



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia
de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

**INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIOS DE SUSTENTABILIDADE NA
SELEÇÃO DE MATERIAIS NO DESENVOLVIMENTO DE
VEÍCULOS URBANOS DE CARGA:
UMA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AHP NO PROCESSO DE
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO**

Claudio Marcio de Souza Oliveira

Universidade Federal Fluminense / claudioo@id.uff.br

Ana Carolina Maia Angelo

Universidade Federal Fluminense / angeloana@id.uff.br

Resumo

As decisões de seleção de materiais costumam priorizar critérios técnicos e econômicos, deixando os ambientais em segundo plano. Diante das crescentes demandas por sustentabilidade, este trabalho propõe integrar critérios ambientais ao PDP de Veículos Urbanos de Carga (VUCs), utilizando a metodologia AHP. O modelo considera critérios ambientais, econômicos e técnico-funcionais, definidos com base em dados técnicos e julgamentos de especialistas. Implementado em planilha Excel, o método foi validado por um estudo de caso que simulou a substituição do aço pelo alumínio, demonstrando sua eficácia em equilibrar as dimensões da sustentabilidade e apoiar decisões mais alinhadas aos objetivos estratégicos da indústria automotiva.

Palavras-chave: AHP; Sustentabilidade; Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP); Veículos Urbanos de Carga (VUCs); Multicritério.

Artigo Completo



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Abstract

Material selection decisions have traditionally prioritized technical and economic criteria, often relegating environmental impacts to a secondary role. In response to growing demands for sustainability and socio-environmental responsibility, this study proposes the integration of environmental criteria into the Product Development Process (PDP) of Urban Cargo Vehicles (UCVs) using the Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology. The model incorporates environmental, economic, and technical-functional dimensions, based on technical data and expert assessments collected through questionnaires with automotive professionals. Implemented in a Microsoft Excel spreadsheet, the tool was validated through a case study simulating the replacement of steel with aluminum in a vehicle component. The results demonstrate the model's ability to balance the three pillars of sustainability and support strategic, environmentally aligned decision-making in the automotive industry.

Keywords: Keywords: AHP; Sustainability; Product Development Process (PDP); Urban Cargo Vehicles (VUCs); Multicriteria.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade tornou-se uma prioridade global, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias mais limpas, como os Veículos Elétricos (VEs), que buscam reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e atender às metas ambientais internacionais. O setor de transporte é responsável por cerca de 23% das emissões globais de CO₂ (Guastali, 2025). No Brasil, observa-se um crescimento expressivo na adoção de veículos elétricos de carga, com aumento de 1.158% nos licenciamentos entre 2018 e 2023 (ANFAVEA, 2023), evidenciando uma transição gradual para uma mobilidade de menor impacto ambiental. Essa tendência está alinhada com os objetivos de neutralidade de carbono até 2050 e com a diversificação da matriz energética nacional (IEA, 2019; Torihara, 2022).

Entretanto, apesar dos benefícios ambientais durante a operação, os VEs apresentam desafios significativos na fase de produção, principalmente devido à fabricação das baterias, responsável por 13% a 22% das emissões totais (Serrano, 2024). A extração de matérias-primas como lítio, cobalto e níquel gera impactos ambientais relevantes, incluindo degradação de ecossistemas e poluição hídrica (Vargas, 2016). Nesse contexto, a Análise do Ciclo de Vida (ACV) e o ecodesign tornam-se essenciais para avaliar e mitigar esses impactos, promovendo o uso de materiais de menor emissão e fontes renováveis (Helmerts, Dietz e Weiss, 2020). Assim, a transição para uma mobilidade sustentável exige uma abordagem sistêmica, que equilibre inovação tecnológica, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental em todas as fases do ciclo de vida (Silva, Laktim e Engler, 2021).



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO SUSTENTÁVEL

O Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) consiste em um conjunto de atividades que transformam necessidades de mercado e restrições tecnológicas em especificações de produtos e processos produtivos. Esse processo, que se estende até o pós-lançamento, é caracterizado por sua complexidade e pela necessidade de integração entre diferentes áreas organizacionais (Alves et al., 2021). No contexto da sustentabilidade, o Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis (PDPS) visa incorporar critérios ambientais desde as etapas iniciais, buscando equilibrar desempenho técnico, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental (Teixeira, 2024). Essa abordagem inclui práticas como a redução do consumo de energia e recursos naturais, o uso de materiais recicláveis e o prolongamento da vida útil dos produtos, atendendo à crescente demanda por soluções mais sustentáveis.

Entretanto, a implementação efetiva do PDPS enfrenta desafios relacionados à estrutura organizacional e à integração entre gestão e tecnologia. As decisões tomadas nas fases iniciais do desenvolvimento são determinantes para o desempenho ambiental dos produtos, mas muitas empresas ainda carecem de mecanismos e políticas internas que permitam uma gestão ambiental ativa e sistêmica (Vezzoli, 2023;). Além disso, a literatura evidencia uma lacuna entre as propostas teóricas e a aplicação prática do PDPS, especialmente no alinhamento entre sustentabilidade e estratégia empresarial (Silva, 2024). Superar essas barreiras requer equipes interdisciplinares, engajamento da alta administração e a adoção de metodologias que integrem a análise do ciclo de vida e o ecodesign como instrumentos estratégicos de inovação sustentável.



**Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia
de Produção (SAEPRO) da EEL-USP**

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

2.3. ECODESIGN

O *ecodesign* pode ser entendido como a designação europeia equivalente ao *Design-for-the-Environment* (DfE) dos Estados Unidos, focando na redução do impacto ambiental de produtos e serviços durante todo o ciclo de vida. Abordagem pode ser conduzida por meio de três percursos principais (Sampaio *et al.*, 2018):

- Eficiência: Busca, por meio da tecnologia, tornar os produtos mais limpos e recicláveis.
- Sufficiência: Enfatiza o uso de materiais biológicos e biodegradáveis.
- Eficácia: Foca na redução da intensidade material, combinando desmaterialização com um maior conteúdo de conhecimento e informação nos produtos.

As principais estratégias do *ecodesign* incluem (Silva, 2020):

- Redução na quantidade e variedade de materiais;
- Substituição por materiais mais sustentáveis;
- Redução da quantidade de componentes;
- Utilização de dispositivos mecânicos e elétricos mais eficientes;
- Eliminação ou redução de embalagens;
- Uso de materiais que minimizam a necessidade de limpeza e manutenção.

Essas práticas tornam essencial a correta seleção e especificação de materiais, pois desempenham um papel significativo no desempenho ambiental dos produtos. Essas estratégias são aplicáveis a diversos tipos de produtos e processos, sendo genéricas e acessíveis a empresas de qualquer setor (Vezzoli, 2023; Silva, 2024).



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

2.3.1. Fatores Motivacionais e Barreiras na Implementação do Ecodesign

O *ecodesign* oferece uma estrutura que permite às empresas integrarem práticas sustentáveis no desenvolvimento de produtos, promovendo prevenção da poluição e produção limpa. As empresas que adotam essa abordagem podem obter benefícios como (Silva, 2020), conforme detalhado no Quadro 1:

Quadro 1 - Fatores motivacionais internos e externos para o *ecodesign*

Fatores Motivacionais Internos	Fatores Motivacionais Externos
Gestão e regulamentação	Exigências dos clientes
Redução de custos	Responsabilidade social
Inovação interna	Pressão de concorrentes
Responsabilidade ambiental	<i>Marketing</i> verde e imagem pública
Motivação dos funcionários	Fornecedores e inovação tecnológica

Fonte: Adaptado de Silva (2020).

2.4. DESIGN PARA A SUSTENTABILIDADE E CICLO DE VIDA DO PRODUTO

O *design* para a sustentabilidade considera os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida do produto, desde a concepção até o descarte ou reaproveitamento. A abordagem visa reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar resíduos e emissões, alinhando-se a princípios da ecoeficiência e da economia circular. O *design* centrado no ciclo de vida permite que produtos sejam concebidos para facilidade de desmontagem, recuperação de componentes e remanufatura, estendendo sua vida útil e otimizando o uso de materiais e energia (Vezzoli, 2023).



2.5. ANÁLISE MULTICRITÉRIO TOMADA DE DECISÃO

A Análise Multicritério de Decisão (MCDA) é uma metodologia amplamente utilizada para apoiar decisões complexas que envolvem múltiplos critérios conflitantes, integrando fatores quantitativos e qualitativos de forma estruturada e objetiva (Saaty, 1990; Gomes e Rangel, 2010; Dezem, 2024). Essa abordagem é aplicada em diversas áreas, como gestão pública, indústria e pesquisa, oferecendo uma base metodológica sólida para decisões estratégicas (Rangel; Brandalise, 2006; Sallum, 2024).

As ferramentas de MCDA promovem um processo decisório transparente e sistemático, incorporando as preferências de diferentes stakeholders e permitindo a conversão de dados qualitativos em indicadores numéricos. Dessa forma, auxiliam na seleção e priorização de alternativas com base em múltiplos critérios. Desde a década de 1970, os métodos multicritério têm se consolidado como aliados essenciais para a gestão sustentável e a priorização de projetos em ambientes corporativos e acadêmicos (Sousa; Rangel; Hernández, 2018).

2.5.1. Principais Métodos de MCDA

Vários métodos são amplamente utilizados para resolver problemas multicritério, cada um com suas particularidades e vantagens específicas. Os mais destacados incluem:

- **AHP (Analytic Hierarchy Process):** Estrutura o problema em uma hierarquia de objetivo, critérios e alternativas, com comparações pares a par entre critérios (Saaty, 1980; Bertahone; Brandalise, 2017).
- **PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation):** Utiliza funções de preferência para comparar pares de alternativas, gerando classificações parciais e completas (Sousa; Rangel; Hernández, 2018).



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

- **ELECTRE (Elimination and Choice Translating Reality):** Usa uma matriz de concordância e discordância para eliminar alternativas menos eficientes (Hosseinzadeh Lotfi, 2023).
- **MAUT (Multiattribute Utility Theory):** Atribui funções de utilidade para cada atributo e gera uma hierarquização completa das alternativas (Akpan & Morimoto, 2022).
- **MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique):** Converte julgamentos qualitativos em uma escala numérica para comparar alternativas (Hosseinzadeh Lotfi, 2023b).
- **Matriz Trade-Off:** Compara pares de atributos, calculando a relação de trade-off entre eles para identificar as preferências de diferentes stakeholders (Canepa *et al.*, 2024).
- **O ANP (Analytic Network Process)** é um método multicritério de apoio à decisão que estende o AHP ao permitir interdependências e retroalimentações entre critérios e alternativas, representando o problema como uma rede (em vez de uma hierarquia rígida) e sintetizando julgamentos par-a-par até obter prioridades globais. (Camp & Hernandez; 2021).
- **TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)** é um método multicritério que ranqueia alternativas pela proximidade ao ideal e distância do anti-ideal. É intuitivo, computacionalmente leve e funciona bem com critérios em sentidos opostos (Ramón-Canul *et al.*, 2021).

Cada método possui aplicações específicas e deve ser escolhido com base nas características do problema e na disponibilidade de dados. Por exemplo, o AHP é ideal para problemas estruturados hierarquicamente, enquanto o PROMETHEE e o ELECTRE são mais adequados para cenários com várias alternativas e critérios conflitantes (Aznar Bellver 2021).

3. METODO

A presente pesquisa é aplicada, pois busca gerar conhecimento voltado à solução de problemas reais, avaliando a sustentabilidade de materiais utilizados em Veículos Urbanos de Carga (VUCs) no Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) (Gil, 2019). Adota uma abordagem quantitativa, complementada por elementos qualitativos oriundos do julgamento de especialistas na atribuição de pesos e notas, conforme a lógica multicritério do método AHP (Saaty, 2008; Ishizaka; Labib, 2011), permitindo uma análise estruturada e aplicável ao contexto industrial (Vaidya; Kumar, 2006).

Em termos de objetivos, é uma pesquisa exploratória e descritiva: exploratória por identificar critérios técnicos, econômicos e ambientais relevantes à sustentabilidade na seleção de materiais automotivos (Vergara, 2011), e descritiva por organizar e comparar dados de forma sistemática, especialmente no estudo de caso que simula a substituição do aço pelo alumínio. Metodologicamente, combina pesquisa bibliográfica, consulta a especialistas e estudo de caso simulado, seguindo as recomendações de Yin (2015), a classificação metodologia esta resumida no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação Metodológica

Dimensão Metodológica	Classificação
Natureza	Aplicada
Objetivo	Exploratória e Descritiva
Abordagem	Quantitativa
Procedimentos Técnicos	Pesquisa bibliográfica, Consulta a especialistas e Estudo de caso

Fonte: Autor, 2025

3.1. ESTRUTURA DA METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em três etapas principais (Quadro 3):

- Levantamento de Informações – Reunião de dados e critérios relevantes sobre o impacto da substituição de materiais no contexto automotivo;
- Construção do Modelo de Decisão – Estruturação do modelo hierárquico e aplicação do AHP para definir os pesos dos critérios;
- Validação do Modelo – Aplicação do AHP em um caso Real.

Quadro 3 - Estrutura da Metodologia Aplicada

Fase I Levantamento		Fase II Construção			Fase III Validação
Objetivo Identificar os Critérios de PDP de um VUC considerando Sustentabilidade e Ciclo de Vida(critérios de <i>Ecodesign</i>)	Objetivo Obter a percepção do Setor sobre a Implementação da Sustentabilidade e Inovação	Objetivo Selecionar os Critérios de PDP	Objetivo Definir o Método MCD a ser utilizado na Ferramenta de Apoio	Objetivo Desenvolver uma Ferramenta dom abordagem multicritérios para apoio à tomada de decisão na escolha na Matéria Prima a ser utilizada	Objetivo Validação do Modelo
Método da pesquisa Revisão Sistemática da Literatura Consulta Documental	Método da pesquisa Questionário	Método da pesquisa Consulta a Especialista	Método da pesquisa Revisão da literatura	Método da pesquisa Utilização do Excel	Método da pesquisa Aplicar a ferramental considerando um caso real

Fonte: Autor (2025).

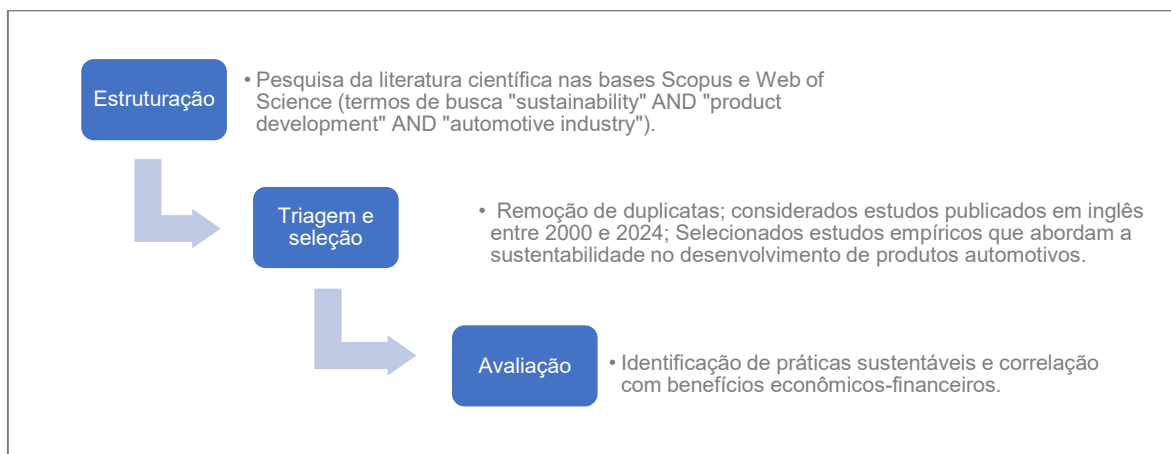
3.2. LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES

3.2.1. Revisão Sistemática

O presente estudo adotou a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com base no protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que fornece diretrizes para garantir transparência, qualidade e reprodutibilidade no processo de revisão (De Campos et al., 2023). Esse protocolo orienta a elaboração de revisões mais consistentes, padronizando etapas e critérios de análise amplamente utilizados nas Engenharias.

A aplicação da RSL seguiu etapas metodológicas rigorosas: definição de uma pergunta de pesquisa clara, estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão, realização de busca sistemática em bases acadêmicas, seleção dos estudos conforme os critérios definidos, extração dos dados relevantes e síntese dos resultados para responder à questão proposta. Esse processo assegura a validade científica da revisão e fundamenta as análises desenvolvidas neste estudo, conforme ilustrado no roteiro metodológico apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Roteiro Metodológico da Revisão Sistemática da Literatura



Fonte: O Autor (2025).

A estruturação da pesquisa compreendeu a definição das bases científicas, termos de busca e critérios de seleção. As bases Scopus e Web of Science foram escolhidas por sua ampla relevância nas áreas de Engenharia, Tecnologia e Ciências Ambientais (De Campos et al., 2023). Utilizou-se a expressão “sustainability” AND “product development” AND “automotive industry”, combinada com operadores booleanos (AND, OR, NOT). Foram incluídos estudos publicados entre 2000 e 2024, em inglês, com abordagem empírica sobre sustentabilidade no desenvolvimento de produtos automotivos, e excluídos artigos teóricos, revisões, publicações em outros idiomas, capítulos de livros e trabalhos de conferências. Assim, apenas estudos completos e



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

integralmente disponíveis nas bases selecionadas foram considerados, assegurando a consistência metodológica da revisão sistemática (Quadro 4).

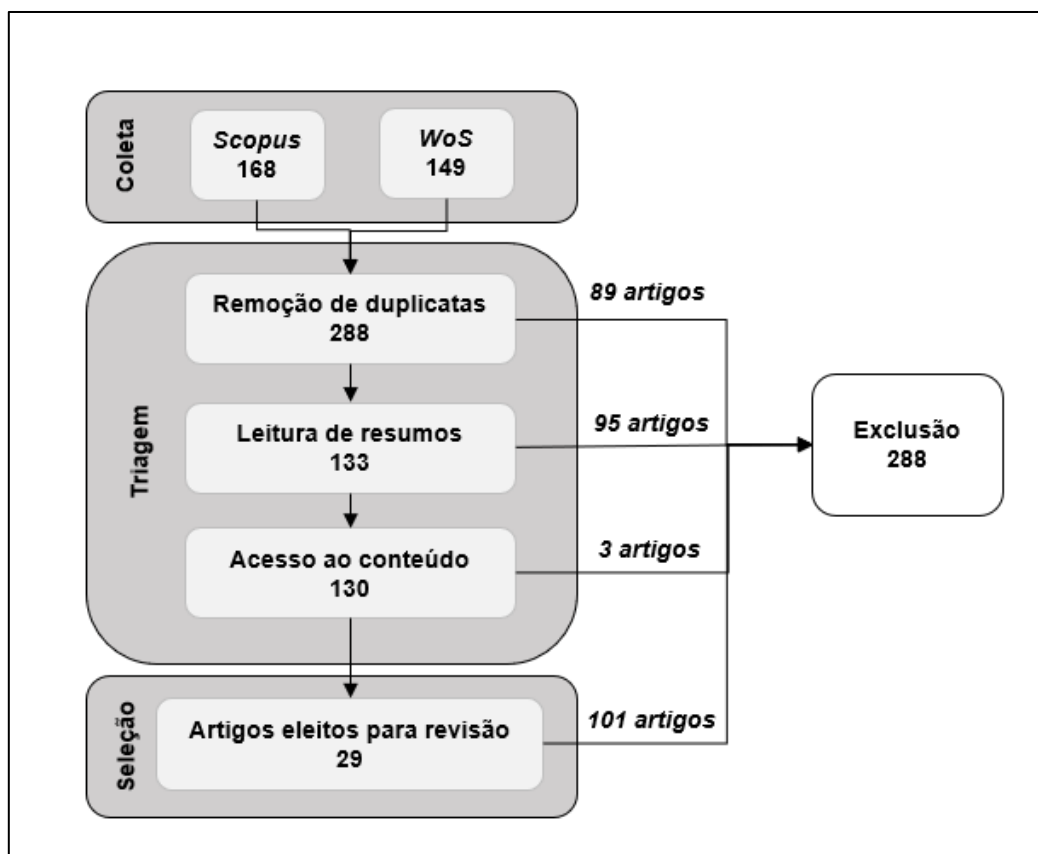
Quadro 4 - Critérios de Seleção e Classificação

Protocolo da RSL	Conteúdo
Objetivo	Como a integração de práticas de sustentabilidade no processo de desenvolvimento de produtos afeta o desempenho econômico-financeiro na Indústria Automotiva?
Questões da Pesquisa	a) Identificar as práticas de sustentabilidade mais comuns no desenvolvimento de produtos e classificá-las conforme o seu impacto potencial sobre os aspectos econômicos das empresas; b) Avaliar os benefícios econômicos resultantes da adoção de práticas sustentáveis no desenvolvimento de produtos, como aumento de receitas através de melhor posicionamento de mercado, acesso a novos segmentos de clientes e potenciais incentivos fiscais e subsídios
Base de Dados	Web Of Science Scopus
String de Buscas	"sustainability" AND "product development" AND "automotive industry"
Filtros	Ano de Publicação: 2000 - 2024 Tipo de publicação: Artigo Idioma: Inglês
Criterios de Exclusão	Artigos que não trate de Desenvolvimento do Produto Automotivo Estudos puramente teóricos sem dados empíricos Artigos de revisão que não adicionam novos dados ou insights

Fonte: O Autor (2025).

Como resultado das buscas obteve-se um total de 317 artigos, sendo 168 na *Scopus* e 149 na *Web of Science*. Deste total, 89 artigos foram excluídos por remoção de duplicatas e 199 foram rejeitados por não atenderem aos critérios de inclusão/exclusão. Assim, 29 artigos foram selecionados para a RSL (Figura 2).

Figura 2 - Fluxo de Seleção dos Artigos



Fonte: O Autor (2025).

3.2.2. Consulta Documental na Pesquisa

A consulta documental é uma técnica essencial para reunir informações secundárias já sistematizadas e registradas em documentos oficiais, normativos ou bibliográficos (Monteiro, 2023). Em pesquisas sobre sustentabilidade e ACV, a leitura das normas internacionais da ISO é fundamental para orientar e padronizar as práticas adotadas. A consulta dessas normas proporciona uma base metodológica robusta para garantir que o estudo esteja alinhado aos padrões globais e seja reconhecido como tecnicamente válido (Santos, 2019).



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

3.2.3. Metodologia da Pesquisa por Questionário

Esta pesquisa buscou compreender a adoção de práticas sustentáveis na indústria automotiva por meio de um questionário estruturado, que permitiu coletar dados primários sobre percepções e comportamentos relacionados à sustentabilidade e inovação (Pereira, 2024). Composto por perguntas fechadas e abertas, o instrumento garantiu uniformidade nas respostas e possibilitou avaliar temas como inovações verdes, eficiência energética e gestão sustentável da cadeia de suprimentos (Novikoff, 2020).

O questionário foi dividido em duas seções principais:

- Dados demográficos e profissionais: Esta seção buscou identificar o perfil dos respondentes e sua atuação dentro da indústria automotiva. Inclui perguntas como:
 - Você está atualmente envolvido em atividades relacionadas ao desenvolvimento do produto?
 - Há quanto tempo você atua na indústria automotiva?
 - Em qual área você atua dentro da organização?
 - Qual é o seu cargo ou função atual?
 - Qual o ramo da indústria em que você atua?
 - Em qual país você está localizado e atua na indústria automotiva?

Essas perguntas fornecem um panorama sobre a experiência dos participantes e sua posição dentro da organização, o que é essencial para compreender o contexto de suas respostas.

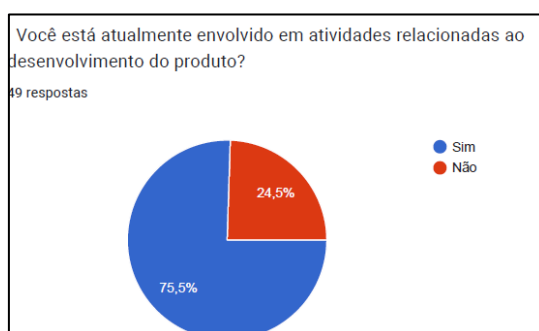
- Percepções sobre práticas sustentáveis e inovações: A segunda parte explora a adoção de práticas sustentáveis e a percepção dos respondentes sobre diferentes aspectos de sustentabilidade e inovação, tais como:
 - A otimização de processos operacionais resulta em uma redução significativa de resíduos e aumento da eficiência energética.
 - A adoção de tecnologias verdes, como veículos elétricos, melhora a competitividade e a sustentabilidade das empresas no mercado atual.

- A abordagem multicritério para avaliação de sustentabilidade é eficaz para melhorar a utilização de recursos nas indústrias.
- A gestão sustentável da cadeia de suprimentos é essencial para a eficiência logística no mercado.
- Com que frequência o mercado automotivo adota inovações verdes e tecnologias sustentáveis?

O questionário foi utilizado por sua eficiência em alcançar profissionais de diferentes áreas e níveis hierárquicos, garantindo coleta rápida, organizada e anônima. As questões fechadas permitiram análise quantitativa, enquanto as abertas captaram percepções qualitativas. Utilizou-se a Escala de Likert para avaliar a importância de práticas sustentáveis e o impacto de tecnologias verdes (Ribeiro et al., 2021).

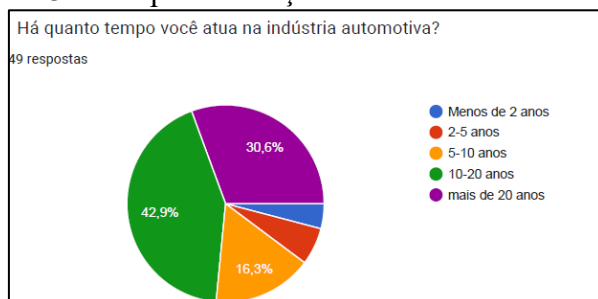
O formulário ficou disponível entre 1º de outubro e 15 de novembro, resultando em 49 respostas válidas, das quais 75,5% dos participantes atuam em Desenvolvimento de Produto (Figura 2), 73,5% têm mais de 10 anos de experiência e 67,4% são engenheiros, demonstrando perfil altamente qualificado e representativo do setor automotivo (Figura 3).

Figura 2 - Envolvimento dos Participantes no Desenvolvimento do Produto



Fonte: Google Forms – Autor (2025)

Figura 3 - Tempo de atuação na Indústria Automotiva



Fonte: Google Forms – Autor (2025)

As informações coletadas permitiram entender como empresas e profissionais do setor automotivo se adaptam às exigências de sustentabilidade, auxiliando na criação de ferramentas de apoio à decisão.

3.2.4. Construção do Modelo de Decisão com AHP

A construção do modelo seguiu o método AHP, proposto por Saaty (1980), amplamente reconhecido como adequado para a resolução de problemas de decisão complexos com múltiplos critérios. Essa metodologia foi escolhida por sua capacidade de estruturar problemas complexos em uma hierarquia de objetivos, critérios e alternativas, além de permitir a avaliação relativa por meio de comparações par a par entre critérios e alternativas, assegurando a consistência dos julgamentos e garantindo maior rigor metodológico e rastreabilidade dos resultados (Saaty, 1980; Ishizaka; Labib, 2011; Fiori, 2023).

3.2.5. Identificação dos Critérios

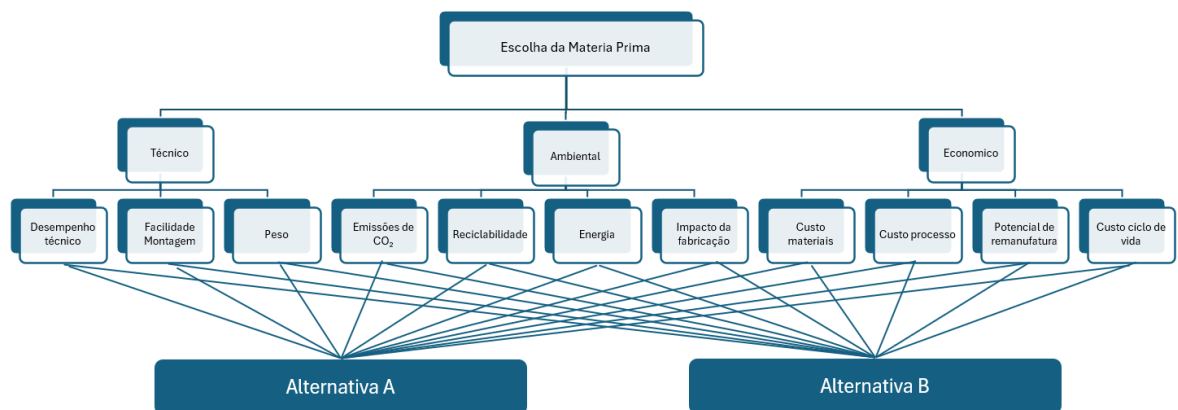
Os critérios de avaliação foram organizados em três dimensões: ambiental, econômica e técnico-funcional. As definições e métricas correspondentes encontram-se detalhadas no Quadro 5 e representados na árvore de decisão da Figura 4.

Quadro 5 - Identificação dos Critérios

Critério	Justificativa Técnica (Aplicável a Qualquer Material)	Fonte
Emissões De CO ₂	Emissões totais de GEE do ciclo de vida do componente (produção, logística, uso e fim de vida).	Antonacci, A. <i>Et Al.</i> (2022); Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024); Zhang, Z. <i>Et Al.</i> (2023)
Energia	Energia incorporada desde a extração até a manufatura do material.	Staniszewska, E. <i>Et Al.</i> (2020); Iyer, N. <i>Et Al.</i> (2024)
Reciclabilidade	Fração mássica tecnicamente/economicamente reciclável e reinserível na cadeia produtiva.	Istaitieh, S. <i>Et Al.</i> (2024); Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024); Antonacci, A. <i>Et Al.</i> (2022)
Impacto Da Fabricação	Cargas ambientais da produção do componente (transformações, energia, perdas).	Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024)
Peso	Massa do componente que afeta consumo, logística e manuseio.	Risali, E. <i>Et Al.</i> (2025); Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024)
Desempenho Técnico	Capacidade funcional sob requisitos do projeto. (Ex.: resistência/rigidez específica, vida em fadiga).	Risali, E. <i>Et Al.</i> (2025); Antonacci, A. <i>Et Al.</i> (2022); Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024)
Facilidade Montagem	Esforço requerido para montar/integrar o componente no produto.	Risali, E. <i>Et Al.</i> (2025); Antonacci, A. <i>Et Al.</i> (2022); Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024); A; Zhang, Z. <i>Et Al.</i> (2023);
Custo Materiais	Custo unitário da matéria-prima aplicada.	Risali, E. <i>Et Al.</i> (2025); Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024)
Custo Processo	Custo por peça de fabricação (tempo de ciclo, hora-máquina, setup, refugo).	Iyer, N. <i>Et Al.</i> (2024); Zhang, Z. <i>Et Al.</i> (2023); Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024)
Custo Ciclo De Vida	TCO: custos ao longo da vida útil (operação, manutenção, descarte), a valor presente.	Iyer, N. <i>Et Al.</i> (2024); Zhang, Z. <i>Et Al.</i> (2023); Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024)
Potencial De Remanufatura	Viabilidade técnica/econômica de remanufaturar e reinserir o componente após o uso.	Istaitieh, S. <i>Et Al.</i> (2024); Mafri, D. <i>Et Al.</i> (2024); Antonacci, A. <i>Et Al.</i> (2022)

Fonte: Autor (2025)

Figura 4 - Árvore de Decisão - AHP



Fonte: Autor (2025)

3.2.6. Definição dos Pesos dos Critérios no AHP

1. Participação de Especialistas

Nesta pesquisa, foi constituído um **painel de 10 especialistas**, número alinhado às recomendações da literatura sobre métodos multicritério de decisão (MCDM) baseados em consenso, que sugerem entre 5 e 10 participantes para garantir equilíbrio entre diversidade de opiniões e consistência dos julgamentos (Tarei et al., 2018). O painel foi formado exclusivamente por **engenheiros e executivos da empresa estudada**, assegurando que as avaliações refletissem a cultura organizacional e as práticas reais do processo de desenvolvimento de produto. Essa composição permitiu integrar conhecimento técnico e experiência prática, tornando os resultados mais confiáveis e diretamente aplicáveis ao contexto corporativo analisado.

A seleção dos especialistas seguiu critérios objetivos, considerando:

- Experiência profissional em projetos relacionados a VUCs;
- Conhecimento técnico em sustentabilidade automotiva e/ou design de materiais;

- Atuação estratégica em decisões sobre novas tecnologias.

Assim, assegurou-se que o painel contemplasse profissionais com atuação direta em áreas críticas, tais como desenvolvimento de produto, sustentabilidade, engenharia de materiais e planejamento técnico-econômico, em consonância com práticas recentes de aplicação industrial do AHP (Ishizaka; Labib, 2011; Tarei, 2019).

2. Etapas Detalhadas do Processo de AHP em Grupo

Definições e notação

1. Alternativas: $A_1, \dots, A_n$ ($n=3$ e $n=4$);
2. Decisores: $D_1, \dots, D_k$ ($k=10$);
3. Cada decisor D_k fornece uma matriz de comparação pareada

$$X^{(k)} = [x_{ij}^{(k)}], \text{ recíproca: } x_{ij}^{(k)} = \frac{1}{x_{ji}^{(k)}}; \quad \text{Eq. 1}$$

Tabela 1 - Escala de Saaty: 1-9

Valor da Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância.	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo.
2	Importância pequena de um critério sobre o outro.	A experiência e o julgamento favorecem levemente um critério em relação ao outro.
4	Importância grande ou essencial.	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um critério em relação ao outro.
6	Importância muito grande ou demonstrada.	Um critério é muito fortemente favorecido em relação ao outro; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
8	Importância absoluta.	A evidência favorece um critério em relação ao outro com o mais alto grau de certeza.
Inversos dos valores anteriores	Se o critério i recebe um determinado valor quando comparado com o critério j , então j tem o valor inverso quando comparado com i .	Uma designação razoável.
Números racionais	Razões resultantes da escala.	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n , somente para completar a matriz.

Fonte: Autor adaptado de Saaty (1991)



3. Coleta das Matrizes de Julgamento

As coletas de dados se deram por entrevistas com especialistas, tiveram caráter semiestruturado e finalidade dupla:

- Contextualizar e refinar os critérios de avaliação (ambientais, econômicos e técnico-funcionais) e;
- Levantar os julgamentos, par a par necessários ao AHP.

Antes de cada sessão, apresentou-se o objetivo do estudo, a escala fundamental de Saaty (1–9) e exemplos práticos; em seguida, procedeu-se a uma entrevista guiada pelo questionário conforme apêndice IV, realizada individualmente, com duração aproximada de 30–45 minutos. Os julgamentos foram registrados em matrizes recíprocas e verificou-se o índice de consistência (RC);

Para confidencialidade, os participantes foram codificados como Decisor 1, Decisor 2, ..., e a participação foi voluntária, mediante consentimento informado. As matrizes individuais resultantes encontram-se apresentadas nos Quadros 6, 7, 8 e 9, as quais subsidiam a agregação dos julgamentos e a síntese multicritério do modelo.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Quadro 6 - Agregação dos Julgamentos Individuais 1 - Ambiental x Econômico x Técnico

AHP - Agregação dos Julgamentos Individuais (AIJ)			
Ambiental x Econômico x Técnico			
Matriz Decisor 1			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	0,20	0,14
Econômico	5,00	1,00	0,11
Técnico	7,00	9,00	1,00
Matriz Decisor 2			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	0,20	0,20
Econômico	5,00	1,00	0,20
Técnico	5,00	5,00	1,00
Matriz Decisor 3			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	0,20	0,20
Econômico	5,00	1,00	1,00
Técnico	5,00	1,00	1,00
Matriz Decisor 4			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	0,33	0,14
Econômico	3,00	1,00	0,20
Técnico	7,00	5,00	1,00
Matriz Decisor 5			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	0,20	0,20
Econômico	5,00	1,00	5,00
Técnico	5,00	0,20	1,00
Matriz Decisor 6			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	7,00	0,14
Econômico	0,14	1,00	0,20
Técnico	7,00	5,00	1,00
Matriz Decisor 7			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	0,14	0,11
Econômico	7,00	1,00	0,20
Técnico	9,00	5,00	1,00
Matriz Decisor 8			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	0,14	0,14
Econômico	7,00	1,00	5,00
Técnico	7,00	0,20	1,00
Matriz Decisor 9			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	1,00	0,11
Econômico	9,00	1,00	0,33
Técnico	9,00	3,00	1,00
Matriz Decisor 10			
	Ambiental	Econômico	Técnico
Ambiental	1,00	0,11	0,11
Econômico	9,00	1,00	7,00
Técnico	9,00	0,14	1,00

Fonte: Autor (2025)

Quadro 7 - Agregação dos Julgamentos Individuais II - Peso x Desempenho Técnico x Facilidade de Montagem

AHP - Agregação dos Julgamentos Individuais (AII)			
Peso x Desempenho Técnico x Facilidade de Montagem			
Matriz Decisor 1			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	1,00	5,00
Desempenho técnico	1,00	1,00	7,00
Facilidade de montagem	0,20	0,14	1,00
Matriz Decisor 2			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	0,11	5,00
Desempenho técnico	9,00	1,00	7,00
Facilidade de montagem	0,20	0,14	1,00
Matriz Decisor 3			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	0,20	0,33
Desempenho técnico	5,00	1,00	5,00
Facilidade de montagem	3,00	0,20	1,00
Matriz Decisor 4			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	0,20	3,00
Desempenho técnico	5,00	1,00	5,00
Facilidade de montagem	0,33	0,20	1,00
Matriz Decisor 5			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	0,11	0,20
Desempenho técnico	9,00	1,00	5,00
Facilidade de montagem	5,00	0,20	1,00
Matriz Decisor 6			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	0,14	0,20
Desempenho técnico	7,00	1,00	7,00
Facilidade de montagem	5,00	0,14	1,00
Matriz Decisor 7			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	0,11	3,00
Desempenho técnico	9,00	1,00	5,00
Facilidade de montagem	0,33	0,20	1,00
Matriz Decisor 8			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	0,20	3,00
Desempenho técnico	5,00	1,00	5,00
Facilidade de montagem	0,33	0,20	1,00
Matriz Decisor 9			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	0,14	0,33
Desempenho técnico	7,00	1,00	7,00
Facilidade de montagem	3,00	0,14	1,00
Matriz Decisor 10			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	1,00	3,00
Desempenho técnico	1,00	1,00	7,00
Facilidade de montagem	0,33	0,14	1,00

Fonte: Autor (2025)

Quadro 8 - Agregação dos Julgamentos Individuais III – Custo de Materiais x Custo de Processo x Custo do Ciclo da Vida x Potencial de Remanufatura

AHP - Agregação dos Julgamentos Individuais (AU)				
Custo de Materiais x Custo de Processo x Custo do ciclo de vida x Potencial de Remanufatura				
Matriz Decisor 1				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	1,00	0,20	5,00
Custo do processo	1,00	1,00	0,20	5,00
Custo do ciclo de vida	5,00	5,00	1,00	3,00
Potencial de remanufatura	0,20	0,20	0,33	1,00
Matriz Decisor 2				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	0,33	1,00	1,00
Custo do processo	3,00	1,00	3,00	3,00
Custo do ciclo de vida	1,00	0,33	1,00	3,00
Potencial de remanufatura	1,00	0,33	0,33	1,00
Matriz Decisor 3				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	0,20	0,20	0,33
Custo do processo	5,00	1,00	0,20	1,00
Custo do ciclo de vida	5,00	5,00	1,00	0,33
Potencial de remanufatura	3,00	1,00	3,00	1,00
Matriz Decisor 4				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	0,20	3,00	3,00
Custo do processo	5,00	1,00	5,00	5,00
Custo do ciclo de vida	0,33	0,20	1,00	5,00
Potencial de remanufatura	0,33	0,20	0,20	1,00
Matriz Decisor 5				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	5,00	5,00	5,00
Custo do processo	0,20	1,00	0,33	3,00
Custo do ciclo de vida	0,20	3,00	1,00	3,00
Potencial de remanufatura	0,20	0,33	0,33	1,00
Matriz Decisor 6				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	0,20	0,20	0,33
Custo do processo	5,00	1,00	0,20	1,00
Custo do ciclo de vida	5,00	5,00	1,00	0,33
Potencial de remanufatura	3,00	1,00	3,00	1,00
Matriz Decisor 7				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	1,00	3,00	3,00
Custo do processo	1,00	1,00	5,00	3,00
Custo do ciclo de vida	0,33	0,20	1,00	1,00
Potencial de remanufatura	0,33	0,33	1,00	1,00
Matriz Decisor 8				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	0,33	0,20	0,33
Custo do processo	3,00	1,00	0,20	1,00
Custo do ciclo de vida	3,00	5,00	1,00	0,33
Potencial de remanufatura	1,00	1,00	3,00	1,00
Matriz Decisor 9				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	3,00	3,00	3,00
Custo do processo	0,33	1,00	3,00	3,00
Custo do ciclo de vida	0,33	0,33	1,00	1,00
Potencial de remanufatura	0,33	0,33	1,00	1,00
Matriz Decisor 10				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	0,33	0,33	0,33
Custo do processo	3,00	1,00	0,33	1,00
Custo do ciclo de vida	3,00	3,00	1,00	0,33
Potencial de remanufatura	3,00	1,00	3,00	1,00

Fonte: Autor (2025)

Quadro 9 - Agregação dos Julgamentos Individuais IV – Emissões x Energia x Reciclabilidade x Impacto de Fabricação

AHP - Agregação dos Julgamentos Individuais (AII)				
Emissões x Energia x Reciclabilidade x Impacto da Fabricação				
Matriz Decisor 1				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	0,11	1,00	0,11
Energia	9,00	1,00	9,00	9,00
Reciclabilidade	9,00	0,11	1,00	0,11
Impacto da Fabricação	9,00	0,11	9,00	1,00
Matriz Decisor 2				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	1,00	1,00	1,00
Energia	1,00	1,00	1,00	1,00
Reciclabilidade	1,00	1,00	1,00	1,00
Impacto da Fabricação	1,00	1,00	1,00	1,00
Matriz Decisor 3				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	3,00	0,33	3,00
Energia	0,33	1,00	0,33	3,00
Reciclabilidade	3,00	3,00	1,00	3,00
Impacto da Fabricação	0,33	0,33	0,33	1,00
Matriz Decisor 4				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	5,00	1,00	0,33
Energia	0,20	1,00	0,33	5,00
Reciclabilidade	0,20	0,33	1,00	3,00
Impacto da Fabricação	3,00	0,20	0,33	1,00
Matriz Decisor 5				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	0,11	0,33	0,20
Energia	9,00	1,00	0,20	3,00
Reciclabilidade	3,00	0,33	1,00	0,33
Impacto da Fabricação	5,00	0,33	3,00	1,00
Matriz Decisor 6				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	7,00	0,14	0,11
Energia	0,14	1,00	0,14	0,11
Reciclabilidade	7,00	7,00	1,00	7,00
Impacto da Fabricação	9,00	9,00	0,14	1,00
Matriz Decisor 7				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	0,14	0,14	0,11
Energia	7,00	1,00	0,11	0,14
Reciclabilidade	7,00	9,00	1,00	0,14
Impacto da Fabricação	9,00	7,00	7,00	1,00
Matriz Decisor 8				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	7,00	7,00	5,00
Energia	0,14	1,00	0,14	0,14
Reciclabilidade	0,14	7,00	1,00	5,00
Impacto da Fabricação	0,20	7,00	0,20	1,00
Matriz Decisor 9				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	0,14	7,00	7,00
Energia	7,00	1,00	7,00	9,00
Reciclabilidade	0,14	0,14	1,00	0,14
Impacto da Fabricação	0,14	0,11	7,00	1,00
Matriz Decisor 10				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação
Emissões	1,00	0,14	5,00	1,00
Energia	7,00	1,00	5,00	3,00
Reciclabilidade	0,20	0,20	1,00	0,20
Impacto da Fabricação	1,00	0,33	5,00	1,00

Fonte: Autor (2025)

3.2.7. Integração das avaliações dos decisores

Após a coleta das matrizes de comparações pareadas, construiu-se uma matriz de consenso por meio da média geométrica, método escolhido por suas propriedades matemáticas que garantem consistência e representatividade nos julgamentos do grupo, sendo o operador mais adequado ao AHP (Ferreira, 2024; Herreira, 2021; Santin, 2023).

A matriz de cada decisor D_k , é representada por

$$X^{(k)} = [a_{ij}^{(k)}], \text{ sendo } a_{ij}^{(k)} \quad \text{Eq. 2}$$

o julgamento do decisor k sobre a relação de importância do critério i em relação ao critério j . A matriz final do grupo, $\bar{X}$, é obtida pela média geométrica dos elementos correspondentes das matrizes individuais, segundo a seguinte formulação:

$$\bar{a}_{ij} = \left(\prod_{k=1}^m a_{ij}^{(k)} \right)^{1/m}, i, j = 1, \dots, n \quad \text{Eq. 3}$$

em que m representa o número de decisores (neste estudo, $m=10$), e n o número de critérios considerados (aqui, $n=4$ e $n=3$).

A utilização da média geométrica apresenta vantagens metodológicas relevantes (Ferreira, 2024; Herreira, 2021; Santin 2023).:

- (i) preserva a reciprocidade da matriz ($\bar{a}_{ij} = 1/\bar{a}_{ji}$);
- (ii) é invariante a mudanças de escala multiplicativa, respeitando a lógica da escala fundamental de Saaty;
- (iii) é amplamente reconhecida como o procedimento mais adequado para a agregação de julgamentos em grupo no AHP.

Uma vez obtida a matriz agregada $\bar{X}$, procede-se ao cálculo das prioridades do grupo. Para cada critério i , calcula-se a média geométrica da linha correspondente:

$$\tilde{w}_i = \left(\prod_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \right)^{1/n} \quad \text{Eq. 4}$$

e, em seguida, normaliza-se o vetor $\bar{w}$ para obter o vetor de prioridades finais:

$$w_1 = \frac{\tilde{w}_i}{\sum_{p=1}^n \tilde{w}_p}, i = 1, \dots, n \quad \text{Eq. 5}$$

Multiplique a matriz agregada pelo vetor de prioridades:

$$z = \bar{X} \cdot w \quad \text{Eq. 6}$$

- O resultado é um vetor $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$.

Determinar λ_{max}

Para cada componente:

$$\frac{z_i}{w_1} \quad \text{Eq. 7}$$

Tirar a média desses valores:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{w_1} \quad \text{Eq. 8}$$

Índice de consistência (CI)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Eq. 9}$$

Razão de consistência (CR)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Eq. 10}$$

- Onde RI é o *Random Index de Saaty*(Quadro10), que depende do tamanho da matriz n.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Quadro 10 - *Random Index de Saaty*

Tamanho da matriz (n)	RI
1	0
2	0
3	0,58
4	0,9
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45

Fonte: Autor adaptado de Saaty (1991)

➤ Para $n = 4$, $RI = 0,90$

➤ Para $n = 3$, $RI = 0,58$

- Se $CR \leq 0,10$: matriz considerada consistente.
- Se $CR > 0,10$: indica inconsistências relevantes nos julgamentos.

3.3. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA

Para operacionalizar o modelo proposto, foi desenvolvida uma ferramenta em Microsoft Excel, escolhida por sua acessibilidade e capacidade de automatizar cálculos multicritério de forma transparente. A planilha reproduz as matrizes de comparações e pesos definidos pelo painel de especialistas, permitindo aplicação estruturada do método AHP. Seu núcleo concentra os módulos de cálculo e decisão, responsáveis pela normalização das matrizes, agregação dos julgamentos, cálculo dos pesos relativos e verificação da consistência coletiva, garantindo reprodutibilidade e controle metodológico.

A organização da ferramenta contempla diferentes módulos que correspondem às etapas do processo decisório. O módulo Cálculo concentra os parâmetros consolidados no capítulo anterior, conforme mostrado nas Figuras 5, 6, 7 e 8, as matrizes de comparações, pesos e, quando pertinente, desdobramentos em subcritérios, que permanecem fixos na ferramenta e só podem ser modificados mediante a realização de um novo painel de especialistas. Ainda neste módulo temos o núcleo operacional da planilha (Figura 9) que é responsável por aplicar as fórmulas do AHP, realizando a normalização das matrizes, a agregação dos julgamentos por meio da média geométrica, o cálculo dos pesos relativos e a verificação da consistência coletiva.

Figura 5 - Matriz Julgamento - Ambiental x Econômico x Técnico

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2													
3	Matriz de julgamento												
4		Ambiental	Economico	Tecnico									
5	Ambiental	1											
6	Economico		1										
7	Tecnico			1									
8	Soma	1,000	1,000	1,000									
9	Matriz de julgamentos NORMALIZADA												
10		Ambiental	Economico	Tecnico	Autovetor								
11	Ambiental	1,000	0,000	0,000	Média								
12	Economico	0,000	1,000	0,000	0,333								
13	Tecnico	0,000	0,000	1,000	0,333								
14					1,000								
15													
16													

Preencher as células de cor azul					
nº itens comparados: 3					
Cálculo da Consistência					
Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4	Passo 5	Check
#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!
	0,000				
	0,000				

Fonte: Autor (2025)

Figura 6 - Matriz Julgamento - Ambiental

Ambiental										
Matriz de julgamentos dos critérios										
	Emissões de CO ₂	Energia	Reciclabilidade	Impacto da fabricação						
Emissões de CO ₂	1									
Energia		1								
Reciclabilidade			1							
Impacto da fabricação				1						
Soma	1,000	1,000	1,000	1,000						
Matriz de julgamentos dos critérios NORMALIZADA										
	Emissões de CO ₂	Energia	Reciclabilidade	Impacto da fabricação	Média					
Emissões de CO ₂	1,000	0,000	0,000	0,000	0,250					
Energia	0,000	1,000	0,000	0,000	0,250					
Reciclabilidade	0,000	0,000	1,000	0,000	0,250					
Impacto da fabricação	0,000	0,000	0,000	1,000	0,250					

Preencher as células de cor azul

nº itens comparados: 4

Cálculo da Consistência

Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4	Passo 5	Check
#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!
#VALOR!	#VALOR!				
#VALOR!	#VALOR!				
#VALOR!	#VALOR!				

Fonte: Autor (2025)

Figura 7 - Matriz Julgamento - Econômico

Econômico										
Matriz de julgamentos dos critérios										
	Custo materiais	Custo processo	Custo ciclo de vida	Potencial de remanufatura						
Custo materiais	1									
Custo processo		1								
Custo ciclo de vida			1							
Potencial de remanufatura				1						
Soma	1,000	1,000	1,000	1,000						
Matriz de julgamentos dos critérios NORMALIZADA										
	Custo materiais	Custo processo	Custo ciclo de vida	Potencial de remanufatura	Média					
Custo materiais	1,000	0,000	0,000	0,000	0,250					
Custo processo	0,000	1,000	0,000	0,000	0,250					
Custo ciclo de vida	0,000	0,000	1,000	0,000	0,250					
Potencial de remanufatura	0,000	0,000	0,000	1,000	0,250					

Preencher as células de cor azul

nº itens comparados: 4

Cálculo da Consistência

Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4	Passo 5	Check
#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!
#VALOR!	#VALOR!				
#VALOR!	#VALOR!				
#VALOR!	#VALOR!				

Fonte: Autor (2025)

Figura 8 - Matriz de Julgamentos - Técnico

Técnicos										
Matriz de julgamentos dos critérios										
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade montagem							
Peso	1									
Desempenho técnico		1								
Facilidade montagem			1							
Soma	1,000	1,000	1,000							
Matriz de julgamentos dos critérios NORMALIZADA										
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade montagem							
Peso	1,000	0,000	0,000							
Desempenho técnico	0,000	1,000	0,000							
Facilidade montagem	0,000	0,000	1,000							

Preencher as células de cor azul

nº itens comparados: 3

Cálculo da Consistência

Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4	Passo 5	Check
#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!	#VALOR!
	0,000				
	0,000				

Fonte: Autor (2025)

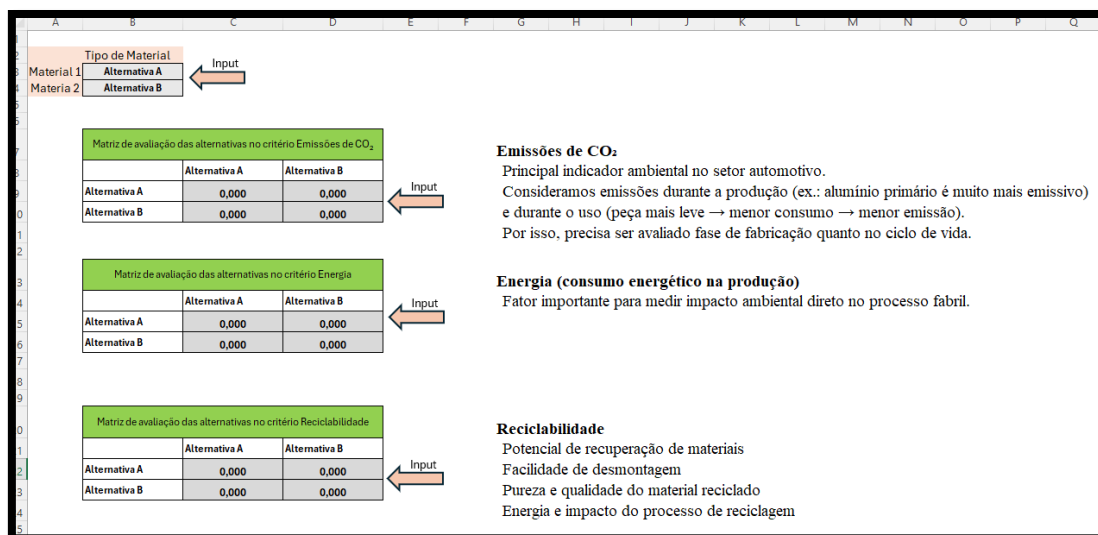
Figura 9 - Núcleo Operacional

Ambiental					
Agregação dos resultados					
	Emissões de CO ₂	Energia	Reciclabilidade	Impacto da fabricação	Score final
Alternativa A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Alternativa B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Peso dos critérios	0,250	0,250	0,250	0,250	0,000
Econômico					
Agregação dos resultados					
	Custo materiais	Custo processo	Custo ciclo de vida	Potencial de	Score final
Alternativa A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Alternativa B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Peso dos critérios	0,250	0,250	0,250	0,250	1,000
Técnicos					
Agregação dos resultados					
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade montagem	Score final	
Alternativa A	0,000	0,000	0,000	0,000000	0,000000
Alternativa B	0,000	0,000	0,000	0,000000	0,000000
Peso dos critérios	0,333	0,333	0,333	0,000000	0,000000

Fonte: Autor (2025)

No módulo Input (Figura 10), são inseridas as matrizes de avaliação das alternativas conforme os critérios ambientais, econômicos e técnicos, seguindo a escala fundamental do AHP. Nesse espaço também é definido o tipo de material a ser comparado, garantindo que a análise ocorra de forma estruturada e coerente com os parâmetros estabelecidos.

Figura 10 - Módulo *Input*



Tipo de Material
Material 1: Alternativa A
Material 2: Alternativa B

Matriz de avaliação das alternativas no critério Emissões de CO₂

	Alternativa A	Alternativa B
Alternativa A	0,000	0,000
Alternativa B	0,000	0,000

Emissões de CO₂
Principal indicador ambiental no setor automotivo.
Consideramos emissões durante a produção (ex.: alumínio primário é muito mais emissivo) e durante o uso (peça mais leve → menor consumo → menor emissão).
Por isso, precisa ser avaliado fase de fabricação quanto no ciclo de vida.

Matriz de avaliação das alternativas no critério Energia

	Alternativa A	Alternativa B
Alternativa A	0,000	0,000
Alternativa B	0,000	0,000

Energia (consumo energético na produção)
Fator importante para medir impacto ambiental direto no processo fabril.

Matriz de avaliação das alternativas no critério Reciclabilidade

	Alternativa A	Alternativa B
Alternativa A	0,000	0,000
Alternativa B	0,000	0,000

Reciclabilidade
Potencial de recuperação de materiais
Facilidade de desmontagem
Pureza e qualidade do material reciclado
Energia e impacto do processo de reciclagem

Fonte: Autor (2025)

Por fim, o módulo *Output* (figura 11) consolida os resultados, apresentando o vetor de prioridades finais, o ranking das alternativas e a indicação da opção mais sustentável no contexto analisado.

Figura 11 - Modulo *Output*

Matriz de Decisão poderada matriz de julgamento				
Alternativas/Critérios	Ambiental	Economico	Tecnico	%
Alternativa A	0,00	0,00	0,00	0,50
Alternativa B	0,00	0,00	0,00	0,50
Escolha	Alternativa A ou Alternativa B	Alternativa A ou Alternativa B	Alternativa A ou Alternativa B	

Fonte: Autor (2025)

Dessa forma, a planilha em Excel não se restringe a um repositório de dados, mas configura-se como uma calculadora comparativa entre materiais, que aplica automaticamente os valores parametrizados para avaliar alternativas nas dimensões econômica, técnica e ambiental. Essa estrutura assegura clareza, rastreabilidade e

robustez ao processo decisório, além de garantir a replicabilidade do modelo em futuras aplicações acadêmicas e corporativas.

4. APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo de Avaliação Multicritério desenvolvido com base no método AHP. Foram considerados os critérios ambiental, econômico e técnico, desdobrados em subcritérios específicos, com o objetivo de comparar duas alternativas de materiais: Alumínio Injetado e Tubo + Estampo (aço). Os julgamentos utilizados foram parametrizados a partir do painel de especialistas descrito no capítulo anterior e processados na ferramenta em Excel desenvolvida para este estudo.

4.1. ESTUDO DE CASO

A validação do modelo proposto foi por meio de um estudo de caso real, no qual se avalia a melhor opção do aço pelo alumínio na construção de VUCs. A Figura 12 ilustra o Caminhão VUC e um Caminhão Semi-pesado. A escolha deste cenário tem como objetivo testar a capacidade do modelo multicritério de decisão (baseado no método AHP) em identificar a alternativa mais sustentável.

Figura 12 - Veículo Urbano de Carga (VUC)



Fonte: Transporte Rodoviário de Cargas

4.1.1. Justificativa para a avaliação entre o Aço e o Alumínio

O estudo é relevante por comparar aço e alumínio, materiais amplamente usados na indústria automotiva, com diferentes impactos de sustentabilidade (Da Cunha et al., 2023). O aço tem baixo custo e alta resistência, mas gera mais CO₂, enquanto o alumínio, mais leve e eficiente energeticamente, exige maior consumo de energia em sua fabricação (Menegon, 2024).

A Figura 13 apresenta dois exemplos de suportes de degrau, um em alumínio fundido sob alta pressão e outro tubular, composto por componentes estampados e soldados. Ambos são análogos ao caso estudado, pois exercem a função de suportar o degrau da cabine.

Figura 13 – Exemplos de Suporte Tubular e Suporte em Alumínio Injetado



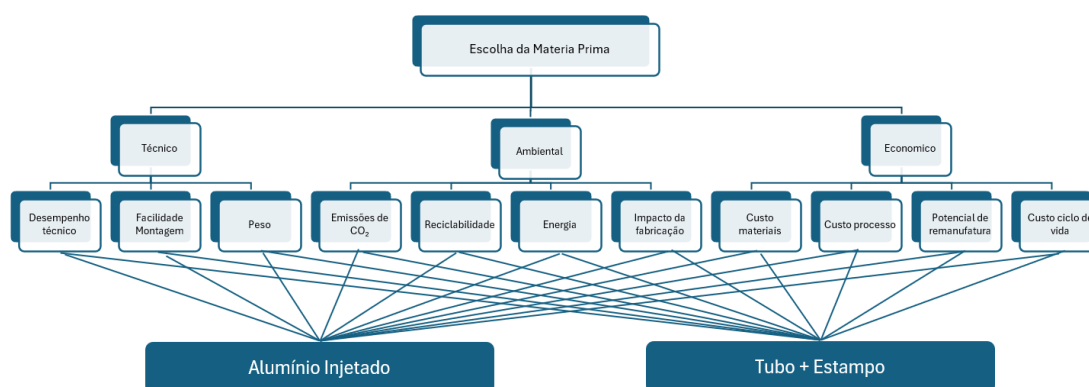
Fonte: Autor (2025)

4.2. RELEVÂNCIA

A comparação entre o aço e o alumínio no contexto dos Veículos VUCs) constitui uma oportunidade relevante para validar a eficácia do modelo proposto, uma vez que permite integrar múltiplas dimensões de análise. Do ponto de vista ambiental, destacam-se aspectos como o impacto ao longo do ciclo de vida, as emissões de carbono associadas e

a energia incorporada nos processos de produção. Sob a perspectiva econômica, a avaliação contempla o custo total de substituição e o potencial de retorno sobre o investimento. Já no âmbito técnico, são considerados fatores relacionados ao desempenho dos materiais, à durabilidade estrutural e aos efeitos sobre as necessidades de manutenção do veículo, na Figura 14 temos a árvore de decisão de estudo aplicado. Essa abordagem multidimensional possibilita uma análise abrangente, compatível com os princípios da sustentabilidade aplicados ao setor automotivo.

Figura 141 - Arvore AHP (Alumínio Injetado x Tubo + Estampo)



Fonte: Autor (2025)

4.3. CONSTRUÇÃO DAS MATRIZES DE JULGAMENTO DAS ALTERNATIVAS

No módulo Input, são estruturadas as matrizes de avaliação das alternativas para cada critério. O Quadro 11 exemplifica o critério Emissões de CO₂, no qual “Alumínio Injetado” foi considerado fortemente mais favorável que “Tubo + Estampo”, recebendo valor 5 na escala de Saaty, com o recíproco 0,200 na posição inversa, preservando a reciprocidade do AHP. Esse procedimento é repetido para todos os critérios ambientais, econômicos e técnicos, formando o conjunto de matrizes-base do modelo. Os valores são



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

definidos pelo painel de especialistas e permanecem fixos, sendo alterados apenas em novas rodadas de julgamento.

4.3.1. Emissões de CO₂

No subcritério Emissões de CO₂, o alumínio apresenta maior emissão na produção (≈ 16 kg CO₂/kg), porém compensa pelo menor peso e economia de combustível, especialmente quando reciclado (0,5–1 kg CO₂/kg). O aço emite menos na produção (1,9–2,5 kg CO₂/kg), mas aumenta o consumo durante o uso. Assim, o alumínio mostra melhor desempenho global, conforme representado no Quadro 11.

Quadro 11 - Matriz de avaliação das alternativas no critério Emissões de CO₂

Matriz de avaliação das alternativas no critério Emissões de CO ₂		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,000	5,000
Tubo + Estampo	0,200	1,000

Fonte: Autor (2025)

4.3.2. Energia

No subcritério Energia Incorporada, o alumínio injetado consome entre 150 e 200 MJ/kg na produção primária, reduzindo para cerca de 10% quando reciclado. Já o aço apresenta consumo médio de 20 a 35 MJ/kg. Assim, o Tubo + Estampo (aço) mostra-se mais

favorável por demandar menos energia na fabricação, conforme representado no Quadro 12

Quadro 12 -Matriz de avaliação das alternativas no critério Energia

Matriz de avaliação das alternativas no critério Energia		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	0,14
Tubo + Estampo	7,00	1,00

Fonte: Autor (2025)

4.3.3. Reciclabilidade

No subcritério Reciclabilidade, tanto o alumínio injetado quanto o aço apresentam altas taxas de reaproveitamento (90%–95%). Contudo, o alumínio destaca-se pelo maior valor de sucata e pela reciclagem mais eficiente em termos energéticos e ambientais, mostrando desempenho ligeiramente superior ao do Tubo + Estampo (aço), conforme representado no Quadro 13.

Quadro 13 - Matriz de avaliação das alternativas no critério Reciclabilidade

Matriz de avaliação das alternativas no critério Reciclabilidade		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	3,00
Tubo + Estampo	0,33	1,00

Fonte: Autor (2025)

4.3.4. Impacto da Fabricação

No subcritério Impacto da Fabricação, o alumínio injetado apresenta maior impacto ambiental devido ao processo de fundição sob pressão, que exige alto consumo energético e gera mais resíduos. O aço, produzido por laminação e estampagem, consome menos energia e causa menor impacto, sendo fortemente mais favorável nesse critério, conforme Quadro 14.

Quadro 14 - Matriz de avaliação das alternativas no critério Impacto da fabricação

Matriz de avaliação das alternativas no critério Impacto da fabricação		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	0,20
Tubo + Estampo	5,00	1,00

Fonte: Autor (2025)

4.3.5. Custo de Materiais

No subcritério Custo de Materiais, embora o alumínio injetado tenha preço unitário maior (R\$ 20–25/kg) que o aço (R\$ 7–10/kg), sua menor densidade e peso final resultam em melhor relação custo-desempenho. Assim, considerando a funcionalidade equivalente, o alumínio mostra-se mais favorável economicamente que o tubo estampado, conforme apresentado no Quadro 15.

Quadro 15 - Matriz de avaliação das alternativas no critério Custo materiais

Matriz de avaliação das alternativas no critério Custo materiais		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	9,00
Tubo + Estampo	0,11	1,00

Fonte: Autor (2025)

4.3.6. Custo de Processos

No subcritério Custo do Processo, o alumínio injetado exige altos investimentos em moldes e ferramentais, sendo viável apenas em grandes volumes de produção. Já o tubo estampado em aço requer menor custo inicial e maior flexibilidade produtiva, mostrando-se mais favorável economicamente em produções médias ou pequenas, que estão representados no Quadro 16

Quadro 16 -Matriz de avaliação das alternativas no critério Custo processo

Matriz de avaliação das alternativas no critério Custo processo		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	0,14
Tubo + Estampo	7,00	1,00

Fonte: Autor (2025)

4.3.7. Custo do Ciclo de Vida

No subcritério Custo do Ciclo de Vida, o alumínio injetado mostra-se mais vantajoso por gerar peças mais leves, reduzindo o consumo de combustível e os custos operacionais ao longo do tempo. Já o aço, por ser mais pesado, eleva o gasto energético. Assim, o alumínio destaca-se como opção economicamente mais sustentável, conforme Quadro 17.

Quadro 17 - Matriz de avaliação das alternativas no critério Custo ciclo de vida

Matriz de avaliação das alternativas no critério Custo ciclo de vida		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	7,00
Tubo + Estampo	0,14	1,00



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Fonte: Autor (2025)

4.3.8. Potencial de Remanufatura

No subcritério Potencial de Remanufatura, o alumínio injetado apresenta baixa viabilidade devido a trincas e porosidades do processo de fundição, sendo geralmente destinado à reciclagem. Já o aço estampado permite soldagem e retrabalho, favorecendo a reutilização e prolongando a vida útil das peças, mostrando-se mais adequado à remanufatura, conforme Quadro 18.

Quadro 18 - Matriz de avaliação das alternativas no critério Potencial de remanufatura

Matriz de avaliação das alternativas no critério Potencial de remanufatura		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	0,14
Tubo + Estampo	7,00	1,00

Fonte: Autor (2025)

4.3.9. Peso

No subcritério Peso, o alumínio injetado destaca-se por sua baixa densidade ($\approx 2,7 \text{ g/cm}^3$), permitindo componentes muito mais leves e melhorando a eficiência energética e a capacidade de carga dos veículos. Já o aço ($\approx 7,8 \text{ g/cm}^3$) gera peças mais pesadas. Assim alumínio mostra-se amplamente superior nesse critério, conforme representado no Quadro 19.

Quadro 19 - Matriz de avaliação das alternativas no critério Peso

Matriz de avaliação das alternativas no critério Peso		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	9,00
Tubo + Estampo	0,11	1,00

Fonte: Autor, 2025

4.3.10. Desempenho Técnico

No subcritério Desempenho Técnico, o alumínio injetado possui boa rigidez e alta resistência específica, porém menor tenacidade e resistência à fadiga. O aço estampado, mais robusto e resistente a impactos e esforços repetitivos, demonstra desempenho superior, sendo a alternativa mais favorável para aplicações estruturais e de uso severo, esses valores estão representados no Quadro 20.

Quadro 20 - Matriz de avaliação das alternativas no critério Desempenho Técnico

Matriz de avaliação das alternativas no critério Desempenho técnico		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	0,20
Tubo + Estampo	5,00	1,00

Fonte: Autor, 2025

4.3.11. Facilidade de Montagem

No subcritério Facilidade de Montagem, o alumínio injetado destaca-se por permitir a integração de várias funções em uma única peça, reduzindo componentes, soldas e



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

parafusos, e agilizando o processo produtivo. Já o aço estampado exige mais uniões e etapas, tornando a montagem mais complexa e menos eficiente, conforme Quadro 21.

Quadro 21 -Matriz de avaliação das alternativas no critério Facilidade de Montagem

Matriz de avaliação das alternativas no critério Facilidade de Montagem		
	Alumínio Injetado	Tubo + Estampo
Alumínio Injetado	1,00	9,00
Tubo + Estampo	0,11	1,00

Fonte: Autor, 2025

4.4. RESULTADOS POR SUBCRITÉRIO

A análise dos subcritérios possibilitou identificar as vantagens e desvantagens relativas de cada material em diferentes dimensões da sustentabilidade:

4.4.1. Ambiental

O Alumínio Injetado mostrou-se mais favorável em termos de emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida, por contribuir para a redução do consumo energético durante a fase de uso, especialmente quando considerada a reciclagem. Entretanto, apresentou desvantagens no consumo energético primário e no impacto da fabricação, em razão do processo de fundição sob pressão, altamente intensivo em energia e recursos. O Tubo + Estampo (aço), por sua vez, foi mais competitivo em termos de energia incorporada e impacto de manufatura, além de maior potencial de remanufatura. Ambos os materiais apresentaram alta reciclabilidade, com leve vantagem para o alumínio em função do maior valor agregado de sua sucata.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

4.4.2. Econômico

O Alumínio Injetado foi considerado mais competitivo no custo de materiais, pois, embora seu preço por quilograma seja superior, a redução de peso do conjunto resultou em menor custo total para a peça avaliada. No entanto, o Tubo + Estampo demonstrou maior atratividade no custo do processo, já que a fundição do alumínio exige moldes caros e altos investimentos iniciais em ferramentais, compensando-se apenas em volumes elevados. Por fim, no custo de ciclo de vida, o alumínio destacou-se como mais favorável, ao reduzir os custos operacionais em função do menor peso do componente, aspecto especialmente relevante na ótica do Total Cost of Ownership (TCO).

4.4.3. Técnico

No critério peso, o Alumínio Injetado foi amplamente superior devido à sua baixa densidade, contribuindo para a eficiência energética e maior capacidade útil. Contudo, no desempenho técnico, o Tubo + Estampo apresentou maior robustez estrutural, resistência a impactos e melhor comportamento em fadiga. Em contrapartida, o alumínio demonstrou vantagem em facilidade de montagem, por permitir a integração de múltiplas funções em uma única peça, reduzindo o número de componentes e simplificando a produção.

4.5. INTERPRETAÇÃO DAS MATRIZES AGREGADAS

Para a matriz agregada de ordem $n = 3$, obteve-se $\lambda_{max} = 3,08$. O índice de consistência foi calculado como $CI = 0,04$. Considerando o índice aleatório $RI = 0,58$ (Saaty, 1980), a razão de consistência foi $CR = 0,07$. Como $CR < 0,10$, conclui-se que a matriz apresenta consistência aceitável, validando o vetor de prioridades derivado, conforme apresentado nos Quadros 22, 23, 24 e 25.

Quadro 22 - Média Geométrica - Ambiental x Econômico x Técnico

Matriz Agregada (AIJ - média geométrica)				
	Ambiental	Econômico	Técnico	
Ambiental	1,00	0,31	0,15	
Econômico	4,01	1,00	0,63	
Técnico	6,82	1,58	1,00	
Soma das Colunas (AIJ)	11,83	2,89	1,78	
Matriz Normalizada (por coluna)				
	Ambiental	Econômico	Técnico	
Ambiental	0,08	0,11	0,08	
Econômico	0,34	0,35	0,36	
Técnico	0,58	0,55	0,56	
Vetor de Prioridades (pesos dos critérios)				
	Peso	%		
Peso	0,09	9%		
Desempenho técnico	0,35	35%		
Facilidade de montagem	0,56	56%		
	Consistência (λ_{max} , IC, CR)			
	λ_i	0,28		3,08
	λ_i	1,07		3,08
	λ_i	1,73		3,09
	λ_{max}			3,08
	CI		0,04	
	CR (RI=0,58)		0,07	

Fonte: Autor (2025)

Quadro 23 - Média Geométrica - Peso x Desempenho Técnico x Facilidade de Montagem

Matriz Agregada (AIJ - média geométrica)			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	1,00	0,22	1,25
Desempenho técnico	4,62	1,00	5,92
Facilidade de montagem	0,80	0,17	1,00
Soma das Colunas (AIJ)	6,43	1,39	8,16
Matriz Normalizada (por coluna)			
	Peso	Desempenho técnico	Facilidade de montagem
Peso	0,16	0,16	0,15
Desempenho técnico	0,72	0,72	0,72
Facilidade de montagem	0,12	0,12	0,12
Vetor de Prioridades (pesos dos critérios)			
	Peso	%	
Peso	0,15	15%	
Desempenho técnico	0,72	72%	
Facilidade de montagem	0,12	12%	
Consistência (λ_{max} , IC, CR)			
		0,46	3,00
		2,17	3,00
		0,37	3,00
	λ_{max}	3,000079631	
	CI	3,98156E-05	
	CR (RI=0,58)	6,86475E-05	0%

Fonte: Autor (2025)

Após a agregação dos julgamentos individuais pela média geométrica, verificou-se a consistência da matriz resultante ($n = 3$). O maior autovalor encontrado foi $\lambda_{max} = 3,00008$, resultando em um índice de consistência $CI \approx 3,98 \times 10^{-5}$. Com base no

índice aleatório $RI=0,58$ para matrizes de ordem 3 (Saaty, 1980), a razão de consistência foi $CI \approx 6,86 \times 10^{-5}$, equivalente a 0%. Esse resultado indica consistência excelente, estando muito abaixo do limite usualmente aceito de $CR \leq 0,10$.

Quadro 24 - Média Geométrica - Custo de Materiais x Custo de Processo x Custo do ciclo de Vida x Potencial de Remanufatura

Matriz Agregada (AIJ - média geométrica)				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	1,00	0,58	0,77	1,24
Custo do processo	1,72	1,00	0,72	2,14
Custo do ciclo de vida	1,24	1,38	1,00	1,05
Potencial de remanufatura	0,72	0,47	0,95	1,00
Matriz Normalizada (por coluna)				
	Custo de materiais	Custo do processo	Custo do ciclo de vida	Potencial de remanufatura
Custo de materiais	0,85	0,68	0,89	0,91
Custo do processo	1,47	1,17	0,84	1,58
Custo do ciclo de vida	1,06	1,61	1,16	0,78
Potencial de remanufatura	0,62	0,54	1,10	0,74
Vetor de Prioridades (pesos dos critérios)				
Custo de materiais	1,17	0,28	28%	
Custo do processo	0,86	0,20	20%	
Custo do ciclo de vida	0,86	0,20	20%	
Potencial de remanufatura	1,36	0,32	32%	
		Consistência (λ_{max} , IC, CR)		
		λ_i	4,25	
		λ_i	4,25	
		λ_i	4,25	
		λ_{max}	4,25	
		CI	0,082	
		CR (RI=0,90)	0,091	

Fonte: Autor (2025)

Para a matriz agregada de ordem $n=4$, obteve-se $\lambda_{max} = 4,25$. O índice de consistência foi $CI = 0,082$. Considerando o índice aleatório $RI=0,90$, a razão de consistência resultou em $CR = 0,091$. Como $CR \leq 0,10$, a matriz apresenta consistência aceitável, ainda que próxima do limite.

Quadro 25 - Média Geométrica - Emissões x Energia x Reciclabilidade x Impacto da Fabricação

Matriz Agregada (AIJ - média geométrica)																				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação																
Emissões	1,00	0,70	0,94	0,63																
Energia	1,44	1,00	0,66	1,38																
Reciclabilidade	1,12	0,93	1,00	0,74																
Impacto da Fabricação	1,59	0,73	1,36	1,00																
Matriz Normalizada (por coluna)																				
	Emissões	Energia	Reciclabilidade	Impacto da Fabricação																
Emissões	0,78	0,83	0,95	0,67																
Energia	1,12	1,19	0,67	1,47																
Reciclabilidade	0,87	1,11	1,01	0,79																
Impacto da Fabricação	1,24	0,87	1,37	1,07																
Vetor de Prioridades (pesos dos critérios)																				
Emissões	1,29	0,32	32%																	
Energia	0,84	0,21	21%																	
Reciclabilidade	0,99	0,24	24%																	
Impacto da Fabricação	0,94	0,23	23%																	
<table><tr><th colspan="2">Consistência (λ_{max}, IC, CR)</th></tr><tr><td>λ_i</td><td>4,05</td></tr><tr><td>λ_i</td><td>4,05</td></tr><tr><td>λ_i</td><td>4,05</td></tr><tr><td>λ_i</td><td>4,05</td></tr><tr><td>λ_{max}</td><td>4,05</td></tr><tr><td>CI</td><td>0,017</td></tr><tr><td>CR (RI=0.90)</td><td>0.019</td></tr></table>					Consistência (λ_{max} , IC, CR)		λ_i	4,05	λ_i	4,05	λ_i	4,05	λ_i	4,05	λ_{max}	4,05	CI	0,017	CR (RI=0.90)	0.019
Consistência (λ_{max} , IC, CR)																				
λ_i	4,05																			
λ_i	4,05																			
λ_i	4,05																			
λ_i	4,05																			
λ_{max}	4,05																			
CI	0,017																			
CR (RI=0.90)	0.019																			

Fonte: Autor (2025)



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Para a matriz agregada de ordem $n=4$, obteve-se $\lambda_{max} = 4,05$. O índice de consistência calculado foi $CI = 0,017$. Com base no índice aleatório $CI = 0,90$, a razão de consistência foi $CR = 0,019$, ou seja, aproximadamente 2%. Esse resultado demonstra uma consistência excelente, bem abaixo do limite recomendado de 0,10, reforçando a confiabilidade dos julgamentos coletivos.

4.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados evidenciam a importância de considerar múltiplos critérios na avaliação da sustentabilidade de materiais automotivos. A análise puramente ambiental poderia levar à escolha do aço, em razão de seu menor consumo energético inicial e menor impacto de fabricação (Broadbent, 2016; Baumann, 2020; Baum, 2021). No entanto, ao integrar dimensões econômicas e técnicas, o alumínio mostrou-se mais vantajoso, principalmente pela redução de peso, impacto positivo no TCO e facilidade de montagem (Munhoz et al., 2020)

A consistência da matriz consolidada, verificada por meio do cálculo da razão de consistência (CR), reforça a validade dos resultados, que se mantêm dentro do limite aceitável proposto por Saaty (1980).

Além disso, os achados convergem com a literatura que aponta o alumínio como material estratégico para atender metas de eficiência energética e redução de emissões no setor automotivo, ainda que sua produção primária apresente altos impactos ambientais (Munhoz et al., 2020). Por outro lado, o estudo também ressalta que o aço permanece competitivo em contextos de manufatura flexível, volumes menores de produção e estratégias de remanufatura (Baum, 2021).

A aplicação do modelo demonstrou que o Alumínio Injetado foi a alternativa mais sustentável no caso estudado, alcançando escore global de 0,734 contra 0,266 do Tubo + Estampo. A decisão é explicada pela maior contribuição do alumínio em critérios técnicos

e econômicos de longo prazo, ainda que o aço tenha apresentado vantagens em determinados subcritérios ambientais e de processo produtivo..

Figura 2 - Matriz de Decisão

Matriz de Decisão poderada matriz de julgamento					
Alternativas/Critérios	Ambiental	Economico	Tecnico		
Aluminio Injetado	0,042	0,239	0,454	0,734	ESCOLHIDO
Tubo + Estampo	0,055	0,091	0,121	0,266	
	Tubo + Estampo	Aluminio Injetado	Aluminio Injetado	1,000	

Fonte: Autor (2025)

Os resultados obtidos atestam a eficácia da ferramenta desenvolvida e indicam seu potencial de uso como suporte decisório nas diferentes etapas do PDP de VUCs. Concluída a etapa de cálculo, os decisores responsáveis pelas notas foram reunidos para revisão dos outputs (pesos, índice de consistência – RC e ranking), processo que permitiu confirmar a robustez dos julgamentos, sanar inconsistências e validar que os resultados refletem a realidade decisória do PDP de VUCs

5. CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo desenvolver um modelo de apoio à tomada de decisão orientado por critérios de sustentabilidade, aplicado ao Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) de Veículos Urbanos de Carga (VUCs). Para isso, utilizou-se o método Analytic Hierarchy Process (AHP), integrando critérios ambientais, técnicos e econômicos em uma ferramenta prática e aplicável ao contexto industrial automotivo.

O modelo confirma a importância de incorporar aspectos ambientais desde as fases iniciais do PDP, quando até 80% dos impactos ambientais de um produto são determinados. O AHP mostrou-se adequado para o ambiente corporativo, permitindo comparações estruturadas sem exigir julgamentos par a par exaustivos. A simulação da substituição do aço (tubo + estampo) pelo alumínio injetado em um componente de VUC demonstrou que o alumínio, embora apresente maior impacto na produção, obteve melhor desempenho técnico e equilíbrio geral (0,734 contra 0,266), devido à redução de massa e maior eficiência energética.

A ferramenta, desenvolvida em planilha Excel, é acessível, replicável e facilmente adaptável a diferentes contextos decisórios, contribuindo para a competitividade e sustentabilidade das empresas automotivas. As contribuições deste artigo abrangem três dimensões: teórica, ao integrar critérios multidimensionais de sustentabilidade em um método pouco explorado no setor; metodológica, ao comprovar a viabilidade do AHP em análises complexas; e prática, ao oferecer uma ferramenta de aplicação imediata em decisões industriais.

Como perspectivas futuras, recomenda-se comparar o AHP com outros métodos multicritério (PROMETHEE, ELECTRE, MACBETH) e automatizar a ferramenta em uma versão digital, ampliando sua integração ao PDP e possibilitando análises de sensibilidade. O estudo reforça o potencial da abordagem para promover decisões mais sustentáveis e apoiar a transição rumo a uma mobilidade urbana limpa e eficiente.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A.; CASSIANO, D. A. Avaliação dos critérios na seleção de projetos de eficiência energética utilizando Fuzzy AHP. *Gestão e Projetos (GeP)*, v. 15, n. 2, p. 265–291, 2024.

AKPAN, U; MORIMOTO, R. An application of Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) to the prioritization of rural roads to improve rural accessibility in Nigeria. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 82, p. 101256, 2022.

ANFAVEA. *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira – 2023*. 2023. Disponível em: <https://www.anfavea.com.br>. Acesso em: 7 dez. 2023.

AZNAR BELLVER, J.. Valoración de activos por métodos multicriterio AHP, ANP y CRITIC. **Colección Académica**, 2021.

BAUM, V. B. Análise comparativa dos impactos ambientais associados às rotas primária e secundária da produção de aço em uma usina siderúrgica: estudo de caso baseado na avaliação do ciclo de vida da estrutura metálica de um pavilhão industrial executada a partir de sucata ferrosa reciclada. 2021 – Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

BERTAHONE, P. B.; BRANDALISE, N. Uso do método Analytic Hierarchy Process (AHP) para escolha de fornecedor de farinha de trigo: um estudo de caso. In: *SEGET – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*, 4., 2017, Resende. Anais [...]. Resende: [s.n.], 2017.

CAMP, L & HERNANDEZ, C. Ahp E Anp Combinados Com Método De Otimização Restrita Na Tomada De Decisão Multicritério Para Manutenção Preventiva. **Revista De Engenharia E Tecnologia**, v. 13, n. 3, 2021.

CANEPA, V., CERRUTI, S. H., SERVIDIA, P.. Trade-off analysis for attitude control in highly elliptical orbits. In: **2024 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)**. IEEE, 2024. p. 1-8.

DE CAMPOS, Alessandra Freire Magalhães; CAETANO, Luís Miguel Dias; GOMES, Victor Márcio Laus Reis. Revisão sistemática de literatura em educação: Características, estrutura e possibilidades às pesquisas qualitativas. **Linguagens, Educação e Sociedade**, v. 27, n. 54, p. 139-169, 2023.

DEZEM, Vinicius et al. Modelo multicritério e multiobjetivo para estratégias a partir do open banking. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão do Conhecimento, Florianópolis, 2025.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

FIORI, J. L. R. *Aplicação do Método Analytic Hierarchy Process (AHP) para priorização de projetos em uma pequena empresa de consultoria comercial*. 2023. [Trabalho acadêmico] – [Instituição], [Cidade], 2023.

GUASTALI, A. C. A. *Análise de gases poluentes e estratégias sustentáveis em uma empresa do setor de transporte rodoviário agrícola*. 2025. Tese (Doutorado em Agronegócio e Desenvolvimento) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Engenharia, [Cidade], 2025.

GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GOMES, L. F. A. M.; RANGEL, L. A. D. An application of the TODIM method to the multicriteria rental evaluation of residential properties. *European Journal of Operational Research*, v. 193, n. 1, p. 204–211, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.046>

HELMERS, E.; DIETZ, J.; WEISS, M. Sensitivity analysis in the life-cycle assessment of electric vs. combustion engine cars under approximate real-world conditions. *Sustainability*, v. 12, n. 3, p. 1241, 2020.

HOSSEINZADEH LOTFI, F; ALLAHVIRANLOO, T., PEDRYCZ, W., SHAHRIARI, M., SHARAFI, H., & RAZIPOUR GHALEHJOUGH, S. The Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH) in Uncertainty Environment. In: **Fuzzy Decision Analysis: Multi Attribute Decision Making Approach**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 257-273.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. In: *The Europa Directory of International Organizations 2019*. London: Routledge, 2021.

ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Practical Analytic Hierarchy Process (AHP) approach with rating criteria for the prioritization of projects. *Journal of the Operational Research Society*, v. 62, n. 5, p. 784–797, 2011. <https://doi.org/10.1057/jors.2010.20>

MONTEIRO, R. B. Ler e compreender em revista: pesquisa histórica, cópias digitais e documentos da Época Moderna no Brasil atual. *Acervo*, v. 36, n. 3, p. 1–21, 2023.

MUNHOZ JR, D., MELO, M. L., AMSTALDEN, J. F., & VENDRAMIM, J. C. (2020). Os Rumos Do Mercado De Materiais Para Componentes Automobilísticos. I Encontro Nacional de Tecnologia e Inovação em Materiais, 19.

NOVIKOFF, C. Proposições científicas e éticas aplicadas em entrevista e questionário. *Revista Valore*, v. 5, p. 5027, 2020.

PEREIRA, C. C. *Práticas de pesquisa na pós-graduação: um estudo das habilidades para a busca de informação*. 2024. [Trabalho acadêmico] – [Instituição], [Cidade], 2024.

RAMÓN-CANUL, L. G., MARGARITO-CARRIZAL, D. L., LIMÓN-RIVERA, R., MORALES-CARRRERA, U. A., RODRÍGUEZ-BUENFIL, I. M., RAMÍREZ-SUCRE,



M. O., ... & DE JESÚS RAMÍREZ-RIVERA, E. . Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method for the generation of external preference mapping using rapid sensometric techniques. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 8, p. 3298-3307, 2021.

RANGEL, L. A. D.; BRANDALISE, N. Métodos do auxílio multicritério à decisão que empregam a utilidade aditiva. In: *XIII SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção*, 2006, Bauru. Anais [...]. Bauru: [s.n.], 2006.

RIBEIRO, G. F. et al. Elaboração de um questionário de pesquisa: validação com especialistas e estudo com o coeficiente alfa de Cronbach – aplicação no sistema brasileiro de franquias para classificação de métodos de previsão de demanda para novos produtos. *Produto & Produção*, v. 22, n. 3, 2021.

SAATY, T. L. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008.

SALLUM, F. S. V. Uma abordagem MCDA para identificar lacunas e perspectivas sobre o tratamento de asma no Brasil. *Jornal de Assistência Farmacêutica e Farmacoeconomia*, v. 9, n. 2, p. 50–65, 2024.

SAMPAIO, E. Q. D.; DE SOUZA, M. T. S.; GALVÃO, R. A. Práticas sustentáveis em uma cadeia de suprimentos do setor alimentício. 2018. [Trabalho acadêmico] – [Instituição], [Cidade], 2018.

SANTOS, C. F. R. *O estado da arte da avaliação do ciclo de vida no Brasil entre os anos 1990 e 2018*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.

SERRANO, A. F. B. *Comparação entre carro elétrico e carro convencional em ciclo de vida*. 2024. Tese (Doutorado) – [Instituição], [Cidade], 2024.

SILVA, C. A. B. *Avaliação da sustentabilidade com a adoção de desenvolvimento de produto sustentável circular em empresas do setor de autopeças*. 2024. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2024.

SILVA, E.; LAKTIM, M. C.; ENGLER, R. C. As ferramentas do ecodesign como suporte à engenharia da qualidade de fornecedores automotivos: um estudo bibliográfico. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 7, n. 2, p. 11933–01, 2021.

SILVA, S. *A integração de práticas do ecodesign nas atividades da engenharia da qualidade de fornecedores durante o desenvolvimento do produto e do processo: uma proposta de gestão para as empresas compradoras do segmento automotivo*. 2020. Tese (Doutorado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

SOUSA, B. C. da S., RANGEL, L. A. D., & HERNANDEZ, C. T. (2018). Priorização de projetos de melhoria de produtividade através do método multicritério PROMÉTHÉE II. *Pesquisa Operacional Para O Desenvolvimento*, 10(1), 27–40. <https://doi.org/10.4322/PODes.2018.003>.

TAREI, P.; THAKKAR, J.; NAG, B. A hybrid approach for quantifying supply chain risk and prioritizing the risk drivers: a case of Indian petroleum supply chain. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2018. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2017-0218>

TEIXEIRA, M. A. C. et al. Barreiras e facilitadores para a adoção das práticas de economia circular em negócios empreendedores sustentáveis no setor de energia solar fotovoltaica do Brasil. 2024. [Trabalho acadêmico] – [Instituição], [Cidade], 2024.

TORIHARA, H. H. M. Em que medida a energia eólica é uma fonte “limpa” e promotora de um “desenvolvimento sustentável” ante as mudanças climáticas diagnosticadas? 2022. Dissertação (Mestrado em Governança Global e Formulação de Políticas Internacionais) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2022.

VARGAS, J. E. V. *Análise da competitividade ambiental de veículos elétricos no Brasil no cenário atual e futuro*. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

VERGARA, S. C. *Projetos e relatórios de pesquisa em administração*. 13. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

VEZZOLI, C. *Design para a sustentabilidade ambiental: o design do ciclo de vida dos produtos*. São Paulo: Blucher, 2023.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.