: ela influencia a confiabilidade da avaliação das alternativas.

O TOPSIS utilizado neste artigo não substitui o planejamento da rede de logística nem o diagnóstico técnico de cada bateria: sua função é organizar uma comparação entre alternativas a partir de critérios e valores previamente definidos. Como a matriz deste estudo é ilustrativa, essa relação entre as etapas logísticas e os critérios é uma fundamentação para uma futura aplicação com dados verificáveis.

2.2 Economia circular e recuperação de materiais

A economia circular procura reduzir a dependência de recursos primários mediante estratégias de prolongamento da vida útil, reutilização, reparo, remanufatura e reciclagem. Para baterias de íons de lítio, essa perspectiva é especialmente relevante porque o valor ambiental da reciclagem não depende apenas da massa processada, mas da qualidade e da utilidade dos materiais recuperados (PAGLIARO; MENEGUZZO, 2019). Recuperar um elemento em baixa pureza, por exemplo, não equivale necessariamente a produzir uma matéria-prima secundária apta a substituir insumo virgem.

Por essa razão, o critério “recuperação de materiais” deve ser definido antes da coleta dos dados. Ele pode assumir a forma de taxa mássica, recuperação elementar, pureza, rendimento de produto ou indicador combinado. O artigo não atribui percentuais às alternativas, propõe apenas como tais informações podem ser incorporadas a uma decisão transparente.

2.3 Hidrometalurgia, segunda vida e pirometalurgia

Para fins de aplicação metodológica, esta pesquisa considera três rotas de destinação de baterias de veículos elétricos reconhecidas no contexto brasileiro de logística reversa: reciclagem por hidrometalurgia, segunda vida seguida de reciclagem e reciclagem por pirometalurgia. A escolha da rota pode depender da condição da bateria, de sua capacidade residual, dos requisitos de segurança e da tecnologia disponível (HANTANASIRAKUL; SAWANGPHRUK, 2023). A seleção dessas alternativas não busca afirmar superioridade empírica entre empresas ou processos, mas construir um modelo analítico capaz de demonstrar como diferentes estratégias de destinação podem ser comparadas por meio de uma abordagem multicritério. Assim, o foco central do artigo recai sobre a estrutura do modelo de decisão, enquanto as alternativas A1, A2 e A3 funcionam como referências aplicadas para ilustrar a operacionalização do método TOPSIS em um problema realista de avaliação.

A hidrometalurgia utiliza operações químicas em meio aquoso para solubilizar, separar e purificar elementos presentes em materiais processados. Em termos gerais, a rota pode envolver preparação e pré-tratamento, lixiviação, separação de impurezas e recuperação de compostos ou metais. A intensidade de cada etapa depende da química da bateria, dos reagentes, do pré-tratamento e do produto desejado. Informações públicas associam a Tupy à USP e ao IPT em iniciativas de pesquisa e planta-piloto relacionada à reciclagem de baterias. Essas informações são utilizadas aqui para situar a alternativa A1 (TUPY, 2026).

A segunda vida designa o uso da bateria ou de seus módulos em uma aplicação posterior à primeira utilização, antes da reciclagem. Reparo, reutilização, remanufatura e segunda vida não são sinônimos: reparar busca restabelecer uma função, reutilizar mantém o objeto em uso distinto ou semelhante, remanufaturar envolve desmontagem e reconstrução segundo especificações, e segunda vida enfatiza uma nova aplicação após a retirada do veículo. A Energy Source é utilizada como referência institucional para contextualizar essa possibilidade, sem atribuir capacidade, taxa de aprovação ou escala operacional não documentada (ENERGY SOURCE, 2026).

A pirometalurgia emprega tratamento térmico para transformar a matriz da bateria e concentrar determinados elementos em fases metálicas ou não metálicas. Eletrólito, ligantes e separadores podem sofrer decomposição, oxidação ou combustão, a rota pode gerar gases, particulados e escória, o que exige sistemas de controle. A Lorene é mantida como referência institucional para contextualizar a alternativa A3, mas este artigo não presume temperatura, eficiência, composição dos produtos, emissões, capacidade ou destino posterior sem documentação específica (LORENE, 2024).

2.4 Metodologia TOPSIS

A destinação de baterias de veículos elétricos constitui um problema de decisão multicritério porque as alternativas precisam ser avaliadas sob aspectos distintos. Uma rota pode apresentar menor esforço de transporte, mas exigir maior consumo de energia, outra pode favorecer o prolongamento do uso da bateria, desde que haja condições técnicas e de segurança para isso. Comparar essas possibilidades exige explicitar quais critérios serão considerados, como cada um será medido e qual importância receberá na decisão. Estudos sobre cadeias reversas de baterias já empregaram métodos multicritério para comparar estratégias de destinação e para avaliar riscos associados às atividades de circularidade (LE et al., 2026; CHEN et al., 2023).

O TOPSIS, sigla de *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*, é um método de ordenação multicritério apresentado por Hwang e Yoon (1981). Seu princípio é comparar cada alternativa com duas soluções de referência construídas a partir da matriz de decisão: a ideal positiva, formada pelos melhores valores observados em cada critério, e a ideal negativa, formada pelos piores valores observados. A alternativa mais bem posicionada é aquela que, consideradas as ponderações adotadas, apresenta maior proximidade relativa da solução ideal positiva e maior afastamento da solução ideal negativa.

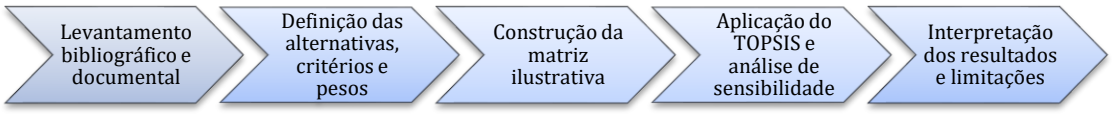
A aplicação do método exige a definição inicial do problema, das alternativas e dos critérios, classificando-os adequadamente entre fatores de maximização e minimização. Em seguida, os dados são normalizados e ponderados para calcular a proximidade de cada alternativa em relação às soluções ideais, permitindo estabelecer a ordenação final e testar sua sensibilidade.

3. Método de Pesquisa

O desenvolvimento deste trabalho toma o estudo de caso como referência para a delimitação de um problema contemporâneo em seu contexto de aplicação, conforme as recomendações metodológicas de Miguel (2007). Para isso, foram consultadas informações públicas sobre organizações que atuam na cadeia de baterias de íons de lítio no Brasil, utilizadas para contextualizar as alternativas de destinação.

A Figura 2 descreve as etapas que foram utilizadas para apoiar a realização deste estudo de caso.

FIGURA 1. Etapas metodológicas para estudo de caso



Fonte: elaboração própria (2026).

Na primeira etapa, foi realizado o levantamento de literatura científica, legislação e informações institucionais públicas para fundamentar o problema e contextualizar as organizações mencionadas. Na segunda, foram definidas as três alternativas de destinação, os cinco critérios de avaliação, a orientação de cada critério e os pesos utilizados nos cenários analisados.

Na terceira etapa, foi construída uma matriz de decisão com valores ilustrativos, empregados para demonstrar o procedimento, e não para representar medições das empresas. Na quarta, aplicou-se o TOPSIS por meio da normalização, ponderação, identificação das soluções ideais, cálculo das distâncias e obtenção dos coeficientes de proximidade; em seguida, variaram-se os pesos para examinar a sensibilidade da ordenação. Na quinta etapa, os resultados foram interpretados à luz dos cenários definidos, com explicitação das limitações decorrentes do uso

4. Estudo De Caso

4.1 Aplicação do TOPSIS ao problema

A aplicação do TOPSIS partiu de uma questão prática: como comparar possibilidades de destinação de baterias de veículos elétricos quando nenhuma delas pode ser avaliada por um único aspecto? Para responder a essa questão, o problema foi organizado em alternativas, critérios de avaliação e cenários de ponderação. A partir dessa estrutura, o método foi utilizado para identificar a posição relativa de cada alternativa diante das soluções ideal positiva e ideal negativa.

A seleção das alternativas e dos critérios define o que será comparado, a matriz de decisão reúne os valores atribuídos a cada combinação; e a aplicação do TOPSIS transforma esses valores em coeficientes de proximidade. A ordenação resultante é, por fim, examinada sob diferentes conjuntos de pesos, permitindo observar se a prioridade entre as alternativas se mantém quando muda a importância atribuída aos critérios.

4.2 Definição das alternativas

Foram selecionadas três alternativas de destinação para representar diferentes possibilidades de aproveitamento e processamento de baterias de íons de lítio provenientes de veículos elétricos. A escolha considerou a diversidade das rotas tecnológicas e operacionais envolvidas na logística reversa: a recuperação de materiais por hidrometalurgia, o prolongamento do uso por meio da segunda vida e a recuperação por pirometalurgia.

As alternativas foram associadas a organizações e instituições que possuem atuação ou informações públicas relacionadas ao segmento de baterias de íons de lítio no Brasil. Essa contextualização permite relacionar o modelo de decisão a referências existentes, sem transformar a tabela em uma avaliação individual do desempenho das empresas. A Tabela 1 apresenta as alternativas, seus respectivos códigos e os contextos institucionais utilizados no modelo.

Tabela 1 – Alternativas consideradas no modelo metodológico

Código	Alternativa	Contextualização
A1	Reciclagem por hidrometalurgia	Tupy, USP e IPT – São Paulo/SP
A2	Segunda vida e reciclagem posterior	Energy Source – São João da Boa Vista/SP
A3	Reciclagem por pirometalurgia	Lorene – Curitiba/PR

Fonte: elaboração própria (2026)

4.3 Definição dos critérios

Os critérios foram definidos com base na literatura consultada, nas características das alternativas de destinação e nas principais dimensões envolvidas na logística reversa de baterias de veículos elétricos. A seleção procurou contemplar aspectos logísticos, ambientais, materiais, regulatórios e operacionais, permitindo uma comparação mais abrangente entre as alternativas. A Tabela 2 apresenta os critérios, suas orientações e as formas possíveis de mensuração.

Tabela 2 – Critérios, orientações e formas de mensuração

Critério	Orientação	Unidades ou escalas possíveis
C1 – Custo ou esforço logístico de transporte	Minimizar	R$/t, R$/viagem, km, h ou índice de esforço
C2 – Emissões evitadas ou desempenho de carbono	Maximizar/minimizar conforme variável	kg CO_2e, kg CO_2e/t ou índice
C3 – Recuperação de materiais	Maximizar	%, massa, pureza ou indicador combinado
C4 – Conformidade regulatória	Maximizar	Escala ordinal de 1 a 5
C5 – Viabilidade operacional	Maximizar	Escala ordinal de 1 a 5

Fonte: elaboração própria (2026)

C1 incorpora a dimensão territorial e logística: custo por tonelada, distância, tempo, risco, complexidade e necessidade de transporte especializado podem ser considerados, desde que não sejam somados sem uma regra de agregação. C2 deve distinguir emissões evitadas de emissões geradas. As emissões evitadas devem ser maximizadas, enquanto as emissões geradas devem ser minimizadas. C3 deve privilegiar recuperação útil e pureza, não apenas massa de resíduo que entrou no processo. C4 trata da regularidade documental, licenciamento, transporte, rastreabilidade e destinação. C5 expressa a capacidade prática de executar a alternativa, incluindo infraestrutura, segurança, triagem, mercado e integração logística.

4.4 Escalas de avaliação

Os critérios adotados neste modelo podem ser operacionalizados por medidas quantitativas diretas ou por escalas construídas, desde que o procedimento de atribuição dos valores seja explicitado. No caso de C1, a avaliação poderá ser feita por métricas objetivas, como custo por tonelada, custo por viagem, distância percorrida, tempo de transporte ou outro indicador de esforço logístico. Em aplicações ilustrativas, esse critério também pode ser representado por um índice sintético de esforço logístico, desde que fique claro que valores menores indicam melhor desempenho.

Para C2, a escala deve distinguir com precisão se o estudo está trabalhando com emissões evitadas ou com emissões geradas. Se forem utilizadas emissões evitadas, valores maiores indicam melhor desempenho. Se forem utilizadas emissões geradas, o critério deverá ser invertido ou transformado, de modo a preservar a coerência matemática do modelo. A mensuração pode ocorrer em kg CO_2e por tonelada processada ou por índice ambiental construído a partir de parâmetros energéticos e de carbono, sempre com explicitação da lógica adotada.

No caso de C3, a avaliação pode ser feita por percentual de recuperação, massa efetivamente recuperada, pureza dos materiais obtidos ou por indicador combinado que

considere recuperação útil e qualidade do produto final. Em termos metodológicos, é recomendável que esse critério não se limite à quantidade total de material processado, mas reflita a efetiva capacidade de reinserção dos materiais na cadeia produtiva. Em aplicações demonstrativas, C3 também pode ser expresso por nota ilustrativa, desde que os critérios de atribuição sejam informados e que valores maiores correspondam a melhor desempenho circular.

Para C4, a escala ilustrativa é: 1, conformidade muito baixa ou inexistente, 2, baixa, 3, intermediária, 4, elevada e 5, muito elevada e documentalmente comprovada. Essa escala procura representar, de forma sintética, aspectos como regularidade documental, licenciamento, rastreabilidade, atendimento às exigências legais e comprovação do destino final, sem substituir auditoria jurídica ou ambiental.

Para C5, a escala é: 1, baixa viabilidade, 2, viabilidade limitada, 3, intermediária, 4, elevada e 5, muito elevada. Esse critério busca representar a capacidade prática de implementação da alternativa, considerando fatores como infraestrutura, segurança, capacidade de triagem, regularidade operacional, integração logística e condições de mercado. Assim como em C4, trata-se de uma escala ordinal útil para variáveis semiquantitativas, mas que exige critérios claros de pontuação e, preferencialmente, avaliação por especialistas. Os pesos encontram-se ilustrados na tabela a seguir.

Tabela 3 – Pesos ilustrativos

Critério	Peso ilustrativo	Justificativa metodológica
C1	0,15	Preserva a dimensão logística
C2	0,35	Valoriza a redução das emissões e a mitigação da pegada climática
C3	0,35	Valoriza a recuperação útil, a pureza e a circularidade
C4	0,10	Mantém a regularidade como condição relevante
C5	0,05	Representa a capacidade operacional

Fonte: elaboração própria (2026)

Os pesos são parâmetros de cenário base, não resultados estatísticos. A soma é 0,15 + 0,35 + 0,35 + 0,10 + 0,05 = 1,00. A atribuição de maior peso a C2 e C3 traduz uma prioridade analítica ambiental e circular. Essa escolha deve ser discutida com especialistas e testada por meio de análise de sensibilidade. Neste estudo, os pesos foram definidos para representar o cenário-base e os cenários de sensibilidade. Em uma aplicação com dados operacionais e participação de especialistas, esses pesos poderão ser obtidos por procedimentos estruturados de elicitação de preferências, como o Processo de Hierarquia Analítica (AHP), que organiza os critérios em uma estrutura hierárquica e permite realizar comparações entre pares.

4.5 Formulação matemática do TOPSIS

A matriz de decisão é $D=[x_{ij}]$, em que x_{ij} representa o desempenho da alternativa i no critério j. A normalização vetorial é $r_{ij}=x_{ij}/\sqrt{(\Sigma_i x_{ij}^2)}$, permitindo comparar grandezas distintas. A matriz ponderada é $v_{ij}=w_j r_{ij}$, em que w_j é o peso do critério.

Para critérios de benefício, $A_j^*=\max(v_{ij})$ e $A_j^-=\min(v_{ij})$. Para critérios de custo, $A_j^*=\min(v_{ij})$ e $A_j^-=\max(v_{ij})$. As distâncias são $S_i^*=\sqrt{[\Sigma_j(v_{ij}-A_j^*)^2]}$ e $S_i^-=\sqrt{[\Sigma_j(v_{ij}-A_j^-)^2]}$. O coeficiente de proximidade é $C_i^*=S_i^-/(S_i^*+S_i^-)$. Quanto maior C_i^*, mais próxima a alternativa se encontra do ideal positivo no cenário calculado.

5. Testes e Resultados

Advertência metodológica: os valores apresentados nesta seção não representam medições empíricas das empresas ou das rotas. Foram utilizados exclusivamente para demonstrar a operacionalização do TOPSIS. Em uma aplicação real, cada valor deverá ser

substituído por dado documentado, medição primária, informação institucional formal ou avaliação de especialistas com procedimento explicitado.

5.1 Matriz de decisão ilustrativa

A matriz de decisão reúne os valores atribuídos às três alternativas em relação aos cinco critérios definidos no estudo. Essa etapa organiza as informações que serão utilizadas nas fases seguintes do TOPSIS. A Tabela 4 apresenta a matriz de decisão utilizada no cenário-base.

Tabela 4 – Matriz de decisão ilustrativa

Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5
A1	3	4	5	5	3
A2	4	5	4	4	4
A3	1	3	3	4	5

Fonte: elaboração própria (2026)

A unidade de C1 é um índice didático de custo ou esforço logístico, orientado à minimização. C2 é uma nota didática de desempenho de carbono, orientada à maximização. C3 é uma nota didática de recuperação e pureza útil, também maximizada. C4 e C5 utilizam escalas ordinais de 1 a 5. Esses valores não foram coletados de empresas, rotas ou instalações.

5.2 Normalização

A normalização é realizada para colocar os critérios em uma escala comparável, uma vez que eles podem apresentar unidades e grandezas diferentes. Nesta etapa, cada valor da matriz de decisão é dividido pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores da respectiva coluna. O resultado desse procedimento é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Matriz normalizada

Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,588348	0,565685	0,707107	0,662266	0,424264
A2	0,784465	0,707107	0,565685	0,529813	0,565685
A3	0,196116	0,424264	0,424264	0,529813	0,707107

Fonte: elaboração própria (2026)

Como exemplo, para A1 no critério C1: $r_{11}=3/\sqrt{(3^2+4^2+1^2)}=0{,}588348$. O mesmo procedimento é repetido para cada coluna. A normalização altera a escala, mas não resolve a qualidade do dado de origem, um valor hipotético continua sendo hipotético após a normalização.

5.3 Matriz ponderada

Após a normalização, os valores são multiplicados pelos pesos definidos para cada critério. Essa etapa permite considerar a importância relativa de cada dimensão no processo de decisão. A Tabela 6 apresenta a matriz normalizada ponderada correspondente ao cenário-base ilustrado na tabela a seguir.

Tabela 6 – Coeficientes de proximidade no cenário-base

Alternativa	S_i^*	S_i^-	C_i^*
A1	0,078176	0,115286	0,595909
A2	0,102293	0,110905	0,520198
A3	0,140625	0,089378	0,388595

Fonte: elaboração própria (2026)

5.4 Soluções ideais

A partir da matriz ponderada, são identificadas a solução ideal positiva e a solução ideal negativa. A solução ideal positiva reúne os melhores valores de cada critério, enquanto a solução ideal negativa reúne os piores valores. A Tabela 7 apresenta essas duas referências utilizadas no cálculo das distâncias.

Tabela 7 – Soluções ideal positiva e ideal negativa

Solução	C1	C2	C3	C4	C5
A*	0,029417	0,247487	0,247487	0,066227	0,035355
A^-	0,117670	0,148492	0,148492	0,052981	0,021213

Fonte: elaboração própria (2026)

Na solução ideal positiva, C1 assume o menor valor ponderado porque é um critério de custo. Os demais critérios assumem o maior valor ponderado porque são critérios de benefício. A solução negativa segue a lógica inversa. Essa orientação precisa ser definida antes do cálculo, pois inverter benefício e custo pode alterar completamente a ordenação.

5.5 Distâncias e coeficientes

Depois de identificadas as soluções ideais, calcula-se a distância de cada alternativa em relação à solução ideal positiva e à solução ideal negativa. Esses valores são utilizados para obter o coeficiente de proximidade, que indica a posição relativa de cada alternativa no cenário analisado. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Distâncias e coeficientes no cenário-base

Alternativa	S_i^*	S_i^-	C_i^*
A1	0,078176	0,115286	0,595909
A2	0,102293	0,110905	0,520198
A3	0,140625	0,089378	0,388595

Fonte: elaboração própria (2026).

Os coeficientes resultam da relação entre a distância ao ideal negativo e a soma das duas distâncias. Eles não são probabilidades, percentuais de eficiência nem índices absolutos de sustentabilidade. São medidas relativas às alternativas, aos critérios, aos pesos e aos valores utilizados no cenário.

5.6 Ordenação ilustrativa

Os coeficientes de proximidade permitem estabelecer a ordem relativa das alternativas. A Tabela 9 apresenta a classificação obtida no cenário-base, considerando os critérios e os pesos definidos anteriormente.

Tabela 9 – Ordenação obtida no cenário-base

Posição	Alternativa	C_i^*
1º	A1	0,595909
2º	A2	0,520198
3º	A3	0,388595

Fonte: elaboração própria (2026).

A ordenação obtida no cenário ilustrativo é A1 > A2 > A3. Esse resultado demonstra que, na matriz didática adotada, a combinação de notas atribuídas à reciclagem por hidrometalurgia ficou mais próxima da solução ideal. A interpretação deve permanecer vinculada aos dados, pesos e escalas do cenário.

5.7 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade verifica o comportamento da ordenação quando são alterados os pesos dos critérios. Essa etapa permite observar se uma alternativa permanece na mesma posição ou se a classificação se modifica diante de diferentes prioridades decisórias. A Tabela 10 apresenta os coeficientes obtidos nos três cenários analisados.

Tabela 10 – Sensibilidade dos pesos: resultados

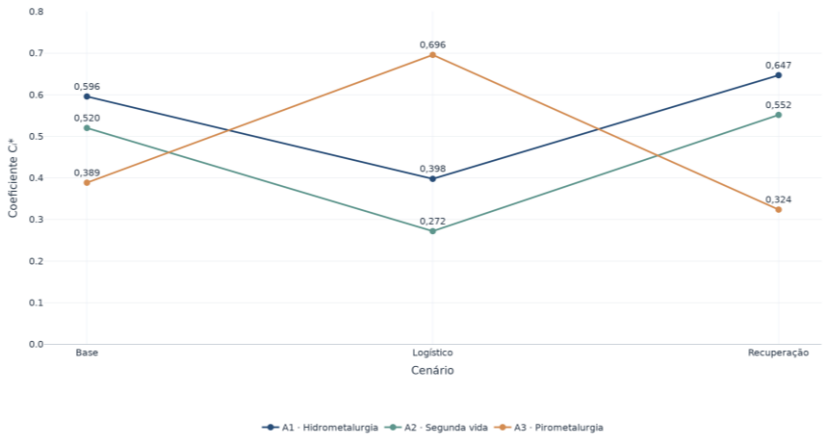
Cenário	Pesos C1/C2/C3/C4/C5	A1 C_i*	A2 C_i*	A3 C_i*	Ordenação
Cenário Base	0,15/0,35/0,35/0,1/0,05	0,595909	0,520198	0,388595	A1 > A2 > A3
Logístico	0,35/0,25/0,20/0,08/0,12	0,397825	0,272016	0,695965	A3 > A1 > A2
Recuperação de materiais	0,10/0,30/0,40/0,08/0,12	0,647089	0,551618	0,323843	A1 > A2 > A3

Fonte: elaboração própria (2026).

No cenário-base e no cenário com ênfase na recuperação de materiais, A1 permanece na primeira posição da simulação. No cenário logístico, A3 passa à primeira posição porque C1 assume maior peso. A mudança não demonstra uma característica intrínseca das empresas; demonstra que a ordenação TOPSIS responde às preferências decisórias e aos valores da matriz.

Para ampliar a compreensão, a Figura 3 apresenta a variação dos coeficientes de proximidade das alternativas nos cenários analisados. Reforçando que A1 apresenta o maior valor no cenário-base e no cenário com ênfase na recuperação de materiais, enquanto A3 assume a liderança no cenário logístico. A2 permanece abaixo das demais alternativas nos três cenários. A representação evidencia que a posição das alternativas é sensível à distribuição dos pesos entre os critérios ilustrado na figura a seguir.

Figura 2.Variação dos coeficientes de proximidade entre os cenários TOPSIS



Fonte: elaboração própria (2026).

5.8 Análise E Discussão Dos Resultados

A aplicação do TOPSIS mostra que a ordenação das alternativas depende tanto dos valores atribuídos aos critérios quanto dos pesos definidos em cada cenário. Assim, a mudança de classificação observada na análise de sensibilidade é mais relevante do que a posição isolada de A1, A2 ou A3: ela explicita como as prioridades logísticas, ambientais, materiais, regulatórias e operacionais influenciam a decisão. Os cinco critérios oferecem uma estrutura coerente para essa comparação, pois considerar apenas uma dimensão pode ocultar limitações importantes. O método, portanto, apoia a decisão, mas não substitui avaliações técnicas, ambientais, regulatórias ou econômicas.

Cada alternativa também evidencia dados necessários a uma aplicação real. Para A1, seria preciso distinguir a tecnologia declarada do desempenho medido, considerando, entre outros aspectos, consumo de recursos, recuperação de materiais e emissões. A2 exige verificar a aptidão e a segurança da bateria para uma segunda vida e incluir os impactos dessa utilização e da reciclagem posterior. No cenário ilustrativo, a proximidade territorial atribuída a A3 reduz o esforço logístico, mas sua avaliação também dependeria de dados sobre energia, emissões, resíduos e recuperação efetiva. Com informações documentadas sobre rotas, licenças, capacidade e rastreabilidade, a matriz poderá ser atualizada e

integrada a outras análises. Sua principal contribuição é tornar transparentes as razões pelas quais cada alternativa se aproxima ou se afasta dos objetivos definidos, sem afirmar a superioridade real de uma rota com base nos dados ilustrativos.

6. Conclusões E Considerações Finais

Este artigo apresentou uma proposta metodológica para comparar alternativas de logística reversa e destinação de baterias de veículos elétricos por meio do TOPSIS. As alternativas A1, A2 e A3 representam, respectivamente, hidrometalurgia, segunda vida seguida de reciclagem e pirometalurgia, sendo contextualizadas por informações institucionais da Tupy, da Energy Source e da Lorene.

Os cinco critérios selecionados: custo ou esforço logístico, emissões ou desempenho de carbono, recuperação de materiais, conformidade regulatória e viabilidade operacional, abrangem dimensões centrais do problema. O exemplo numérico mostrou como construir a matriz, normalizar valores, aplicar pesos, identificar soluções ideais, calcular distâncias e obter coeficientes de proximidade.

A contribuição do modelo está em oferecer uma estrutura replicável para apoiar decisões futuras relacionadas à logística reversa de baterias de veículos elétricos. A qualidade das conclusões dependerá da escolha criteriosa dos dados, da utilização de informações documentadas, da elaboração de inventários de emissões, da verificação das taxas de recuperação e pureza dos materiais, da avaliação dos aspectos de segurança, da confirmação dos requisitos regulatórios, da análise da capacidade operacional e da validação dos pesos atribuídos aos critérios.

A principal limitação deste trabalho foi a indisponibilidade de dados coletados e documentados para avaliar as alternativas segundo os critérios definidos. Por isso, os valores utilizados na aplicação do TOPSIS são ilustrativos. Ainda assim, o artigo apresenta a formulação e as etapas de cálculo necessárias para aplicar o método. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se obter esses dados para os cinco critérios e reaplicar o modelo, alinhando-o a processos de auditoria da qualidade, rastreabilidade e conformidade para verificar a robustez e a confiabilidade dos resultados. Quando aplicada de forma transparente e fundamentada, essa metodologia poderá contribuir para enfrentar problemas relacionados à origem, ao transporte, ao processamento e à destinação das baterias, favorecendo decisões mais equilibradas sob as perspectivas logística, ambiental, econômica, regulatória e operacional. Além desses resultados, a organização de uma cadeia estruturada de logística reversa pode produzir benefícios sociais concretos, ainda que complementares, como a criação de oportunidades de trabalho especializado, a qualificação profissional, o estímulo à pesquisa e à inovação e a conscientização da população sobre o manuseio e o descarte seguro de baterias. Dessa forma, abordagem pode auxiliar para melhorar os fluxos de origem e destinação e fortalecer a sustentabilidade econômica, ambiental e social da cadeia.

Referências

AZADNIA, Amir Hossein; ONOFREI, George; GHADIMI, Pezhman. **Electric vehicles lithium-ion batteries reverse logistics implementation barriers analysis: a TISM-MICMAC approach. Resources, Conservation and Recycling, v. 174, art. 105751, 2021**. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105751. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105751>. Acesso em: 23 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: Presidência da República, 2010.** Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 24 ago. 2026.

ENERGY SOURCE. **Economia circular de baterias de lítio. 2026**. Disponível em: <https://energysource.com.br/>. Acesso em: 25 ago. 2026.

FAN, Zhiqiang; LUO, Yifan; LIANG, Ningning; LI, Shanshan. **A novel sustainable reverse logistics network design for electric vehicle batteries considering multi-kind and multi-technology. Sustainability, v. 15, n. 13, art. 10128, 2023.** DOI: 10.3390/su151310128. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151310128> Acesso em: 29 ago. 2026.

HANTANASIRAKUL, K.; SAWANGPHRUK, M. Sustainable reuse and recycling of spent Li-ion batteries from electric vehicles: chemical, environmental, and economical perspectives. Global Challenges, v. 7, n. 4, e2200212, 2023. DOI: 10.1002/gch2.202200212. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/gch2.202200212>. Acesso em: 25 ago. 2026.

HWANG, C. L.; YOON, K. **Multiple attribute decision making**: methods and applications: a state-of-the-art survey. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

IBAMA. **Pilhas e baterias. Brasília, DF: IBAMA, 2022**. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/pilhas-e-baterias>. Acesso em: 2 set. 2026.

LE, Viet Khai; LE, The Anh; LE, Quoc Bay; THAI, Minh Phuong; LE, Nguyen Phuong Lien. **Evaluation of reverse supply chain strategies for end-of-life EV batteries in Vietnam using AHP–TOPSIS. Journal of Emerging Science and Engineering, v. 4, n. 1, art. e61, 2026**. DOI: 10.61435/jese.2026.e61. Disponível em: <https://doi.org/10.61435/jese.2026.e61>.

LORENE. **Baterias de lítio. 2024**. Disponível em: <https://www.lorene.com.br/segmentos-de-atuacao/baterias-de-litio/>. Acesso em: 25 ago. 2026.

KUMAR, A.; HUYN, P.; VENNELAKANTI, R. **A digital solution framework for enabling electric vehicle battery circularity based on an ecosystem value optimization approach. npj Materials Sustainability, v. 1, art. 1, 2023**. DOI: 10.1038/s44296-023-00001-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s44296-023-00001-9>. Acesso em: 24 ago. 2026.

PAGLIARO, M.; MENEGUZZO, F**. Lithium battery reusing and recycling: a circular economy insight. Heliyon, v. 5, n. 6, e01866, 2019**. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01866. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6582158/>. Acesso em: 25 ago. 2026.

CHEN, Zhuowen; YILDIZBASI, Abdullah; WANG, Yan; SARKIS, Joseph. **Safety in lithium-ion battery circularity activities: a framework and evaluation methodology. Resources, Conservation and Recycling, v. 193, 2023, artigo 106962**. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106962. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106962. Acesso em: 27 set. 2026.

SOPHA, Bertha Maya; PURNAMASARI, Dwi Megah; MA'MUN, Sholeh. **Barriers and enablers of circular economy implementation for electric-vehicle batteries: from systematic literature review to conceptual framework. Sustainability, v. 14, n. 10, art. 6359, 2022**. DOI: 10.3390/su14106359. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14106359>. Acesso em: 2 set. 2026

TUPY. **Tupy inicia planta-piloto e aposta em tecnologia para tornar reciclagem de baterias mais eficiente. 2026**. Disponível em: <https://www.tupy.com.br/tupy-anuncia-primeira-planta-de-reciclagem-de-baterias-com-tecnologia-hidrometalurgica-flexivel/>. Acesso em: 24 ago. 2026.