UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

PEDRO LUIS TOZONI PALMA

ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE INVESTIMENTOS NA INDÚSTRIA 4.0 EM UMA MONTADORA DE AUTOMÓVEIS

Guaratinguetá
2026

PEDRO LUIS TOZONI PALMA

ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE INVESTIMENTOS NA INDÚSTRIA 4.0 EM UMA MONTADORA DE AUTOMÓVEIS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção no Programa de Mestrado Profissional.

Orientador: Prof. Dr. Valério Antônio Pamplona Salomon

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Muniz Junior

Guaratinguetá
2026

Palma, Pedro Luis Tozoni
P171a Análise multicritério de investimentos na indústria 4.0 em uma montadora de automóveis / Pedro Luis Tozoni Palma. - Guaratinguetá, 2026.
189 f : il.
Bibliografia: f. 141-168

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026.

Orientador(a): Prof. Dr. Valério Antônio Pamplona Salomon
Coorientador: Prof. Dr. Jorge Muniz Junior

1. Indústria 4.0. 2. Processo decisório por critério múltiplo 3. Indústria automobilística 4. Inteligencia artificial. Título.

CDU 681.3:621.5(043)

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8 9203

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Do ponto de vista organizacional, a pesquisa disponibiliza um protocolo replicável e uma ferramenta computacional de apoio à decisão, com interpretação rastreável dos resultados assistida por inteligência artificial, que formalizam a priorização de investimentos em Indústria 4.0 e favorecem a transparência na alocação de capital. Do ponto de vista social, a priorização de tecnologias voltadas à redução do consumo de gás natural contribui para a diminuição das emissões do processo produtivo, e a incorporação de critérios sociotécnicos insere a dimensão humana na avaliação de investimentos tecnológicos. Sob a perspectiva acadêmica, o trabalho documenta a aplicação estruturada do AHP e do modelo BOCR à priorização de investimentos em um ativo produtivo, com procedimentos de construção da hierarquia, coleta de julgamentos, verificação de consistência e síntese das prioridades passíveis de reprodução em futuras investigações.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

From an organizational standpoint, the research provides a replicable protocol and a decision-support software tool, with traceable interpretation of results assisted by artificial intelligence, which formalize the prioritization of Industry 4.0 investments and foster transparency in capital allocation. From a social standpoint, prioritizing technologies aimed at reducing natural gas consumption contributes to lowering emissions from the production process, and the incorporation of sociotechnical criteria brings the human dimension into the evaluation of technology investments. From an academic perspective, the study documents the structured application of AHP and the BOCR model to the prioritization of investments in a production asset, with procedures for hierarchy construction, judgment collection, consistency verification, and priority synthesis that can be reproduced in future research.

PEDRO LUIS TOZONI PALMA

Análise multicritério de investimentos na Indústria 4.0 em uma montadora de automóveis.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção – Mestrado Profissional

Data da defesa: 26/08/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. VALÉRIO ANTONIO PAMPLONA SALOMON

Orientador - UNESP

Prof. Dr. VAGNER BATISTA RIBEIRO

FATEC

Prof. Dr. ROSLEY ANHOLON

UNICAMP

Aos meus pais, que sempre se empenharam para que eu tivesse a melhor educação possível. E à Jaína, minha companheira de vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do Departamento de Produção e do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FEG) pelo apoio acadêmico, pelo conhecimento compartilhado e pelas contribuições ao longo de minha formação.

Expresso minha especial gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Valério Antônio Pamplona Salomon, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Jorge Muniz Junior, pelo acompanhamento constante, pelas orientações técnicas, pelo rigor acadêmico e pela dedicação demonstrada durante o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço, ainda, aos membros das bancas de qualificação e defesa: ao Prof. Dr. Cleginaldo Pereira de Carvalho, pelas importantes contribuições apresentadas no exame de qualificação; ao Prof. Dr. Vagner Batista Ribeiro, pelas valiosas observações formuladas tanto na qualificação quanto na defesa; e ao Prof. Dr. Rosley Anholon, da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pelas relevantes sugestões oferecidas durante a defesa. Seus apontamentos contribuíram significativamente para o aprimoramento da versão final deste trabalho.

À organização em que atuo profissionalmente, especialmente ao vice-presidente de Operações e ao Departamento de Recursos Humanos, agradeço pelo incentivo e pelo apoio institucional que viabilizaram esta jornada acadêmica.

Aos meus pais, agradeço pelos valores transmitidos, pelo exemplo e pelo incentivo que sempre me ofereceram. Aos meus irmãos, agradeço pela presença, pelo apoio e pela torcida ao longo desta caminhada.

À minha esposa, expresso um agradecimento especial pelo amor, pelo companheirismo, pela compreensão e por compartilhar comigo os desafios e as conquistas desta jornada. Seu apoio foi essencial para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos colegas da Turma VIII do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção, agradeço pelas trocas de conhecimento, pela convivência e pelo apoio mútuo durante o percurso acadêmico.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, registro meu sincero agradecimento.

“O verdadeiro lugar de nascimento é aquele onde lançamos pela primeira vez um olhar inteligente sobre nós mesmos.”

Marguerite Yourcenar

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo nº 2023/14761-5.

RESUMO

As decisões de investimento em tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) exigem avaliação multidimensional, e não apenas financeira, condição que limita o uso isolado de indicadores de retorno. A aplicação conjunta do Analytic Hierarchy Process (AHP) e da estrutura Benefícios, Oportunidades, Custos e Riscos (BOCR) à avaliação de investimentos em I4.0 permanece pouco documentada na manufatura. Esta pesquisa desenvolveu e aplicou um modelo de apoio à decisão que integra o AHP e o BOCR para essa avaliação. O estudo foi conduzido por pesquisa-ação, combinada com modelagem matemática e abordagem quali-quantitativa, em uma montadora de veículos, com hierarquia de quatro méritos estratégicos e vinte subcritérios nas perspectivas de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade. Um painel de 12 especialistas seniores forneceu 864 julgamentos pareados, agregados pela média geométrica e submetidos à verificação de consistência, em ferramenta computacional desenvolvida na pesquisa, com módulo de cálculo verificado por comparação com implementação independente e camada de interpretabilidade com inteligência artificial explicável (XAI) baseada em Geração Aumentada por Recuperação (RAG). Os resultados foram avaliados por análise de sensibilidade, por cinco métodos de síntese e por devolutiva à alta direção. Na priorização entre duas alternativas para reduzir o consumo de gás natural nas estufas de cura, os pesos estratégicos foram de 0,3723 para Benefícios, 0,2786 para Riscos, 0,1974 para Custos e 0,1517 para Oportunidades, e o controle em tempo real dos queimadores por inteligência artificial foi priorizado frente ao gêmeo digital com simulação termodinâmica na formulação subtrativa com *rescaling weights*, com manutenção do ranking nos cinco métodos e na análise de sensibilidade. O estudo restringe-se a um caso e a um painel, e as inconsistências individuais e as estimativas financeiras de escopo não equivalente exigem a revisão dos julgamentos e dos fluxos de caixa antes da decisão de investimento. Como implicação prática, a pesquisa disponibiliza protocolo replicável e ferramenta computacional para priorizar investimentos em I4.0, com transparência e rastreabilidade na alocação de capital. A originalidade reside na configuração do AHP-BOCR para a priorização de projetos tecnológicos em um ativo produtivo automotivo, com elicitação separada dos pesos estratégicos e de magnitude, três perspectivas decisórias e camada de interpretação ancorada na literatura, que preserva o cálculo determinístico do modelo.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria 4.0; Decisão de investimento; Tomada de decisão multicritério; Analytic Hierarchy Process; BOCR; Indústria automotiva; Inteligência artificial explicável.

ABSTRACT

Investment decisions on Industry 4.0 (I4.0) technologies require a multidimensional assessment rather than a purely financial one, a condition that limits the isolated use of return indicators. The joint application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Benefits, Opportunities, Costs, and Risks (BOCR) framework to I4.0 investment assessment remains sparsely documented in manufacturing. This research aimed to develop and apply a decision-support model integrating AHP and BOCR to assess I4.0 investments in manufacturing. The study was conducted through action research, combined with mathematical modeling and a qualitative-quantitative approach, at an automotive assembly plant, with a hierarchy of four strategic merits and twenty subcriteria across the perspectives of competitiveness, sociotechnical aspects, and sustainability. A panel of 12 senior specialists provided 864 pairwise judgments, aggregated by the geometric mean and submitted to consistency verification, using a computational tool developed for this research, with an AHP-BOCR computation module verified by comparison with an independent implementation and an explainable artificial intelligence (XAI) interpretation layer based on Retrieval-Augmented Generation (RAG). The results were assessed through sensitivity analysis, five synthesis methods, and a feedback session with top management. In prioritizing between two alternatives for reducing natural gas consumption in the curing ovens, the strategic weights were 0.3723 for Benefits, 0.2786 for Risks, 0.1974 for Costs, and 0.1517 for Opportunities, and real-time burner control using artificial intelligence was prioritized over the digital twin with thermodynamic simulation under the subtractive formulation with rescaling weights, with the ranking preserved across the five synthesis methods and in the sensitivity analysis. The study is limited to a single case and a single panel, and the individual inconsistencies and the financial estimates of non-equivalent scope require the revision of judgments and cash flows before the investment decision. As a practical implication, the research provides industrial managers with a replicable protocol and a computational tool to prioritize I4.0 investments with transparency and traceability in capital allocation. The originality lies in the configuration of AHP-BOCR for prioritizing technology projects in an automotive production asset, with separate elicitation of strategic and magnitude weights, three decision perspectives and an interpretation layer grounded in the literature, which preserves the deterministic computation of the model.

KEYWORDS: Industry 4.0; Investment decision; Multicriteria decision-making; Analytic Hierarchy Process; BOCR; Automotive industry; Explainable artificial intelligence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção anual de veículos automotores no Brasil....23
Figura 2 – Revoluções industriais e suas características....26
Figura 3 – Estágios do caminho de desenvolvimento da Indústria 4.0....30
Figura 4 – Publicações anuais sobre MCDM e investimentos em I4.0....41
Figura 5 – Rede de coocorrência de palavras-chave entre 2021 e 2025....43
Figura 6 – Modelo de estrutura hierárquica....44
Figura 7 – Fluxo de aplicação do AHP....48
Figura 8 – Estrutura hierárquica de modelo BOCR....50
Figura 9 – Etapas operacionais do modelo AHP-BOCR....51
Figura 10 – Estruturação para condução da pesquisa-ação....59
Figura 11 – Fases, etapas e atividades para condução da pesquisa-ação....60
Figura 12 – Passos da revisão teórica de literatura....62
Figura 13 – Fluxo das fases da revisão da literatura....64
Figura 14 – Processo de análise de conteúdo dedutiva com matriz não restrita....66
Figura 15 – Etapas do procedimento metodológico adotado....72
Figura 16 – Modelo AHP-BOCR para decisão de investimentos em I4.0....75
Figura 17 – Interface principal do módulo do decisor....76
Figura 18 – Processo convencional de pintura automotiva....79
Figura 19 – Matriz AHP-BOCR completa para decisão entre as alternativas 1 e 2....86
Figura 20 – Exemplo de questão estruturada no questionário AHP-BOCR aplicado....88
Figura 21 – Análise de sensibilidade dos quatro méritos BOCR....123
Figura 22 – Saída completa da função Parecer IA aplicada ao estudo de caso....169

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Contribuições organizacionais e acadêmicas 21
Quadro 2 – Princípios de design e tendências tecnológicas da I4.0 28
Quadro 3 – Escala Fundamental de Saaty 45
Quadro 4 – Benefícios, oportunidades, custos e riscos 50
Quadro 5 – Benefícios da I4.0 53
Quadro 6 – Oportunidades da I4.0 54
Quadro 7 – Custos da I4.0 55
Quadro 8 – Riscos da I4.0 56
Quadro 9 – Classificação da pesquisa 57
Quadro 10 – Grupos de palavras-chave utilizados na revisão teórica 63
Quadro 11 – Grupos de palavras-chave da busca complementar 65
Quadro 12 – Resumo da arquitetura do sistema de apoio à decisão em I4.0 76
Quadro 13 – Métodos de síntese BOCR implementados no sistema 77
Quadro 14 – Funcionamento da camada de interpretabilidade assistida por IA (XAI) 78
Quadro 15 – Síntese interpretativa dos perfis BOCR das alternativas 109
Quadro 16 – Caracterização dos cinco estudos comparados 127
Quadro 17 – Decomposição de CAPEX e OPEX das alternativas 173
Quadro 18 – Comparação das alternativas sob os vinte subcritérios BOCR 174
Quadro 19 – *Corpus* bibliográfico da camada de interpretabilidade assistida por IA 187

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Documentos mais citados sobre MCDM, I4.0 e decisões de investimento 42
Tabela 2 – Estimativas econômicas das alternativas apresentadas ao painel 85
Tabela 3 – Caracterização do painel de especialistas (n = 12) 87
Tabela 4 – Razões de consistência individuais dos 12 respondentes 94
Tabela 5 – Dispersão geométrica das comparações da matriz estratégica BOCR 96
Tabela 6 – Índices de consistência das matrizes agregadas 98
Tabela 7 – Validação computacional do software desenvolvido contra AhpAnpLib 100
Tabela 8 – Pesos estratégicos dos méritos BOCR 104
Tabela 9 – Pesos locais e globais dos subcritérios 106
Tabela 10 – Pesos globais agregados por perspectiva decisória 110
Tabela 11 – Prioridades das alternativas nos méritos BOCR 116
Tabela 12 – Scores e ranking das alternativas pelos cinco métodos de síntese BOCR 119
Tabela 13 – Pesos estratégicos BOCR em estudos selecionados 125
Tabela 14 – Dispersão geométrica das 72 comparações pareadas 181
Tabela 15 – Matriz agregada – Matriz BOCR (pesos pessoais *v*) 183
Tabela 16 – Matriz agregada – Matriz de Magnitude (*rescaling weights s*) 183
Tabela 17 – Matriz agregada – Benefícios 183
Tabela 18 – Matriz agregada – Oportunidades 183
Tabela 19 – Matriz agregada – Custos 184
Tabela 20 – Matriz agregada – Riscos 184
Tabela 21 – Prioridades locais das alternativas nos vinte subcritérios 185
Tabela 22 – Razões de consistência individuais (%) nas seis matrizes 186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Analytic Hierarchy Process
AIJ	*aggregation of individual judgments*
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Analytic Network Process
BOCR	Benefícios, Oportunidades, Custos e Riscos
CAPEX	*Capital Expenditure*
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
CI	Índice de Consistência
CR	Razão de Consistência
E-coat	Eletrodeposição Catódica
I4.0	Indústria 4.0
IA	Inteligência Artificial
IIoT	*Industrial Internet of Things*
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MES	*Manufacturing Execution System*
OPEX	*Operating Expenditure*
PLM	*Product Lifecycle Management*
PRISMA	*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*
RAG	*Retrieval-Augmented Generation*
RI	Índice de Consistência Aleatória
TRL	*Technology Readiness Level*
VAE	autoencoders variacionais
XAI	*Explainable Artificial Intelligence*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Matriz de comparação pareada recíproca
a_{ij}	Elemento da matriz de comparação pareada na posição (*i, j*)
w	Autovetor principal de A / vetor de prioridades
w	Prioridade do elemento *i* no vetor *w*
λ_{max}	Autovalor máximo da matriz A
n	Ordem da matriz de comparação pareada / número de elementos comparados
i, j, k	Índices dos elementos da matriz
CI	Indice de consistência (*Consistency index*)
CR	Razão de consistência (*Consistency ratio*)
RI	Indice de consistência aleatória (*Random index*)
B, O, C, R	Méritos do modelo BOCR: Benefícios, Oportunidades, Custos e Riscos, respectivamente
B_i, O_i, C_i, R_i	Prioridade composta da alternativa i em cada mérito BOCR
v	Vetor de pesos pessoais dos méritos BOCR derivados da hierarquia de controle (v_b, v_o, v_c, v_r)
s	Vetor de *rescaling weights* dos méritos BOCR (s_b, s_o, s_c, s_r)
b, o, c, r	Pesos pessoais normalizados dos méritos nas formulações tradicionais de síntese
x	Score global das alternativas nas formulações tradicionais de síntese BOCR
$Score_i$	Score global da alternativa *i* na síntese subtrativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E QUESTÃO DE PESQUISA ... 17
1.2 OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E OBJETO DE ESTUDO 19
1.2.1 Objetivos e delimitação da pesquisa 19
1.2.2 Justificativas 20
1.2.3 Objeto de estudo 22
1.2.4 Contexto da empresa estudada 23
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 24
2 REVISÃO DA LITERATURA 26
2.1 INDÚSTRIA 4.0 26
2.1.1 Competitividade 33
2.1.2 Aspectos sociotécnicos 34
2.1.3 Sustentabilidade 37
2.2 APLICAÇÕES DE MCDM EM DECISÃO DE INVESTIMENTOS EM I4.0 39
2.3 FUNDAMENTOS DO AHP E DO MODELO BOCR 43
2.3.1 O método AHP 43
2.3.2 Modelo BOCR e métodos de síntese 49
2.4 CRITÉRIOS DE DECISÃO DE INVESTIMENTOS EM I4.0 52
2.4.1 Benefícios associados à I4.0 52
2.4.2 Oportunidades associadas à I4.0 53
2.4.3 Custos associados à I4.0 54
2.4.4 Riscos associados à I4.0 55
3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO 57
3.1 MÉTODO DE PESQUISA 57
3.2 MÉTODO DE REVISÃO DA LITERATURA 61
3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA AHP-BOCR 67
3.4 FLUXO E PROTOCOLO DE PESQUISA 71
3.4.1 Etapa 1 – Diagnóstico e análise teórica 72
3.4.2 Etapa 2 – Delineamento do trabalho de campo 74
3.4.2.1 Sistema de apoio à decisão 75
3.4.2.2 Processo de pintura e consumo de gás natural 79
3.4.2.3 Alternativa 1 – Controle em tempo real dos queimadores utilizando IA 82

3.4.2.4 Alternativa 2 – Gêmeos digitais para simulação termodinâmica das estufas . 83
3.4.2.5 Investimentos e despesas operacionais 84
3.4.3 Etapa 3 – Trabalho de campo 86
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 92
4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS 92
4.2 ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA DOS JULGAMENTOS 93
4.3 VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL DA FERRAMENTA DESENVOLVIDA 100
4.4 AVALIAÇÃO DA CAMADA DE ANÁLISE DE INTERPRETABILIDADE ASSISTIDA POR IA (XAI) 101
4.5 PESOS ESTRATÉGICOS BOCR E PESOS DOS SUBCRITÉRIOS 103
4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS AVALIADAS 108
4.7 ANÁLISE PELAS PERSPECTIVAS DE COMPETITIVIDADE, ASPECTOS SOCIOTÉCNICOS E SUSTENTABILIDADE 109
4.8 DESEMPENHO DAS ALTERNATIVAS NOS MÉRITOS BOCR 115
4.9 SÍNTESE GLOBAL E RANKING DAS ALTERNATIVAS 118
4.10 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 123
4.11 COMPARAÇÃO COM BENCHMARKS DA LITERATURA 125
5 CONCLUSÃO 130
5.1 CONTRIBUIÇÕES ORGANIZACIONAIS 131
5.2 CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS 132
5.3 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS 134
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 140
REFERÊNCIAS 141
APÊNDICE A 169
APÊNDICE B 173
APÊNDICE C 174
APÊNDICE D 181
APÊNDICE E 183
APÊNDICE F 185
APÊNDICE G 186
APÊNDICE H 187
DADOS CURRICULARES 188

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E QUESTÃO DE PESQUISA

A transformação digital da manufatura reorganiza processos produtivos, cadeias de suprimentos e o trabalho, com efeitos simultâneos sobre a competitividade, as condições de trabalho e o desempenho ambiental das operações industriais (Khan *et al.*, 2025; Muniz Jr. *et al.*, 2025a, 2025b). Esse movimento ocorre em um contexto de crescente instabilidade macroeconômica global, marcado pelo aumento dos custos energéticos e produtivos e pela intensificação das tensões geopolíticas (Harding; Lindé; Trabandt, 2023; Maneejuk; Kaewtathip; Yamaka, 2024). A capacidade de avaliar e priorizar investimentos tecnológicos torna-se, nesse cenário, uma competência estratégica para a indústria manufatureira (Ribeiro, A. *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2023).

A Indústria 4.0, ou I4.0, reconhecida como a quarta revolução industrial, constitui um modelo de modernização da manufatura por integração de tecnologias, com foco em eficiência, flexibilidade e competitividade na produção, baseado em interconexão, troca de dados em tempo real e descentralização das decisões, com efeitos sobre a economia e a sociedade (Bucur, 2025; Zhang *et al.*, 2024). Desde sua proposição, a I4.0 tornou-se tema central nos meios industriais e acadêmicos, e seu modelo conecta máquinas, fornecedores, clientes e dados e promove maior produtividade e flexibilidade (Bal; Erkan, 2019; Bucur, 2025; Contador *et al.*, 2020; Ghobakhloo *et al.*, 2021).

A adoção da I4.0 pode gerar benefícios para a manufatura, inclusive mudanças nos modelos de negócio (Horváth; Szabó, 2019; Jugend *et al.*, 2024). Em economias emergentes, a digitalização tem impactos positivos, ao promover a inovação e as patentes e ao impulsionar novos setores (Sousa *et al.*, 2025; Yadav; Yadav; Desai, 2024). As tecnologias da I4.0 devem ser utilizadas para promover interoperabilidade, resiliência e sustentabilidade, diretrizes voltadas à criação de ecossistemas digitais adaptáveis a contextos instáveis (Kagermann; Wahlster, 2022). A materialização dessas diretrizes depende da capacidade das empresas de selecionar e priorizar as tecnologias adequadas ao seu contexto produtivo.

Muitas empresas, no entanto, apresentam pouco progresso em suas jornadas de transformação digital. No Brasil, o atraso compromete a competitividade (Cordeiro; Reis; Fernandes, 2024; Dalenogare *et al.*, 2018; Muniz Jr. *et al.*, 2025a; Satyro *et al.*, 2022). O *World Competitiveness Yearbook*, divulgado em 2025, posiciona o Brasil na 58ª posição entre 69 economias avaliadas. Entre os principais desafios apontados para o país figuram o avanço da

capacidade de inovação por meio de investimento e colaboração e a modernização da infraestrutura nacional para sustentar ganhos de produtividade, prioridades relacionadas ao contexto deste estudo (IMD, 2025). Contador *et al.* (2020) aprofundaram o diagnóstico em pesquisa conduzida com executivos da indústria brasileira e identificaram as dificuldades no planejamento de investimentos e na estimativa de seus retornos como barreiras à adoção tecnológica. A dificuldade de visualizar os benefícios além dos retornos financeiros imediatos, somada à complexidade tecnológica, gera insegurança quanto aos impactos da I4.0 nos modelos de produção (Ghobakhloo *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2021; Sony *et al.*, 2021).

A predominância de análises financeiras ou da experiência do gestor nas decisões de investimento industrial limita a adoção de tecnologias complexas (Abdullah; Almaqtari, 2024; Almeida *et al.*, 2023; Hussinki *et al.*, 2025; Verma *et al.*, 2026). A essa limitação soma-se a carência de estudos específicos sobre a avaliação de investimentos nesse contexto (Almeida *et al.*, 2023; Bean *et al.*, 2026; Maretto *et al.*, 2023; Maretto; Faccio; Battini, 2023; Pakdel; Erol; Oztel, 2025; Reyes Domínguez; Infante Abreu; Parv, 2024). O Multi-Criteria Decision Making (MCDM) apresenta-se como alternativa para suprir essas lacunas, ao reunir métodos da pesquisa operacional que apoiam escolhas entre alternativas com critérios conflitantes e integram dados quantitativos e qualitativos (Pakdel; Erol; Oztel, 2025). Na I4.0, o MCDM orienta a escolha de tecnologias, fornecedores e estratégias de automação por meio da ponderação conjunta de critérios técnicos, econômicos e ambientais (Almeida *et al.*, 2023). Em análises de investimento, a mesma abordagem tem viabilizado a integração tecnológica, a gestão dos riscos e a alocação otimizada de recursos (Almeida *et al.*, 2023; Pakdel; Erol; Oztel, 2025).

O Analytic Hierarchy Process (AHP) é um dos métodos MCDM mais aplicados e tem sido utilizado para apoiar decisões de investimento em tecnologias da I4.0, com a integração de critérios financeiros e não financeiros (Palma; Bianco; Salomon, 2024; Salomon; Gomes, 2024). O modelo Benefícios, Oportunidades, Custos e Riscos (BOCR) complementa o AHP ao separar os efeitos correntes, tratados como benefícios e custos, das expectativas sobre desenvolvimentos futuros, tratadas como oportunidades e riscos, o que torna a análise mais apropriada a contextos de incerteza (Wijnmalen, 2007). A combinação AHP-BOCR capta efeitos de curto e longo prazo, equilibra vantagens e riscos e amplia a rastreabilidade e a abrangência da priorização (Demirtas; Üstün, 2008; Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023). O setor automotivo, escolhido como contexto empírico desta pesquisa, reúne condições favoráveis à aplicação dessa combinação, por seu peso econômico e pela relevância estratégica da I4.0 em sua cadeia de valor.

Desse cenário decorrem as lacunas que este trabalho aborda. As aplicações do AHP-BOCR concentram-se em áreas distintas da engenharia industrial e da manufatura (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023), e permanecem escassos os modelos de decisão voltados às particularidades do setor automotivo na transformação digital (Almeida *et al.*, 2023; Muniz Jr. *et al.*, 2025a; Pakdel; Erol; Oztel, 2025). Tais lacunas orientam a questão de pesquisa desta dissertação. Como avaliar e priorizar investimentos em tecnologias da I4.0 no setor automotivo quando os efeitos relevantes não se reduzem a indicadores financeiros?

1.2 OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E OBJETO DE ESTUDO

1.2.1 Objetivos e delimitação da pesquisa

O objetivo geral deste estudo é desenvolver e aplicar um modelo de apoio à decisão baseado em AHP-BOCR para avaliação de investimentos em tecnologias da I4.0, como solução para um problema real de análise de investimentos na indústria automotiva. Os objetivos específicos são:

a) identificar na literatura os critérios de decisão aplicáveis a investimentos em tecnologias da I4.0 no setor automotivo;
b) desenvolver a estrutura hierárquica de decisão baseada no modelo AHP-BOCR;
c) avaliar a aplicabilidade e os resultados do modelo proposto em um caso real de aplicação.

A pesquisa trata da avaliação e da priorização de investimentos em tecnologias da I4.0, atividade anterior à decisão de investir, e não abrange a implantação das tecnologias avaliadas nem a mensuração de seus resultados operacionais. O contexto empírico restringe-se a uma montadora de veículos do setor automotivo brasileiro, e os julgamentos provêm de um painel de gestores seniores diretamente envolvidos em processos de decisão de investimentos na unidade estudada. O problema decisório consiste na priorização entre duas alternativas tecnológicas mutuamente exclusivas destinadas ao mesmo ativo produtivo, e não na ordenação de uma carteira de projetos concorrentes por um orçamento comum.

Duas exclusões decorrem dessa delimitação. A validação longitudinal dos resultados não integra o escopo, porque a pesquisa se encerra na recomendação decisória, sem acompanhamento da implementação e sem confronto posterior entre os benefícios esperados e

os efetivamente obtidos. A generalização estatística para o setor automotivo brasileiro também não integra o escopo, porque o estudo se apoia em um caso único e em um painel restrito de uma única unidade fabril, desenho voltado à produção de conhecimento aplicado ao problema investigado, não à inferência sobre uma população.

1.2.2 Justificativas

Abordagens recentes apontam que os aspectos sociotécnicos são centrais para que a I4.0 não se restrinja à evolução tecnológica, mas também promova o desenvolvimento humano nas organizações (Hansen; Christiansen; Lassen, 2025; Muniz Jr. *et al.*, 2025b). Empresas com maior desenvolvimento de fatores sociotécnicos alcançam níveis mais maduros de I4.0, enquanto abordagens puramente tecnocêntricas geram resistência organizacional e falhas de implementação (Marcon *et al.*, 2025; Muniz Jr; Ribeiro; Kakavelakis, 2026; Ribeiro; Nakano; Muniz Jr., 2024). A sustentabilidade é uma dimensão adicional reconhecida na I4.0. Sua adoção influencia a competitividade empresarial e sua integração promove a economia circular, a produção limpa e a otimização do uso de recursos. A dimensão abrange aspectos ambientais, como redução de emissões e eficiência energética, e sociais, como desenvolvimento de recursos humanos e melhoria da segurança, com resultados de diferenciação competitiva e de acesso a novos mercados (Ching *et al.*, 2022; Khan *et al.*, 2025; Rame; Purwanto; Sudarno, 2024).

A literatura sobre o AHP aplicado à decisão em I4.0 apresenta limitações quanto à integração completa do modelo BOCR. Apenas um dos dez documentos mais citados sobre BOCR trata do desenvolvimento do método, o que indica presença limitada de trabalhos teóricos entre os mais citados, sem medir toda a produção teórica. A engenharia industrial e a manufatura figuram entre as áreas em que aplicações adicionais do AHP-BOCR seriam bem-vindas, em contraste com a concentração observada na gestão de energia e na cadeia de suprimentos (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023). Não foram identificados, na literatura consultada, estudos que integrem os métodos AHP e BOCR na análise de investimentos para a I4.0 no setor automotivo, em particular, pesquisas que considerem simultaneamente competitividade, fatores sociotécnicos e sustentabilidade. Essa lacuna de aplicação reforça a necessidade de novos estudos, com contribuições para a adaptação e a aplicação de métodos em contextos distintos dos tradicionais.

Esta pesquisa propõe um protocolo replicável para avaliação de investimentos em I4.0, fundamentado no modelo AHP-BOCR e aplicado a um caso real no setor automotivo

brasileiro. Além dessa lacuna de aplicação, os modelos multicritério entregam resultados em forma de vetores de prioridade e rankings numéricos, cuja leitura exige análise técnica extensa, o que limita a auditabilidade e a apropriação gerencial das recomendações. A literatura sobre inteligência artificial explicável identifica a interpretabilidade como condição para a confiança e a adoção responsável de sistemas de apoio à decisão na manufatura (Agostinho *et al.*, 2023; Rosário; Dias, 2025). Abordagens de interpretabilidade aplicadas à decisão preservam a autoridade do especialista, com a inteligência artificial (IA) apoiando a interpretação sem substituir o julgamento humano (Ferreira *et al.*, 2026), e ganham credibilidade quando ancoram as explicações em conhecimento estabelecido da área (Shi; Yao, 2025). Alinhado a esses princípios, o estudo desenvolve uma camada de interpretabilidade assistida por IA que traduz as prioridades numéricas em pareceres qualitativos ancorados na literatura, com revisão humana das conclusões.

Persiste, ainda, uma lacuna de natureza teórica. O modelo de sistemas sociais para a manufatura futura organiza os aspectos sociotécnicos em níveis micro, meso e macro e recomenda a validação empírica da relevância e da prioridade relativa dessas dimensões, de modo a indicar uma ordem de foco para a manufatura (Muniz Jr. *et al.*, 2025b). A aplicação do AHP-BOCR proposta nesta pesquisa permite priorizar empiricamente esses aspectos em um contexto decisório real.

O Quadro 1 sintetiza as contribuições organizacionais e acadêmicas decorrentes dessa proposta.

Quadro 1 – Contribuições organizacionais e acadêmicas

Organizacionais	Acadêmicas
• Desenvolver protocolo estruturado para avaliação de investimentos em I4.0, auxiliando gestores na tomada de decisão sobre implementação de tecnologias da I4.0; • Disponibilizar uma ferramenta computacional de apoio à decisão, com interpretação rastreável dos resultados assistida por IA.	• Incluir riscos, sustentabilidade, contexto organizacional e humano como critérios (Almeida *et al.*, 2023); • Propor contribuições metodológicas para a aplicação do AHP-BOCR e de suas aplicações em contextos de engenharia industrial e de manufatura (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023); • Oferecer evidência empírica sobre a prioridade relativa das dimensões sociotécnicas na decisão de investimentos em I4.0, em atendimento à demanda por validação e ordenamento dessas dimensões (Muniz Jr. *et al.*, 2025b).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

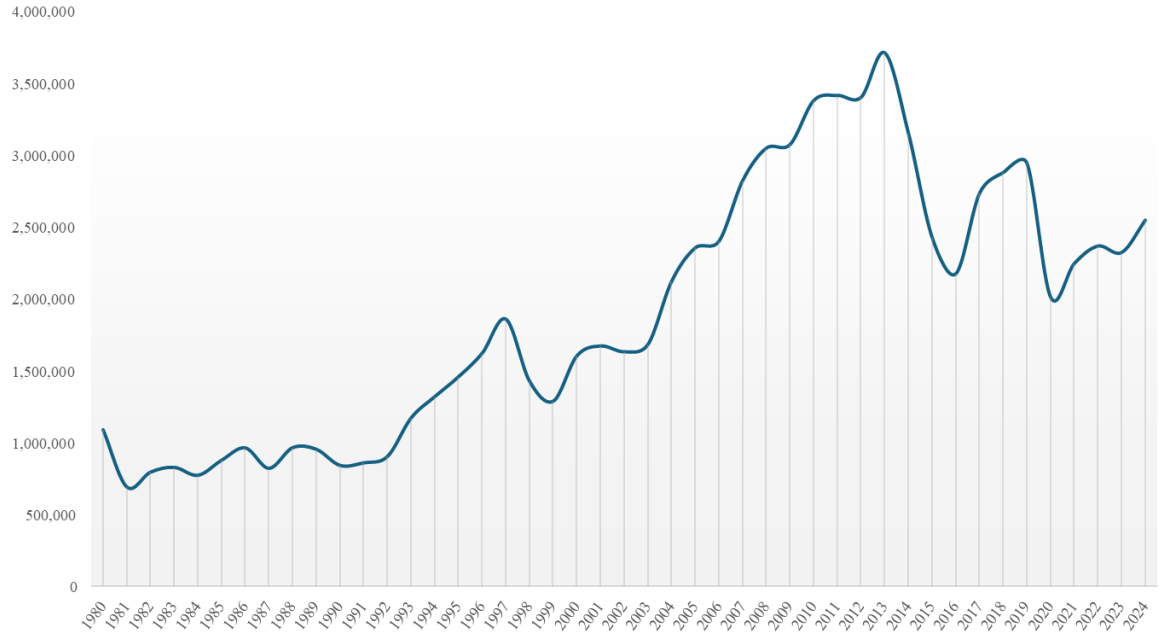
1.2.3 Objeto de estudo

Em 2024, o Brasil ocupou a oitava posição na produção mundial de veículos, com aproximadamente 2,55 milhões de automóveis produzidos e uma capacidade instalada anual de 4,6 milhões de unidades. O país concentra 26 fabricantes de veículos, máquinas agrícolas e rodoviárias, distribuídos em 53 unidades industriais localizadas em nove estados. Em 2023, o faturamento do setor automotivo foi de US$ 74,7 bilhões, e a geração direta de tributos sobre autoveículos, que inclui IPI, PIS/Cofins, ICMS e IPVA, totalizou R$ 107 bilhões (ANFAVEA, 2025). A relevância econômica do setor contrasta com sinais persistentes de perda de competitividade. Em 2024, a balança comercial da indústria automotiva, que inclui automóveis, autopeças, máquinas agrícolas, máquinas de construção e outros itens, registrou exportações de US$ 18,4 bilhões e importações de US$ 35,9 bilhões, resultando em um déficit de US$ 17,5 bilhões (ANFAVEA, 2025). O crescimento do mercado interno não tem sido acompanhado, na mesma proporção, pela capacidade de ampliar a produção local e as exportações industriais do setor. Após 2000, a produção brasileira expandiu-se até 2013. A partir desse ano, observou-se retração dos volumes, em linha com a desaceleração econômica nacional e a reorganização global da indústria automotiva (Figura 1).

A perda relativa de dinamismo torna-se mais evidente na comparação com mercados emergentes que ganharam atratividade para novos investimentos produtivos. O México é um exemplo. A proximidade com os Estados Unidos, a integração ao USMCA, acordo de livre-comércio entre os Estados Unidos, Canadá e México, e condições produtivas mais favoráveis contribuíram para seu fortalecimento como plataforma de produção e exportação automotiva (Covarrubias V., 2020; Sanginés; Russo; Simonazzi, 2021). O mercado brasileiro passou também a enfrentar maior pressão competitiva interna. Na América Latina, a ampliação da presença de montadoras de origem chinesa combina exportações, parcerias, aquisições e instalação de operações locais. Esse movimento amplia a variedade de produtos disponíveis, acelera a competição em segmentos eletrificados e pressiona as montadoras estabelecidas a responder com maior eficiência operacional, atualização tecnológica e redução de custos (Wu; Jiang; Ou, 2024). A expansão chinesa em terceiros mercados tem sido associada à redução da participação brasileira nos produtos industriais, em um padrão compatível com a especialização regressiva da economia brasileira. No setor automotivo, essa tendência reforça a necessidade de elevar a produtividade, a eficiência energética e a sofisticação tecnológica da produção local (Cunha *et al.*, 2023).

A indústria automotiva brasileira foi escolhida como objeto de estudo desta pesquisa em razão de sua relevância econômica, do déficit comercial no setor, da competição internacional por investimentos produtivos e do aumento da concorrência interna. A Figura 1 apresenta a evolução da produção anual de veículos no Brasil entre 1980 e 2024.

Figura 1 – Produção anual de veículos automotores no Brasil



Fonte: ANFAVEA (2025).

1.2.4 Contexto da empresa estudada

A pesquisa foi conduzida em uma montadora de veículos multinacional, com presença em 193 países e fábricas em nove deles, que, em 2025, comercializou cerca de 4,14 milhões de veículos leves e comerciais. A unidade brasileira está localizada no estado de São Paulo, emprega aproximadamente 3.000 colaboradores diretos e gera cerca de 20.000 empregos indiretos. A empresa tem capacidade anual de produção de 208.000 veículos leves e figura entre as maiores montadoras do país em participação de mercado. Sua visão corporativa orienta as operações em torno da inovação tecnológica, com foco em soluções sustentáveis, conectadas e seguras.

A empresa enfrenta pressões crescentes sobre os custos operacionais. Desde a pandemia de COVID-19, a indústria global convive com a elevação dos custos produtivos, restrições logísticas, o encarecimento de matérias-primas e maior instabilidade no fornecimento de componentes. Esses efeitos ampliaram a vulnerabilidade das cadeias globais de suprimentos

e elevaram a relevância da eficiência operacional como fator de competitividade industrial (Harding; Lindé; Trabandt, 2023). Conflitos regionais e tensões geopolíticas recentes agravaram esse ambiente. O conflito entre Rússia e Ucrânia afetou os mercados de energia e contribuiu para maior volatilidade nos preços do gás natural, do petróleo e de insumos associados à produção industrial. O aumento das incertezas comerciais internacionais e os conflitos no Oriente Médio reforçaram, por sua vez, a instabilidade dos mercados de energia, commodities e transporte, com projeções de aumento de preços devido a choques geopolíticos na oferta (IMF, 2026; Maneejuk; Kaewtathip; Yamaka, 2024; Sun *et al.*, 2024; World Bank, 2026).

Para empresas industriais intensivas em energia, como as montadoras automotivas, esses fatores se traduzem em maior exposição à volatilidade dos custos. Na linha de pintura automotiva, essa exposição é mais acentuada. As estufas de cura demandam consumo contínuo de gás natural e influenciam simultaneamente o custo operacional, a estabilidade do processo, a qualidade do acabamento e as emissões. A adoção de tecnologias da I4.0 deixa de ser apenas uma agenda de modernização tecnológica e passa a constituir um instrumento de resposta às pressões concretas de custo, eficiência energética, flexibilidade operacional e sustentabilidade. A avaliação estruturada de investimentos em tecnologias digitais torna-se necessária para apoiar decisões que envolvem benefícios operacionais, oportunidades de transformação tecnológica, custos de implantação e riscos de integração. Essa condição justifica a aplicação do modelo AHP-BOCR ao caso estudado, no qual se avaliam alternativas tecnológicas voltadas à otimização do consumo de gás natural em estufas de cura da linha de pintura automotiva.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e dos apêndices.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, com os conceitos e dimensões da I4.0, a aplicação de métodos MCDM a investimentos em I4.0, os fundamentos do AHP, do modelo BOCR e os critérios de decisão para investimentos em I4.0 organizados sob a estrutura BOCR.

O Capítulo 3 descreve a abordagem metodológica adotada, com o detalhamento do método de pesquisa, do procedimento de revisão da literatura, do fluxo e do protocolo de pesquisa, das etapas de diagnóstico e de trabalho de campo, da construção da estrutura hierárquica decisória, da definição do problema de decisão, da caracterização das alternativas

tecnológicas, da composição do painel de especialistas, do desenvolvimento do sistema web de apoio à decisão e do protocolo de coleta dos julgamentos pareados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e a discussão, com a contextualização dos resultados, a análise de consistência dos julgamentos, a validação computacional da ferramenta, a avaliação da camada de interpretabilidade assistida por IA, os pesos estratégicos BOCR e os pesos dos subcritérios, a caracterização das alternativas, a análise pelas perspectivas de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade, o desempenho das alternativas nos méritos BOCR, a síntese global e o ranking, a análise de sensibilidade e a comparação com benchmarks da literatura. Os resultados são discutidos à luz dos objetivos da pesquisa, do contexto industrial investigado e da literatura.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo, com a retomada do atendimento aos objetivos da pesquisa, as contribuições organizacionais e acadêmicas, as limitações identificadas, as oportunidades para trabalhos futuros e as considerações finais.

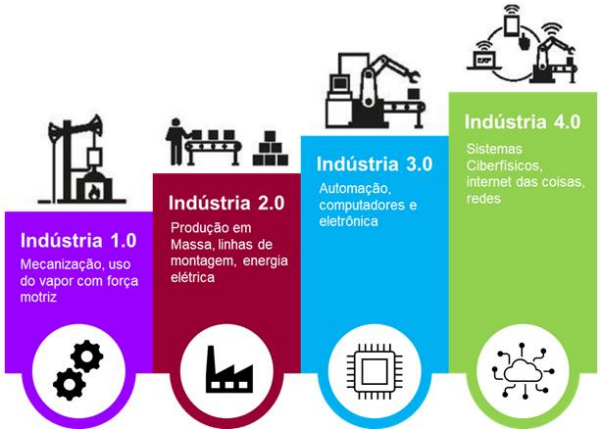
2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura organiza-se em três seções conceituais e em uma síntese. A Seção 2.1 trata da I4.0 e de suas dimensões de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade, que fundamentam os critérios do modelo. A Seção 2.2 trata da aplicação de métodos MCDM a investimentos em I4.0 e da lacuna que motiva este estudo: a documentação ainda limitada da aplicação conjunta do AHP e do BOCR a essa finalidade. A Seção 2.3 apresenta os fundamentos do AHP e do modelo BOCR. A Seção 2.4 consolida, sob a estrutura BOCR, os vinte subcritérios identificados na literatura para investimentos em I4.0.

2.1 INDÚSTRIA 4.0

A indústria, setor responsável pela produção de bens por meio de processos mecanizados e automatizados, passou por sucessivos marcos tecnológicos denominados Revoluções Industriais. Esses marcos foram associados à introdução de tecnologias específicas, como a mecanização, a eletrificação e a digitalização. A popularização da internet, nos anos 2000, intensificou a integração de tecnologias inteligentes nas fábricas e impulsionou uma nova mudança no paradigma produtivo (Lasi *et al.*, 2014). O conceito de I4.0 surgiu na Alemanha em 2011, associado a uma política econômica voltada a estratégias tecnológicas avançadas (Kagermann; Lukas; Wahlster, 2011; Roblek; Meško; Krapež, 2016). Desde então, a I4.0 ganhou relevância nos meios acadêmicos e industriais, consolidando-se como referência para a transformação digital da manufatura (Bucur, 2025; Lu, 2017; Zhang *et al.*, 2024). A Figura 2 sintetiza as revoluções industriais e suas características.

Figura 2 – Revoluções industriais e suas características



Fonte: Adaptado de Basl e Poór (2020).

As definições de I4.0 variam conforme a perspectiva adotada. Sob uma ótica sistêmica, a I4.0 pode ser entendida como a integração de máquinas, dispositivos físicos, sensores e softwares em rede, orientada à otimização empresarial e social (Industrial Internet Consortium, 2013). Kagermann, Helbig e Wahlster (2013) associam a I4.0 a um novo nível de organização e gestão da cadeia de valor ao longo do ciclo de vida dos produtos. Hermann, Pentek e Otto (2016) a compreendem como um termo abrangente que reúne tecnologias e conceitos organizacionais aplicados à cadeia de valor.

Para os fins deste estudo, adota-se uma perspectiva integradora. A I4.0 é compreendida como um conjunto de tecnologias digitais emergentes que transformam processos, produtos e serviços, com efeitos sobre a organização do trabalho, a cadeia de valor, a sustentabilidade das operações e a capacidade de tomada de decisão (Almeida *et al.*, 2023; Ghobakhloo, 2018; Hermann; Pentek; Otto, 2016).

Essa definição é adequada ao propósito da pesquisa. A avaliação de investimentos em I4.0 não se limita ao desempenho técnico ou ao retorno financeiro, mas também abrange impactos organizacionais, sociotécnicos e ambientais. Sob a perspectiva da inovação, as tecnologias da I4.0 podem gerar valor para clientes e organizações, oferecendo soluções aplicáveis a processos, produtos e serviços (Almeida *et al.*, 2023; Ghobakhloo, 2018; Pacchini *et al.*, 2019).

Basl e Poór (2020) ampliam essa interpretação ao incorporar a dimensão social, especialmente as mudanças no mercado de trabalho decorrentes da digitalização, da robotização e da automação. Ghobakhloo (2018), a partir de uma análise quanti-qualitativa de 178 documentos, identifica princípios de design e tendências tecnológicas associados à I4.0, apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Princípios de design e tendências tecnológicas da I4.0

Princípios de design	Tendências tecnológicas
• Orientação para serviços • Produtos inteligentes • Fábricas inteligentes • Interoperabilidade • Modularidade • Descentralização • Virtualização • Capabilidade em tempo real • Integração vertical • Integração horizontal • Customização de produtos • Responsabilidade social	• Internet das coisas (IoT) • Internet de serviços (IoS) • Internet das pessoas (IoP) • Internet dos dados (IoD) • Computação em nuvem (CC) • Big Data • Blockchain • Segurança cibernética (CS) • Realidade aumentada (AR) • Automação e robotização industrial • Manufatura aditiva (AM) • Simulação e modelagem • Sistemas ciberfísicos (CPS) • Tecnologias semânticas

Fonte: Adaptado de Ghobakhloo (2018).

O Quadro 2 evidencia que a I4.0 não se limita à automação de processos. O conceito envolve interoperabilidade entre sistemas ciberfísicos, integração vertical e horizontal, uso de dados em tempo real, virtualização, customização de produtos e responsabilidade social. Estudos posteriores ampliam essa classificação. Belman-Lopez, Jiménez-García e Hernández-González (2020), por exemplo, identificam princípios como eficiência, integração, flexibilidade, descentralização, modularidade, uso de informação em tempo real e tomada de decisão orientada por dados.

A composição das tecnologias habilitadoras da I4.0 não é estática. Sigov *et al.* (2024) observam que o conceito original reunia como habilitadoras os sistemas ciberfísicos, a IoT e a computação em nuvem, e observam que, na década seguinte à proposição do paradigma, a IA emergiu como tecnologia habilitadora central da nova geração da I4.0, ao lado do 5G/6G e da computação quântica. Nessa leitura, a IA não substitui os pilares originais, mas os amplia, ao potencializar as capacidades de sistemas ciberfísicos e da IoT (Sigov *et al.*, 2024). As taxonomias fundacionais da I4.0, entre elas a de tendências tecnológicas de Ghobakhloo (2018), não listavam a IA como tecnologia isolada. Interpreta-se que essa ausência reflete o estágio da tecnologia à época dessas classificações, e não sua exclusão do paradigma.

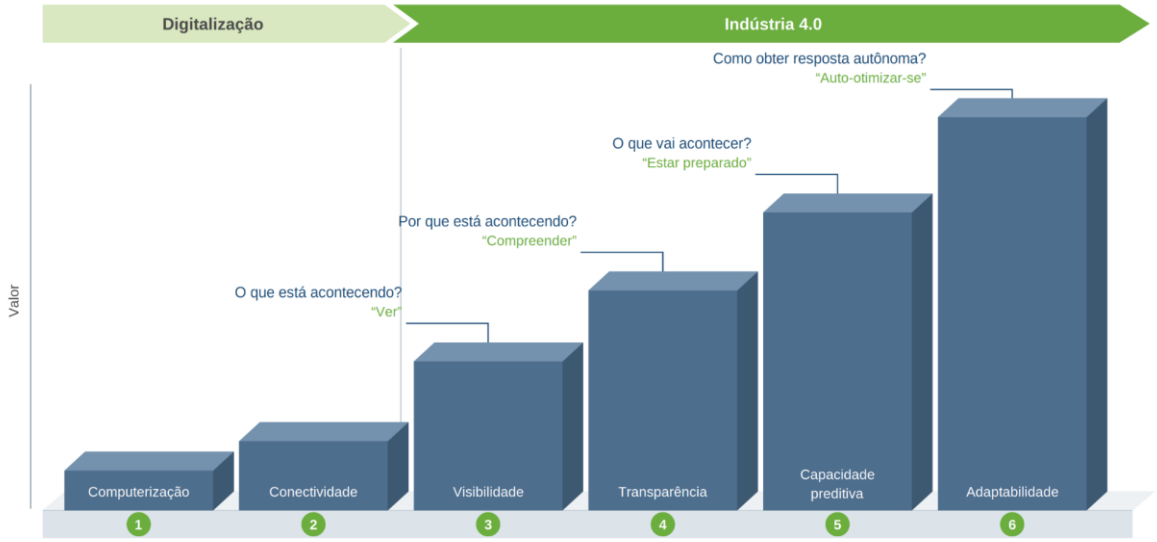
A heterogeneidade tecnológica da I4.0 e a interdependência entre seus elementos motivaram a proposição de estruturas analíticas capazes de orientar decisões de adoção tecnológica em diferentes níveis. Freund e Al-Majeed (2021) propõem *o Industry 4.0 Knowledge & Technology Framework* (IKTF), que articula três níveis de integração

tecnológica: micro, relacionado à decisão da empresa; meso, associado a fatores técnicos e organizacionais; e macro, vinculado a fatores financeiros, políticos e socioculturais.

Cordeiro, Reis e Fernandes (2023) propõem um modelo hierárquico que classifica os conceitos da I4.0 em tecnologias, princípios e dimensões. Com base em pesquisa etnográfica, Marcon *et al.* (2025) verificam que a implementação da I4.0 depende do equilíbrio entre fatores técnicos e sociotécnicos, como o apoio gerencial, a autonomia dos trabalhadores e a inovação aberta. Essa literatura sustenta a necessidade de abordagens integradas para reduzir a fragmentação entre os aspectos técnicos e organizacionais da transformação digital (Hoyer; Gunawan; Reaiche, 2020; Muniz Jr. *et al.*, 2025a; Ribeiro, V. B. *et al.*, 2025; Schneider, 2018).

Entre essas abordagens integradas, o Acatech Industrie 4.0 Maturity Index descreve a transformação digital como progressão da própria organização, e não como acúmulo de tecnologias habilitadoras. Schuh *et al.* (2020) organizam essa progressão em seis estágios de desenvolvimento baseados em valor, denominados computerização, conectividade, visibilidade, transparência, capacidade preditiva e adaptabilidade, cada um apoiado nas capacidades construídas no estágio anterior e avaliado em quatro áreas estruturais da empresa, os recursos, os sistemas de informação, a estrutura organizacional e a cultura. Os dois primeiros estágios correspondem à digitalização e constituem pré-requisito para a implementação da I4.0 sem integrá-la, e a I4.0 propriamente dita inicia-se no terceiro estágio, com a construção de um modelo digital atualizado da operação, denominado sombra digital (Schuh *et al.*, 2020). O índice mede o estágio de transformação digital da organização, e não a prontidão de uma tecnologia individual para implantação industrial, construto tratado na Seção 2.1.1 por meio da escala *Technology Readiness Level* (TRL) e aplicado, no Capítulo 3, à classificação das alternativas avaliadas. A Figura 3 apresenta os seis estágios e as perguntas orientadoras associadas.

Figura 3 – Estágios do caminho de desenvolvimento da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Schuh *et al.* (2020).

No cenário brasileiro, a I4.0 é associada à melhoria da competitividade industrial, com efeitos sobre a produtividade, a qualidade e a inserção em novos mercados (Dalenogare *et al.*, 2018). Estudos recentes também indicam que a adoção dessas tecnologias depende da capacidade das organizações de traduzir a visão digital em objetivos de negócio, práticas gerenciais e no desenvolvimento de competências (Muniz Jr. *et al.*, 2025a, 2025b; Muniz Jr; Ribeiro; Kakavelakis, 2026; Ribeiro, V. B. *et al.*, 2025). Tais achados reforçam a necessidade de modelos de decisão que orientem a adoção da I4.0 de forma estruturada e multidimensional. Esse é o tratamento adotado neste estudo, no qual a decisão sobre investimentos em tecnologias da I4.0 é tratada como um problema multicritério, envolvendo três dimensões: competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade.

Para os propósitos desta pesquisa, destacam-se tecnologias com potencial de aplicação na otimização energética em processos de manufatura intensivos em energia, especialmente as relacionadas à conectividade, ao monitoramento em tempo real, à inteligência analítica e à simulação. Duas dessas tecnologias compõem o escopo empírico do caso de aplicação: a IA aplicada ao controle de processos e os gêmeos digitais utilizados na simulação termodinâmica.

Entre as tecnologias da I4.0, a IA e o aprendizado de máquina, ou machine learning (ML), têm aplicação transversal em manutenção preditiva, controle de qualidade, otimização de processos e tomada de decisão (Babu; Nair; Kishore, 2025; Shrivastava *et al.*, 2025; Zhou *et al.*, 2023). Algoritmos de ML aplicados a dados de sensores podem antecipar falhas, apoiar

ajustes de manutenção e detectar anomalias em tempo real, inclusive com uso de redes neurais convolucionais e recorrentes (Zerguit; Hammoudi; Derrhi, 2024).

Em processos térmicos intensivos em energia, como a cura de tinta automotiva avaliada neste estudo, a integração entre Big Data, IA e controle preditivo é descrita como estratégia para a redução do consumo energético e o ajuste de variáveis de processo por meio de séries temporais e de algoritmos de previsão (Chen *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2025). Rosin *et al.* (2021) documentam que a I4.0 amplia a capacidade de tomada de decisão operacional ao fornecer insumos analíticos em tempo real ao decisor humano.

Os gêmeos digitais consistem em réplicas virtuais de sistemas físicos utilizadas para simulação, otimização e monitoramento de processos (Ghobakhloo *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2021). Na manufatura, gêmeos digitais alimentados por IA são aplicados à manutenção preditiva, à validação virtual de configurações e à adaptação às mudanças na demanda (Dai *et al.*, 2025; Qin *et al.*, 2026; Su *et al.*, 2024).

Chen *et al.* (2025) descrevem a combinação entre gêmeos digitais e controle preditivo baseado em redes neurais profundas para a tomada de decisão em tempo real na manufatura aditiva. Wang *et al.* (2026) discutem a fusão entre modelos físicos e dados para monitoramento da vida útil de ferramentas. Huang *et al.* (2021) observam um aumento de flexibilidade e adaptabilidade dos sistemas produtivos com a integração entre IA e gêmeos digitais, enquanto Dai *et al.* (2025) e Qin *et al.* (2026) indicam limitações associadas à integração de dados, à robustez dos modelos e à atualização autônoma dos gêmeos.

A aplicação de IA à manufatura também introduz requisitos de transparência, rastreabilidade e interpretabilidade, associados à confiança nos modelos e à capacidade de compreender as recomendações geradas por sistemas computacionais (Ahmed; Jeon; Piccialli, 2022; Rosário; Dias, 2025). A área de *Explainable Artificial Intelligence* (XAI), inteligência artificial explicável, reúne métodos de aprendizado como SHAP, LIME, raciocínio contrafactual e abordagens neuro-simbólicas, com aplicações em diagnóstico de falhas, monitoramento de qualidade, manutenção preditiva e cibersegurança industrial (Bac *et al.*, 2023; Cação; Santos; Antunes, 2025; Tzionis *et al.*, 2025).

Branco *et al.* (2023) apontam a explicabilidade como condição para a adoção de IA em ambientes industriais com interação humano-máquina, característica associada à transição para a Indústria 5.0. Avdoshin e Pesotskaya (2026) discutem o alinhamento da XAI aos requisitos regulatórios de transparência algorítmica nas decisões organizacionais. No sistema de apoio à decisão desenvolvido nesta pesquisa, a camada de interpretabilidade assistida por IA utiliza a arquitetura *Retrieval-Augmented Generation* (RAG), em português, geração

aumentada por recuperação (Song *et al.*, 2024). Essa camada não substitui os cálculos do modelo AHP-BOCR. Sua função é apoiar a interpretação qualitativa dos resultados quantitativos, com base em literatura científica revisada por pares, preservando a separação entre cálculo, interpretação automatizada e revisão humana.

A I4.0 também se relaciona a iniciativas de descarbonização e produção limpa, principalmente quando combinada com gêmeos digitais, Big Data, manutenção preditiva e otimização do uso de recursos (Hirsi *et al.*, 2025; Patrício; Varela; Silveira, 2025; Singh *et al.*, 2024). Hafeez *et al.* (2024) descrevem a aplicação de gêmeos digitais em setores de difícil descarbonização, como cimento, aço, química pesada e processos térmicos intensivos que utilizam combustíveis fósseis. Xiao *et al.* (2026) modelam a interação entre gêmeos digitais e os mercados de carbono, considerando metas de redução de emissões. O processo de cura de tinta automotiva, foco do caso de aplicação, insere-se nesse debate por demandar consumo contínuo de gás natural.

A relação entre I4.0 e sustentabilidade, entretanto, não é unidirecional. Beier *et al.* (2020), em revisão sistemática orientada pela perspectiva sociotécnica, observam que a sustentabilidade nos discursos sobre I4.0 contempla, de forma desigual, as dimensões econômicas, sociais e ambientais. De modo semelhante, a Comissão Europeia destaca que a evolução da indústria digital ocorre na interseção entre tecnologia, pessoas, sociedade e sustentabilidade (Breque; De Nul; Petridis, 2021). Para superar uma visão estritamente tecnocêntrica, estudos recentes enfatizam sistemas de manufatura centrados no ser humano e a transição para a Indústria 5.0, paradigma que prioriza a colaboração homem-máquina, a sustentabilidade e a resiliência sociotécnica (Bucur, 2025; Rame; Purwanto; Sudarno, 2024; Ribeiro; Nakano; Muniz Jr., 2024).

Dessa forma, a I4.0 é compreendida neste estudo como fenômeno tecnológico, organizacional, ambiental e decisório. Seu potencial de contribuição à manufatura depende da capacidade de selecionar e priorizar tecnologias alinhadas aos objetivos de competitividade, aos aspectos sociotécnicos e à sustentabilidade, e de interpretar os resultados dessa priorização de forma rastreável. Essa leitura fundamenta a construção da hierarquia decisória adotada na pesquisa, orienta a aplicação do modelo AHP-BOCR às alternativas tecnológicas avaliadas e justifica a camada de interpretabilidade assistida por IA incorporada à ferramenta desenvolvida.

2.1.1 Competitividade

Competitividade é a capacidade organizacional de sustentar e expandir a posição no mercado diante de desafios concorrenciais, fundamentada em inovação, eficiência, qualidade e adaptação (Porter, 2000; Teece, 2007). Na I4.0, o conceito incorpora a integração de tecnologias digitais para ampliar produtividade, flexibilidade e modelos de negócio orientados por dados (Dalenogare *et al.*, 2018; Ghobakhloo; Fathi, 2019). A automação, a digitalização e a integração de sistemas ciberfísicos elevam a eficiência operacional e a qualidade dos produtos, reduzem custos e tempos de entrega e aumentam a adaptabilidade às demandas dos clientes (Bal; Erkan, 2019; Dalenogare *et al.*, 2018; Kubickova *et al.*, 2021).

Estudos recentes identificam os mecanismos específicos dessa vantagem (Bohashko; Bohashko; Kosmidailo, 2025; Fan; Teng, 2026). A disponibilização de dados em tempo real permite decisões proativas e reduz erros; o monitoramento autônomo detecta falhas antes que causem paradas; e a manutenção preditiva reduz a inatividade e amplia a disponibilidade dos ativos (Obasi; Benson; Akinwande, 2026; Pozzi; Rossi; Secchi, 2023). Em conjunto, sustentam ganhos de produtividade, qualidade e flexibilidade.

A própria transformação digital das operações é fonte de vantagem competitiva ao posicionar a empresa como operadora madura de fábricas inteligentes e ampliar a decisão orientada por dados (Oztemel; Gursev, 2020; Verhoef *et al.*, 2021). A integração ponta a ponta por IoT e sistemas ciberfísicos estende o efeito à cadeia de valor, aumenta a visibilidade e a rastreabilidade e viabiliza novos modelos de negócio (Dixit; Kumar; Kumar, 2026; Huang *et al.*, 2023). No setor automotivo, a adoção avançada resulta em ganhos integrados de eficiência, qualidade e coordenação da cadeia de suprimentos (Piepoli *et al.*, 2024).

A maturidade da tecnologia também influencia o desempenho competitivo. O nível de prontidão tecnológica, expresso pela escala TRL, indica quão pronta uma tecnologia está para implantação industrial real (Mankins, 1995). Estágios mais avançados de TRL reduzem o risco técnico e de integração (Bates; Clausen, 2020) e aumentam a previsibilidade de custos e prazos (Buchner *et al.*, 2018) e a prontidão e o momento de adoção condicionam a captura de ganhos competitivos (Distelmans *et al.*, 2026). A intensidade desse efeito varia com porte, maturidade digital e contexto da organização, e grandes corporações avançam mais rápido por disporem de recursos e capacidades de integração consolidadas (Buckley *et al.*, 2020; Fonseca; Predo; Blikstad, 2025).

A captura de vantagem competitiva depende ainda da superação de barreiras, como custos iniciais elevados, riscos de cibersegurança, complexidade de integração e dependência

de fornecedores específicos (Sharma; Yadav; Joshi, 2024). Em levantamento com 43 profissionais da manufatura brasileira, analisado por *fuzzy*-TOPSIS, Contieri, Anholon e De Santa-Eulalia (2022) ordenam doze tecnologias habilitadoras por prioridade de implantação e por dificuldade, e identificam a segurança cibernética como a única a combinar alta prioridade com a maior dificuldade, condição que os autores associam ao principal gargalo da adoção no país.

Além do investimento inicial, a digitalização impõe custos recorrentes de operação e manutenção da infraestrutura, como redes, licenças e atualização de sistemas (Kamble; Gunasekaran; Gawankar, 2018; Müller; Kiel; Voigt, 2018). O retorno, em geral avaliado pelo tempo de recuperação do capital, permanece critério central de aprovação na prática industrial, mesmo sob avaliação multicritério (Almeida *et al.*, 2023; Lefley, 1996). A dependência tecnológica decorre da integração de plataformas de terceiros e introduz risco de perda de autonomia operacional (Dalenogare *et al.*, 2018; Zhong *et al.*, 2017).

A literatura revista converge ao associar a adoção da I4.0 a ganhos de eficiência, produtividade e qualidade, e ao situar esses ganhos como principal justificativa do investimento, ressalvadas as barreiras de custo, de integração e de dependência tecnológica. Essa convergência estabelece a expectativa de predominância da competitividade na decisão, retomada na Seção 4.7. A perspectiva fundamenta dez dos vinte subcritérios do modelo, com Eficiência e Produtividade e Qualidade entre os benefícios, Transformação digital e Aumento da maturidade tecnológica entre as oportunidades, Valor do investimento, Infraestrutura digital e custo de operação e Payback entre os custos, e Segurança cibernética, Complexidade de integração e Dependência tecnológica entre os riscos.

2.1.2 Aspectos sociotécnicos

Aspectos sociotécnicos são as interações entre elementos sociais, como pessoas, competências e práticas, e elementos técnicos, como ferramentas, sistemas e tecnologias, em sistemas organizacionais (Marcon *et al.*, 2022). Fundamentada na teoria dos sistemas sociotécnicos, a perspectiva busca otimizar conjuntamente fatores humanos e tecnológicos em contextos complexos (Marcon *et al.*, 2022; Sony; Naik, 2020). Linhas de montagem são sistemas sociotécnicos por excelência, sustentados por interações contínuas entre trabalhadores e tecnologia (Muniz Jr. *et al.*, 2025a; Muniz Jr; Ribeiro; Kakavelakis, 2026). A literatura recente organiza o campo sociotécnico em três níveis de análise, micro, de pessoas e competências,

meso, da organização e das práticas de gestão, e macro, da sociedade, das políticas públicas e da infraestrutura de qualificação (Muniz Jr. *et al.*, 2025b; Ribeiro; Nakano; Muniz Jr., 2024).

A evidência empírica sobre a adoção da I4.0 na indústria automotiva brasileira registra distância entre intenção e execução. Em levantamento com 118 respondentes de montadoras brasileiras, Muniz Jr. *et al.* (2025a) identificam que os gestores reconhecem visão organizacional sobre a criação de valor pelas tecnologias digitais, mas apontam necessidade de melhorar os planos de implementação e dificuldade em converter essas tecnologias em desempenho estratégico. Em estudo qualitativo com dez gestores de sete empresas do consórcio modular automotivo, Muniz Jr., Ribeiro e Kakavelakis (2026) relatam preocupações com a automação massiva nas linhas de produção, com a integração a sistemas legados e com o compartilhamento de conhecimento, apontado como desafio de grande porte, incluindo perda de conhecimento na saída de empregados e retenção deliberada de conhecimento por receio quanto à manutenção do posto. Ribeiro *et al.* (2025) chegam a resultado convergente em linhas de manufatura de vidro. Essa distância entre o potencial declarado e a execução observada não desqualifica a perspectiva sociotécnica, e sim justifica seu tratamento como dimensão autônoma de julgamento.

No nível micro, a literatura associa a I4.0 à formação do trabalhador 4.0 e a competências técnicas, metodológicas, sociais e pessoais (Muniz Jr; Ribeiro; Kakavelakis, 2026; Ribeiro; Miraglia; Muniz Jr., 2026; Ribeiro; Nakano; Muniz Jr., 2024). Desse conjunto, o modelo operacionaliza a ergonomia, a saúde e a segurança ocupacional. A automação inteligente reduz a exposição a tarefas repetitivas e fisicamente exaustivas e transfere parte da atividade humana da intervenção manual para a supervisão de sistemas instrumentados, o que amplia as exigências de segurança e ergonomia em postos integrados a sistemas digitais (Almeida *et al.*, 2023; Müller; Kiel; Voigt, 2018; Sony; Naik, 2020). Em operação contínua, a substituição de inspeções manuais por monitoramento automatizado reduz a exposição a condições insalubres e configura a ergonomia e a segurança ocupacional como benefícios sociotécnicos diretos da digitalização.

No nível meso, a literatura sobre montadoras brasileiras descreve os construtos organizacionais da transformação digital, como expectativas dos empregados, colaboração externa, visão e estratégia de digitalização, suporte da liderança e impactos competitivos (Muniz Jr. *et al.*, 2025a), além dos benefícios e barreiras percebidos por gestores de empresas adotantes (Cavalieri; Reis; Amorim, 2024; Cordeiro; Reis; Fernandes, 2024). Desse nível, o modelo recupera dois aspectos. O primeiro é a melhoria do ambiente de trabalho. A digitalização desloca atividades repetitivas para sistemas automatizados e amplia a demanda

por funções de análise, supervisão e decisão, o que valoriza profissionais com habilidades analíticas e autonomia e qualifica o ambiente de trabalho (Bednar; Welch, 2020; Marcon *et al.*, 2022).

O segundo aspecto é a capacitação contínua associada à gestão do conhecimento. O conhecimento tácito de supervisores, operadores e técnicos permanece necessário durante e após a implementação, sobretudo onde a tecnologia não substitui integralmente a experiência acumulada (Muniz Jr. *et al.*, 2024, 2025a). A adoção da I4.0 exige preservar, compartilhar e recombinar conhecimentos técnicos e operacionais, processo que demanda capacitação contínua e esforço organizacional sustentado diante da evolução acelerada das tecnologias (Abubakar *et al.*, 2019; Almeida *et al.*, 2023; Banerjee; Sharma, 2025).

No nível macro, os aspectos sociotécnicos envolvem condições externas à organização, como políticas de qualificação, infraestrutura institucional e incentivos à cooperação entre empresas, universidades e centros de pesquisa, cuja fragilidade no Brasil limita a difusão de capacidades associadas à I4.0 (Muniz Jr. *et al.*, 2025b). Sem atenção à capacitação e à governança das relações de trabalho, a adoção tende a gerar resistência e perda de conhecimento organizacional (Muniz Jr.; Moschetto; Wintersberger, 2023; Tortorella *et al.*, 2023). O modelo aborda, nesse nível, os impactos sociais da automação, que pode deslocar empregos e ampliar desigualdades em funções de baixa qualificação e demanda políticas de reconversão e atenção às consequências distributivas (Muniz Jr. *et al.*, 2025b).

A consideração integrada dos níveis micro, meso e macro aproxima o investimento em I4.0 dos princípios da Indústria 5.0, organizados pela Comissão Europeia em torno da centralidade humana, da sustentabilidade e da resiliência organizacional (Breque; De Nul; Petridis, 2021; Ivanov, 2023).

A literatura revista sobre o setor localiza o principal obstáculo à adoção nos níveis meso e macro, na gestão do conhecimento, na capacitação continuada e nas condições institucionais de qualificação, e não no nível micro das condições individuais de trabalho. Essa localização estabelece a expectativa retomada na Seção 4.7. A perspectiva fundamenta quatro dos vinte subcritérios do modelo, um em cada mérito da estrutura BOCR, com Ergonomia, saúde e segurança ocupacional no nível micro, Melhoria do ambiente de trabalho e Capacitação contínua e gestão do conhecimento no nível meso, e Impactos sociais da automação no nível macro.

2.1.3 Sustentabilidade

Sustentabilidade é a capacidade de atender necessidades presentes sem comprometer gerações futuras (Brundtland *et al.*, 1987) e abrange três dimensões interdependentes, econômica, ambiental e social, reunidas na formulação do *Triple Bottom Line* (Elkington, 1998). Na indústria, envolve práticas que minimizam impactos ambientais, como controle de emissões, uso eficiente de recursos e conformidade regulatória (Sarkis, 2001).

As três dimensões não recebem o mesmo tratamento neste modelo. Os efeitos sociais da digitalização, como segurança ocupacional, demanda por novas competências e deslocamento de empregos, são incorporados à perspectiva sociotécnica (Seção 2.1.2). A perspectiva de sustentabilidade concentra-se, portanto, nas dimensões ambientais e econômico-regulatórias, nas quais os efeitos da I4.0 são mais diretamente mensuráveis no processo analisado.

O exame da relação entre I4.0 e sustentabilidade tem adotado o *Triple Bottom Line* como lente analítica (Elkington, 1998), com as três dimensões consideradas em conjunto. Piccarozzi *et al.* (2022), em revisão sistemática de 192 artigos, verificam que o pilar econômico é o mais estudado, com 39 trabalhos, seguido do ambiental, com 35, e do social, com 16, e que 63 artigos examinam os três pilares conjuntamente. A mesma revisão evidencia assimetria acentuada no sentido atribuído à relação, com 117 artigos relatando efeito positivo, 8 prevendo efeito positivo apenas em perspectiva futura, 4 relatando efeito negativo e 56 sem investigar que tipo de relação existe entre as duas (Piccarozzi *et al.*, 2022). Beier *et al.* (2020) analisam as publicações mais citadas sobre I4.0 sob perspectiva sociotécnica e constatam que somente 17 dos 684 fragmentos textuais examinados apresentam evidência empírica para os efeitos de sustentabilidade que afirmam. Os autores concluem que a sustentabilidade não constitui parte integrante do conceito de I4.0, sendo tratada como característica acessória, e que a dimensão ambiental é a menos representada entre as três categorias analisadas.

O papel da I4.0 na sustentabilidade é ambíguo. As tecnologias digitais promovem ganhos ambientais e econômicos, mas impõem desafios sociais e *trade-offs* no uso de recursos (Ching *et al.*, 2022; Salman *et al.*, 2026). Na dimensão ambiental, IoT, IA, gêmeos digitais e manufatura aditiva viabilizam monitoramento em tempo real, análise preditiva e otimização de recursos, com efeito direto sobre eficiência energética, redução de emissões e práticas de economia circular (Agrawal *et al.*, 2022; Beltrami *et al.*, 2021; Ghobakhloo, 2020; Javaid *et al.*, 2022). Em contrapartida, a digitalização eleva o consumo de energia, sobretudo na infraestrutura de TI, amplia a demanda por matérias-primas e acelera a substituição de

equipamentos, com aumento dos resíduos eletrônicos (Ford; Despeisse, 2016; Moreau *et al.*, 2025; Müller; Kiel; Voigt, 2018). O resultado líquido depende da fonte de energia e das práticas de gestão (Bonilla *et al.*, 2018).

A sustentabilidade ancorada na I4.0 também tem efeitos reputacionais e regulatórios. Práticas sustentáveis podem melhorar a percepção pública e a reputação corporativa, com reflexos no relacionamento com clientes, investidores e comunidades (Beltrami *et al.*, 2021; Kamble; Gunasekaran; Gawankar, 2018; Sharma *et al.*, 2021). O uso dessas tecnologias facilita a obtenção de certificações ambientais e o atendimento a requisitos de *compliance*, o que reduz o risco regulatório e amplia o acesso a mercados (Bai *et al.*, 2020; Müller; Kiel; Voigt, 2018). Em sentido oposto, o descarte de equipamentos digitalizados gera custos de conformidade com regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas (Beltrami *et al.*, 2021; Ghobakhloo, 2020).

A mensuração desses efeitos permanece frágil. Entre os 192 artigos revisados por Piccarozzi *et al.* (2022), apenas 5 indicam parâmetro preciso para medir o impacto da I4.0 sobre a sustentabilidade, e os autores apontam a necessidade de sistemas, modelos e conjuntos de indicadores que sustentem essa determinação. Bai *et al.* (2020) propõem estrutura de avaliação de tecnologias da I4.0 fundamentada nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e em opinião de especialistas, procedimento que apoia a decisão por escala simplificada, sem parâmetro preciso de medida. No processo avaliado neste estudo, a mensuração dispõe de base física. Giampieri *et al.* (2020) identificam a linha de pintura como responsável pelo maior consumo energético do processo de produção veicular, e Nemitallah *et al.* (2023) revisam a aplicação de IA ao controle de sistemas de combustão, com atenção conjunta à eficiência de queima e às emissões de óxidos de nitrogênio, e assinalam que a relação entre as duas não se resolve por modelo teórico simples.

A complexidade da relação entre I4.0 e sustentabilidade decorre da coexistência de efeitos de sentido oposto, da escassez de evidência empírica que os sustente e da ausência de parâmetros consolidados de mensuração. Na cura de tinta automotiva, esse debate é direto. A redução do consumo de gás natural produz ganho ambiental e econômico, mas a decisão exige ponderar custos de implementação, custos de descarte e efeitos sobre a operação, ainda frequentemente subestimados ou pouco quantificados (Bonilla *et al.*, 2018; Khan *et al.*, 2025, 2026).

Parte relevante dessa literatura atribui à dimensão ambiental papel de direcionadora da adoção da I4.0 (Bai *et al.*, 2020; Ghobakhloo, 2020), expectativa que a Seção 4.7 confronta com os pesos atribuídos pelo painel. Por isso, a sustentabilidade é tratada como perspectiva

autônoma, ao lado da competitividade e dos aspectos sociotécnicos, e fundamenta seis dos vinte subcritérios do modelo, distribuídos pelos quatro méritos da estrutura BOCR. Ao avaliar investimentos em I4.0 sob as perspectivas econômica, financeira e sociotécnica, Almeida *et al.* (2023) apontam como limitação o fato de a sustentabilidade não constituir dimensão central do modelo proposto, e indicam que ela precisaria tornar-se dimensão adicional em vez de permanecer diluída entre os elementos das demais. O tratamento adotado neste estudo responde a essa indicação e atende, no plano decisório, à ausência de instrumentos apontada por Piccarozzi *et al.* (2022), ao submeter os efeitos ambientais e regulatórios da I4.0 a julgamento explícito e ponderado ao lado dos demais critérios.

2.2 APLICAÇÕES DE MCDM EM DECISÃO DE INVESTIMENTOS EM I4.0

O Multi-Criteria Decision Making (MCDM), também referido como Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), é o estudo de métodos que incorporam critérios conflitantes ao planejamento gerencial (International Society on MCDM, 2025). Desde a década de 1960, esses métodos vêm sendo desenvolvidos para a resolução estruturada de problemas de decisão (Greco; Słowiński; Wallenius, 2024; Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023).

Diversos métodos de apoio à tomada de decisão com múltiplos critérios são identificados na literatura. Entre os principais destacados por Ishizaka e Nemery (2013) estão o AHP, o Analytic Network Process (ANP), a Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), o Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH), o Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation (PROMETHEE), o Élimination et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE) e a Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS).

Os métodos MCDM têm se consolidado como ferramentas essenciais no apoio às decisões de investimento na I4.0, permitindo avaliar opções tecnológicas, gerenciar incertezas e fornecer uma estrutura analítica robusta para melhorar a qualidade decisória (Li; Yao; Lu, 2025; Soni *et al.*, 2022; Zayat *et al.*, 2023). Entre as diversas abordagens disponíveis, o AHP destaca-se como a mais aplicada, conforme demonstram estudos bibliométricos abrangentes (Emrouznejad; Marra, 2017; Greco; Słowiński; Wallenius, 2024; Tramarico *et al.*, 2015). Um benefício dessa abordagem é sua capacidade de validar a consistência dos dados considerados.

No contexto específico da I4.0, o AHP tem sido reconhecido como uma das principais abordagens para decisões de investimento (Palma; Bianco; Salomon, 2024; Zayat *et al.*, 2023). Ele tem sido aplicado em diversos cenários que incluem seleção de tecnologias,

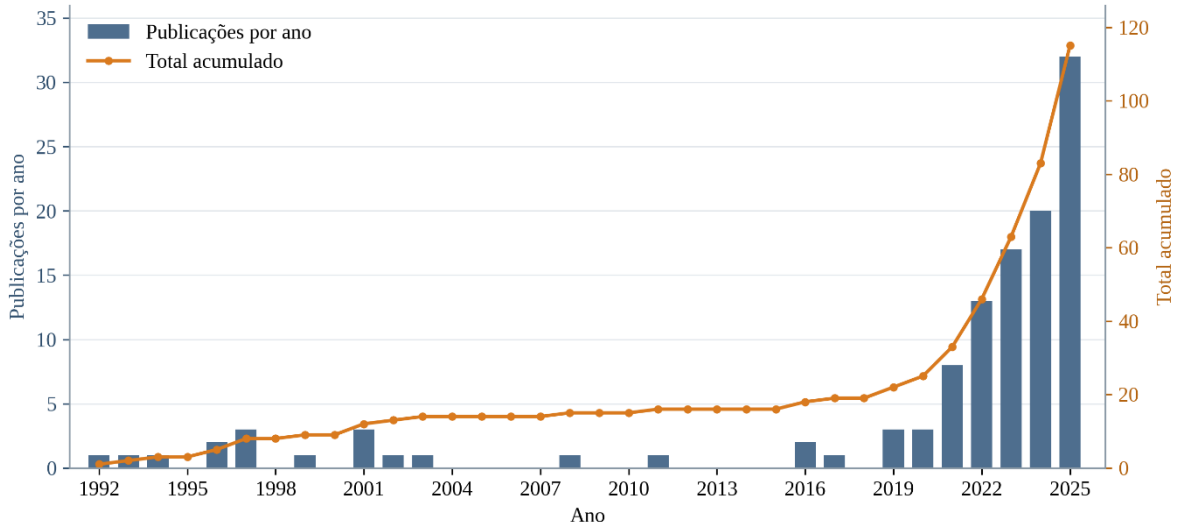
avaliação de alternativas e suporte decisório em áreas como gestão de projetos, seleção de fornecedores, sustentabilidade e otimização de processos industriais (Mardani *et al.*, 2015; Zayat *et al.*, 2023). A principal vantagem do método AHP é sua capacidade de lidar com problemas complexos de tomada de decisão, estruturando-os em uma hierarquia de critérios e subcritérios. Essa abordagem facilita a comparação direta entre elementos, utilizando uma escala de razão subjetiva, o que ajuda a tornar o processo de decisão mais compreensível e estruturado para o tomador de decisão (Greco; Słowiński; Wallenius, 2024; Ishizaka; Nemery, 2013).

A comparação pareada entre elementos, que origina as prioridades do método, tem aplicação documentada em ampla variedade de contextos organizacionais (Ho; Ma, 2018). Em investimentos na I4.0, o método apoia a decisão ao considerar fatores como custo, viabilidade tecnológica e retorno, alinhando escolhas aos objetivos das organizações (Kumar; Vrat; Shankar, 2024; Nimawat; Gidwani, 2020).

O AHP também auxilia na avaliação de investimentos em tecnologias como IoT, IA e Big Data, com influência na competitividade e na eficiência (Arora *et al.*, 2022) e no apoio à priorização de soluções voltadas à sustentabilidade e à eficiência de recursos (Lombardi Netto *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2023). No entanto, ainda há uma escassez de estudos envolvendo a aplicação do AHP como suporte à decisão de investimentos em I4.0 (Palma; Bianco; Salomon, 2024). O interesse na aplicação dessa ferramenta para este propósito intensificou-se nos últimos anos.

A Figura 4 mostra o número anual de documentos (barras azuis) e o total acumulado (curva laranja) desde 1992, permitindo acompanhar a evolução da área. A partir de 2020, o volume de publicações cresce, concentrando 81% dos registros entre 2020 e 2025. A base do gráfico reúne os 115 documentos únicos remanescentes após a remoção das duplicatas entre as duas expressões de busca, conforme o fluxo apresentado na Seção 3.2.

Figura 4 – Publicações anuais sobre MCDM e investimentos em I4.0



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A evolução dos critérios acompanha a mudança do próprio objeto avaliado. Os estudos iniciais tratavam da justificação de sistemas de manufatura e apontavam a insuficiência das técnicas econômicas isoladas, incorporando fatores intangíveis e medidas não financeiras de desempenho (Abdel-Kader; Dugdale, 2001; Datta *et al.*, 1992; Mohanty; Deshmukh, 1998). No início dos anos 2000, a literatura passou a integrar o critério econômico a critérios estratégicos, como flexibilidade e melhoria da qualidade, com tratamento difuso da imprecisão inerente às estimativas (Abdel-Kader; Dugdale, 2001; Ertugrul Karsak; Tolga, 2001; Karsak, 2002; Yusuff; Yee; Hashmi, 2001).

Trabalhos posteriores especializaram os critérios em atributos qualitativos do equipamento, entre eles confiabilidade, facilidade de operação e manutenibilidade (Durán; Aguilo, 2008), e depois incorporaram a dimensão ambiental à avaliação de investimentos em tecnologia de manufatura (Bai; Sarkis, 2017). A produção recente sobre adoção da I4.0 amplia o escopo para a sustentabilidade energética, a maturidade digital e a prontidão tecnológica (Madurai Elavarasan *et al.*, 2021; Saad; Bahadori; Jafarnejad, 2021), além de fatores organizacionais, como a cultura empresarial e as competências digitais (Bademosi; Issa, 2021; Trushkina *et al.*, 2020). Almeida *et al.* (2023) articulam essas frentes ao propor a avaliação de investimentos em tecnologias da I4.0 sob três perspectivas, econômica, financeira e sociotécnica, combinadas em um índice integrador. A Tabela 1 relaciona os documentos mais citados dessa base que aplicam MCDM à decisão de investimento, com os respectivos critérios adotados.

Tabela 1 – Documentos mais citados sobre MCDM, I4.0 e decisões de investimento

Autores	Citações	Critérios de decisão de investimentos em I4.0
Durán e Aguilo (2008)	263	Flexibilidade, facilidade de operação, confiabilidade, qualidade, facilidade de implementação e manutenibilidade
Ertugrul Karsak e Tolga (2001)	247	Econômicos, por fluxo de caixa descontado difuso, e estratégicos, como flexibilidade e melhoria da qualidade
Kim, Park e Yoon (1997)	232	Financeiros e não financeiros, medidos sob custeio baseado em atividades
Karsak (2002)	143	Econômicos e estratégicos, com flexibilidade e qualidade ampliada
Bai e Sarkis (2017)	126	Flexibilidade verde, sustentabilidade ambiental e risco
Abdel-Kader e Dugdale (2001)	88	Retorno financeiro, fatores não financeiros, como flexibilidade, prazo de entrega, qualidade e requisitos do cliente, e riscos de mercado e de tecnologia
Yusuff, Yee e Hashmi (2001)	88	Econômicos, estratégicos, sociais, operacionais, e organizacionais
Sarkis (1997)	68	Critérios tradicionais e não tradicionais de justificação, tratados por análise envoltória de dados
Datta *et al.* (1992)	53	Operacionais, custo, e fatores humanos
Almeida *et al.* (2023)	40	Econômicos, financeiros e sociotécnicos, combinados em índice integrador

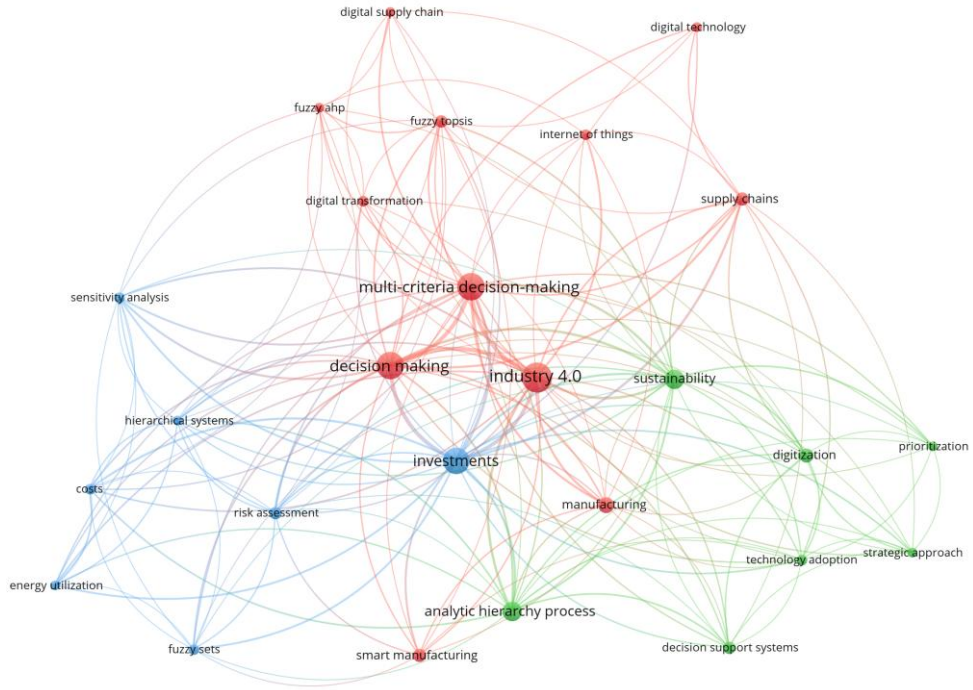
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A identificação de tendências recentes foi conduzida por análise de coocorrência de palavras-chave sobre os 90 documentos dessa base publicados entre 2021 e 2025. A análise empregou arquivo de tesauro para unificar variantes de um mesmo termo, com a consolidação de formas no plural e no singular, de grafias hifenizadas e não hifenizadas e de siglas e expressões por extenso, unificação que antecede a contagem de ocorrências e reduz a fragmentação da rede em nós de mesmo significado. Com limiar mínimo de quatro ocorrências e normalização por força de associação, a rede resultante reúne 26 termos distribuídos em três agrupamentos, com doze, sete e sete termos (van Eck; Waltman, 2010). O primeiro agrupamento reúne a decisão multicritério e as tecnologias digitais da manufatura, com destaque para *multi-criteria decision-making*, *industry 4.0*, *smart manufacturing*, *internet of things* e *digital transformation*. O segundo agrupamento articula o *analytic hierarchy process* à *sustainability*, à *digitization* e *à technology adoption*, refletindo a incorporação da dimensão ambiental e da prontidão organizacional às decisões tecnológicas. O terceiro agrupamento concentra os termos da avaliação econômica e da incerteza, entre eles *investments*, *costs*, *energy utilization*, *risk assessment*, *sensitivity analysis* e *hierarchical systems*.

A estrutura da rede é compatível com a fragmentação investigada nesta pesquisa. Os termos relativos a custos, riscos e consumo energético formam um agrupamento próprio, distinto daquele que reúne a I4.0 e a sustentabilidade, situação que sinaliza tratamento

fragmentado dessas dimensões na produção recente. A estrutura BOCR integra ganhos, oportunidades, dispêndios e incertezas em uma única formulação de síntese, e a presente pesquisa se posiciona na articulação entre os três agrupamentos identificados (Palma; Bianco; Salomon, 2024; Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023). A Figura 5 apresenta a rede de coocorrência que sustenta essa leitura.

Figura 5 – Rede de coocorrência de palavras-chave entre 2021 e 2025



Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com dados da Scopus e uso do VOSviewer.

2.3 FUNDAMENTOS DO AHP E DO MODELO BOCR

O método AHP, sua extensão pelo modelo BOCR e os métodos de síntese disponíveis na literatura formam a base conceitual sobre a qual o modelo de decisão desta dissertação foi construído. A aplicação ao problema de investimento avaliado, com a definição das equações efetivamente adotadas, é desenvolvida no Capítulo 3.

2.3.1 O método AHP

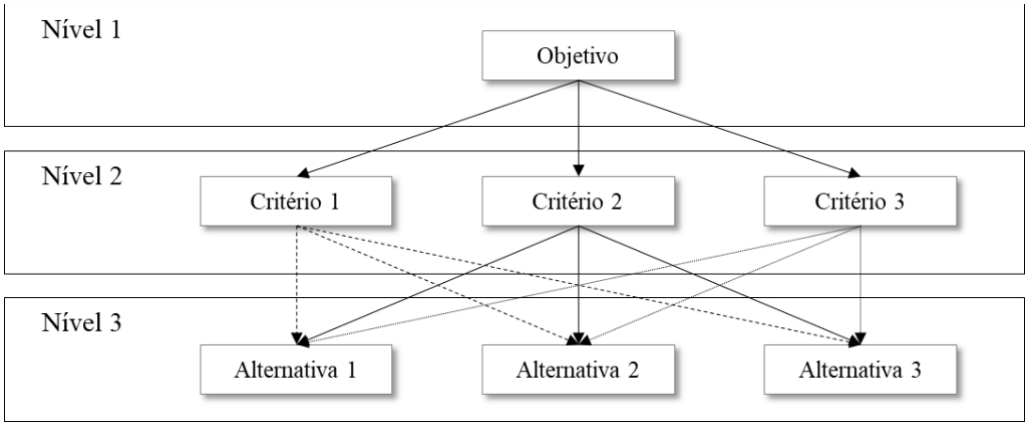
O AHP, desenvolvido por Thomas L. Saaty, é um método de apoio à tomada de decisão que decompõe problemas complexos em uma hierarquia estruturada por objetivos, critérios, subcritérios e alternativas. Essa decomposição facilita a comparação e a priorização

dos elementos com base em julgamentos humanos e permite avaliar simultaneamente critérios qualitativos e quantitativos (Ishizaka; Nemery, 2013; Saaty, 1977, 1990).

O AHP é considerado um método compensatório por admitir que um desempenho inferior em determinado critério seja compensado por um desempenho superior em outro, por meio de uma estrutura de agregação aditiva. Sua aplicação compreende três etapas principais: estruturação, julgamento e síntese (Saaty, 1990). Na estruturação, o problema é organizado em uma hierarquia que contém o objetivo principal, os critérios ou subcritérios que expressam os fatores considerados e as alternativas disponíveis para análise (Saaty, R. W., 1987).

A Figura 6 apresenta um modelo geral de estrutura hierárquica para um problema com três alternativas e três critérios. O objetivo da decisão ocupa o topo da hierarquia, seguido pelos critérios em nível intermediário e pelas alternativas em nível inferior, em um modelo que considera os fatores segundo suas prioridades relativas.

Figura 6 – Modelo de estrutura hierárquica



Fonte: Adaptado de Ishizaka e Nemery (2013).

Os elementos de cada nível são comparados entre si, em pares, para determinar sua importância relativa em relação ao elemento do nível superior, utilizando a Escala Fundamental de Saaty, que varia de 1 (igual importância) a 9 (importância extrema), conforme o Quadro 3 (Saaty, 1977).

Quadro 3 – Escala Fundamental de Saaty

Valor	Definição	Explicação
1	Importância igual	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância fraca	Experiência e julgamento levemente a favor de uma atividade sobre a outra.
5	Importância essencial ou forte	Experiência e julgamento fortemente a favor de uma atividade sobre a outra.
7	Importância demonstrada	Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorecendo uma atividade em relação à outra com ordem de afirmação a mais alta possível.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma melhor relação de compromisso.
Recíprocos dos números não-zero acima	Se uma atividade *i* tem um dos números não-zero acima associados a ela quando comparada a uma atividade *j*, então *j* tem o valor recíproco quando comparado com *i*	
Número racionais	Razões fora da escala	Se a coerência precisa ser forçada obtendo-se *n* valores numéricos para toda a matriz.

Fonte: Saaty (1977; 2005).

Por meio da álgebra linear, a matriz resultante A é utilizada para calcular o autovetor principal (w) e o respectivo autovalor máximo (λ_{max}). O autovetor principal representa as prioridades relativas dos elementos comparados, determinadas com base no Teorema de Perron-Frobenius (Saaty, 1977):

$$\mathrm{A}w = \lambda_{\max}\ w \tag{1}$$

O autovetor principal é a representação necessária das prioridades quando a matriz de julgamentos constitui pequena perturbação de uma matriz consistente, condição que Saaty (2003) associa ao julgamento humano sobre intangíveis. A média geométrica das linhas é o método alternativo de derivação, equivalente aos mínimos quadrados logarítmicos, e corresponde ao estimador de máxima verossimilhança da escala subjacente quando o erro de julgamento é multiplicativo com distribuição lognormal (Crawford; Williams, 1985). Sob inconsistência moderada, os métodos convergem, e em simulação com matrizes de ordem três a sete e razão de consistência inferior a 10%, as contradições de ordenação entre o autovetor, a média geométrica e a média das colunas normalizadas crescem com a dimensão e com a inconsistência e restringem-se a prioridades próximas (Ishizaka; Lusti, 2006).

A consistência dos julgamentos refere-se à lógica interna das comparações pareadas e é necessária à validade dos resultados. Se um elemento A é preferido a B e B é preferido a C,

então A deve ser preferido a C para que os julgamentos sejam consistentes (Salomon; Gomes, 2024). Para medir essa consistência, o AHP utiliza o Índice de Consistência (CI), calculado pela Equação 2:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (2)$$

Em que:

- λ_{max} é o maior autovalor da matriz de comparações pareadas;
- n é o número de elementos comparados.

A Razão de Consistência (CR) é obtida pela comparação do CI com um Índice de Consistência Aleatória (RI), valor médio do CI para matrizes de comparações aleatórias (Saaty, 1977):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Se a CR for menor que 10%, os julgamentos são considerados aceitavelmente consistentes. Caso contrário, devem ser revisados (Ishizaka; Nemery, 2013; Saaty, 1977).

A razão de consistência afere a coerência cardinal interna de uma matriz e não se confunde com a qualidade da estimativa que dela se extrai. Grzybowski (2016) distingue a inconsistência da matriz, a consistência do julgador e a utilidade da matriz para a estimação das prioridades, e verifica por simulação que a correlação ordinal entre os índices de inconsistência e o erro do vetor de prioridades permanece distante da unidade, com matrizes consistentes que produzem erro de estimação e matrizes menos consistentes com estimativas mais precisas. A inconsistência depende das propriedades da tarefa. Bozóki *et al.* (2013), em experimento com 454 matrizes obtidas de 227 decisores, encontram inconsistência sistematicamente maior em tarefas subjetivas do que em objetivas e crescente com a ordem da matriz, sem efeito da ordem de apresentação das perguntas.

A aplicação do AHP a decisões em grupo requer a definição prévia da forma de combinar os julgamentos dos participantes. Forman e Peniwati (1998) distinguem a agregação dos julgamentos individuais, denominada AIJ, da agregação das prioridades individuais, denominada AIP, e associam a primeira ao grupo que atua como unidade decisória e a segunda ao conjunto de indivíduos que preservam preferências próprias. No procedimento AIJ, a média

geométrica dos julgamentos é a operação que preserva a reciprocidade das matrizes consolidadas. Na decisão em grupo, a medida de consistência compreende dois subproblemas, a consistência de cada matriz individual e o consenso entre os participantes (Dong *et al.*, 2010).

A consistência do resultado agregado foi examinada por duas vias. Escobar, Aguarón e Moreno-Jiménez (2004) demonstram que, na priorização pela média geométrica das linhas e com o índice de consistência geométrica como medida, a inconsistência do grupo não supera a maior inconsistência individual, e concluem que julgamentos individuais aceitáveis produzem julgamento de grupo aceitável. Para o método do autovetor e a razão de consistência, Aull-Hyde, Erdogan e Duke (2006) verificaram por simulação de Monte Carlo que a agregação pela média geométrica conduz a matriz consolidada à consistência à medida que o grupo cresce, mesmo quando as matrizes individuais são inconsistentes, e determinaram os tamanhos de grupo a partir dos quais essa condição se verificou, quarenta respondentes em matrizes 4×4 e vinte e cinco em matrizes 5×5.

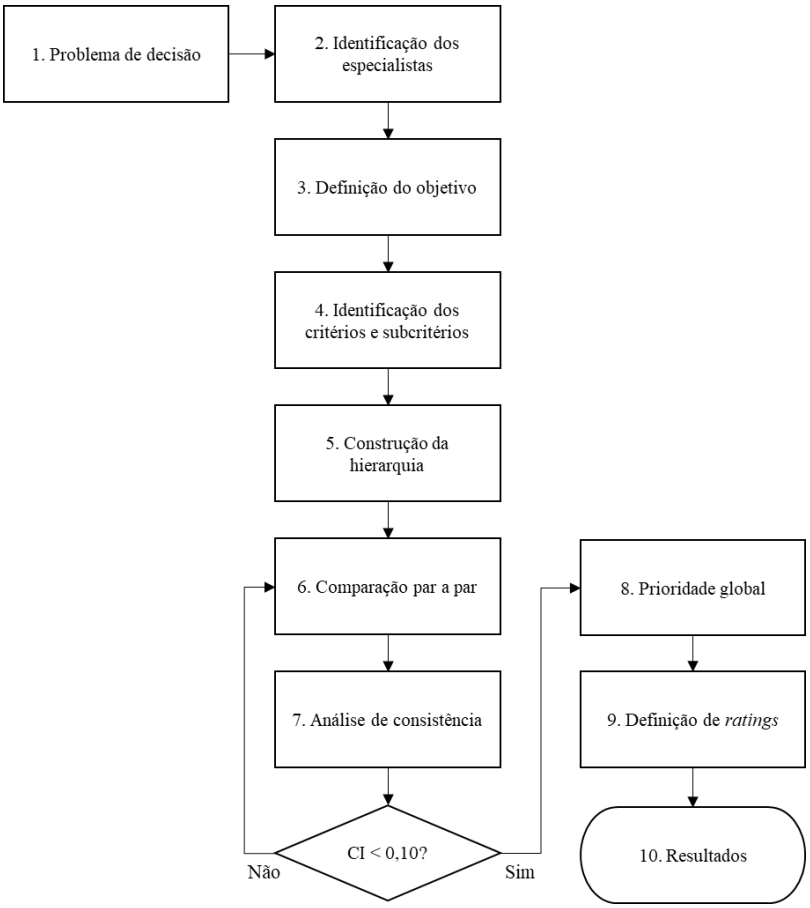
O consenso entre os participantes é aferido pelo teste de dispersão de Saaty e Vargas (2007), que calcula a dispersão geométrica dos julgamentos de cada comparação em torno da média geométrica e a compara com a distribuição da dispersão de julgamentos aleatórios na escala fundamental. Para comparações de dispersão elevada, os autores recomendam a discussão adicional dos julgamentos ou a divisão do grupo em subgrupos homogêneos, e observam que a média geométrica não suprime a subjetividade dos julgamentos nem valida matrizes inconsistentes.

A preferência pelo AHP em relação a outros métodos de MCDM justifica-se por sua fundamentação matemática e pelo escrutínio a que o método foi submetido desde sua proposição, com respostas publicadas às principais críticas dirigidas a ele. O AHP é particularmente vantajoso por integrar fatores qualitativos e quantitativos e por acomodar a imprecisão e a ambiguidade frequentes nas avaliações humanas (Garuti *et al.*, 2008; Saaty; Vargas; Whitaker, 2009; Salomon; Gomes, 2024).

Saaty, Vargas e Whitaker (2009) classificam essas críticas em cinco categorias e reúnem as respostas publicadas a cada uma. A primeira é a reversão de ordem decorrente da inclusão ou da exclusão de alternativas e de critérios, respondida pela distinção entre os modos distributivo e ideal, o segundo dos quais preserva a ordenação quando a unicidade da alternativa preferida não é relevante. A segunda reúne o tratamento de julgamentos inconsistentes e suas implicações sobre a otimalidade de Pareto na agregação em grupo e sobre a condição de preservação da ordem, respondida com o argumento de que a admissão de alguma intransitividade permite tratar a decisão de forma realista em lugar de axiomaticamente

truncada. A terceira é a derivação de prioridades e a síntese multiplicativa pela média geométrica, cuja aplicação a matrizes inconsistentes não captura a transitividade de dominância de ordem superior. A quarta é a alteração da escala fundamental de 1 a 9, proposta sem demonstração de melhoria nem exemplos de validação. A quinta é o caráter comportamental dos axiomas de comparação pareada, respondida pela distinção entre julgamento comparativo e julgamento absoluto formulada na literatura de psicologia cognitiva. A Figura 7 apresenta o fluxo de aplicação do AHP.

Figura 7 – Fluxo de aplicação do AHP



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A representação dos julgamentos por números difusos é alternativa recorrente na literatura para a imprecisão das comparações verbais. Saaty (2006) sustenta que a representação numérica dos julgamentos no AHP já constitui aproximação da intensidade de resposta, e não valor exato, e que acrescentar imprecisão à escala não produz resultado mais válido. Ahmed e Kilic (2024) submeteram a controvérsia a verificação com 2.400 matrizes simuladas e dois experimentos com 318 participantes em tarefas de valores verdadeiros conhecidos, e

verificaram que o autovetor e os mínimos quadrados logarítmicos superaram os três métodos difusos comparados em todas as condições, exceto no menor grau de fuzzificação, com a ressalva de que a conclusão não é definitiva. Salomon e Gomes (2024) notam que a mensuração da consistência em modelos híbridos entre o AHP e a teoria dos conjuntos difusos permanece sem estudo. A representação pontual dos julgamentos foi mantida nesta pesquisa, e a distribuição da consistência observada no painel é reportada na Seção 4.2.

2.3.2 Modelo BOCR e métodos de síntese

O modelo BOCR é uma abordagem de apoio à decisão multicritério que fornece uma análise abrangente de alternativas, ao considerar aspectos positivos e negativos. É uma extensão do AHP e do ANP, desenvolvidos por Thomas L. Saaty, e é utilizada em áreas como negócios, engenharia e ciências sociais (Demirtas; Üstün, 2008; Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023; Wijnmalen, 2007).

A análise tradicional de benefício-custo compara apenas ganhos e despesas imediatos. O modelo BOCR considera também oportunidades, benefícios futuros e potenciais e riscos, perdas ou ameaças futuros. Constitui, assim, uma estrutura orientada aos princípios de exclusividade mútua e exaustividade coletiva (MECE), adequada à modelagem de decisões complexas em ambientes incertos, como os investimentos em tecnologias da I4.0 (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023).

A adoção do AHP-BOCR para apoiar a decisão de investimentos em I4.0 justifica-se porque a decomposição do problema em uma hierarquia orientada aos princípios MECE promove a contemplação simultânea de benefícios, oportunidades, custos e riscos e busca evitar redundâncias e omissões na análise (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023). A exceção deliberada a esse princípio, assumida neste estudo para o subcritério Payback, é justificada na Seção 3.4.1. Essa estrutura, aliada às comparações pareadas e à estimação de autovetores do AHP, confere rastreabilidade e rigor matemático às prioridades, e permite incorporar prioridades positivas, nulas ou negativas, que refletem *trade-offs* característicos de projetos I4.0, como ganhos de flexibilidade frente a ameaças de cibersegurança (Saaty; Ozdemir, 2003). O modelo facilita as fases de estruturação, mensuração e síntese e admite diferentes formas de agregação das prioridades, com maior aderência a cenários de incerteza típicos de tecnologias emergentes (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023; Tramarico *et al.*, 2015). O BOCR organiza a tomada de decisão em quatro categorias, apresentadas no Quadro 4.

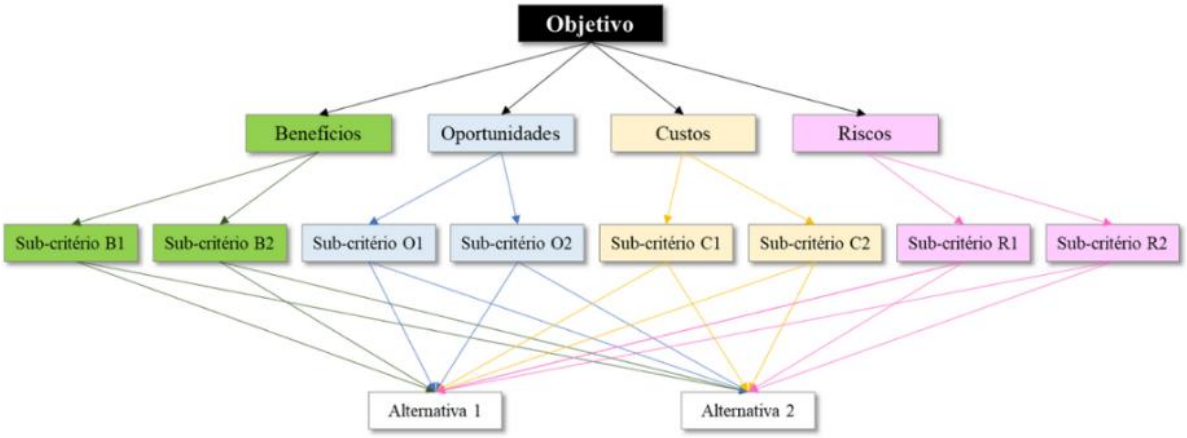
Quadro 4 – Benefícios, oportunidades, custos e riscos

Categoria	Definição
Benefícios (B)	Representam ganhos diretos e tangíveis obtidos pela decisão
Oportunidades (O)	Captam efeitos positivos ainda potenciais, como inovações ou expansão de mercado
Custos (C)	Refere-se a custos imediatos e tangíveis, financeiros ou operacionais
Riscos (R)	Refletem perdas esperadas oriundas de incertezas adversas, como volatilidade de mercado ou falhas tecnológicas

Fonte: Petrillo, Salomon e Tramarico (2023).

A estrutura do modelo pode ser representada por uma hierarquia ou por uma rede. No nível superior estão os quatro méritos, desdobrados em subcritérios específicos para cada contexto de decisão, e as alternativas são avaliadas em relação a cada subcritério, o que permite sintetizar as prioridades (Tramarico *et al.*, 2012; Wijnmalen, 2007). A Figura 8 ilustra a configuração genérica em quatro níveis, objetivo, méritos BOCR, subcritérios e alternativas, e admite hierarquias incompletas quando algum mérito não é pertinente.

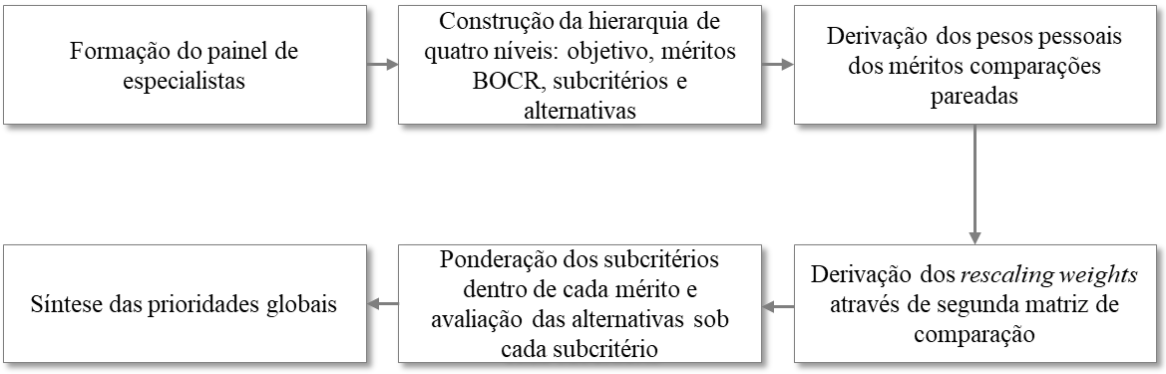
Figura 8 – Estrutura hierárquica de modelo BOCR



Fonte: Adaptado de Wijnmalen (2007) e de Petrillo, Salomon e Tramarico (2023).

A validade dessa estrutura pressupõe o axioma de independência do AHP, segundo o qual os elementos de um mesmo nível hierárquico devem ser avaliados de forma autônoma, sem subordinação mútua ou influência direta entre si, condição satisfeita pela estrutura MECE adotada (Saaty, 1986). As etapas operacionais do modelo AHP-BOCR podem ser descritas em seis passos, apresentados na Figura 9 (Lee; Chen; Kang, 2009; Wijnmalen, 2007).

Figura 9 – Etapas operacionais do modelo AHP-BOCR



Fonte: Adaptado de Wijnmalen (2007).

Para cada critério, as alternativas são comparadas por meio de matrizes de comparação par a par A = [a_{ij}], em que a_{ij} é a importância de i em relação a j, e o vetor de prioridades w é o autovetor correspondente ao maior autovalor de A, obtido conforme a Equação 1. Também podem ser utilizadas escalas de rating para ajustar os pesos dos méritos à estratégia da organização (Demirtas; Üstün, 2008; Wijnmalen, 2007).

Obtidas as prioridades compostas B, O, C e R de cada alternativa i, diferentes expressões podem ser empregadas para o score global. A literatura consolida cinco formulações padrão de síntese BOCR: aditiva, aditiva probabilística, subtrativa, multiplicativa de potências e multiplicativa simples (Saaty; Ozdemir, 2003; Wijnmalen, 2007), aplicadas em estudos empíricos (Lee, 2009b; Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023; Üstün; Demirtas, 2008). Em ambiente de I4.0, Cafasso *et al.* (2020) compararam as cinco formulações na seleção de tecnologias de simulação para a manufatura, com pesos dos méritos fixados por convenção e variados em cenários discretos. Nas Equações 4 a 7, b, o, c e r são os pesos pessoais normalizados dos méritos:

$$x = b \times B + o \times O - c \times C - r \times R \tag{4}$$

$$x = b \times B + o \times O + c \left(\frac{1}{C}\right) + r \left(\frac{1}{R}\right) \tag{5}$$

$$x = b \times B + o \times O + c\,(1 - C) + r\,(1 - R) \tag{6}$$

$$x = \frac{B^b \times O^o}{C^c \times R^r} \tag{7}$$

As Equações 4 a 7 diferem no tratamento de custos e de riscos. A Equação 4, forma subtrativa, incorpora custos e riscos como prioridades negativas e admite scores totais negativos, núcleo da proposição de prioridades negativas de Saaty e Ozdemir (2003). A Equação 5, forma aditiva, aplica os recíprocos e converte altos custos e riscos em baixos scores. A Equação 6, forma aditiva probabilística, utiliza valores complementares $(1 - C)$ e $(1 - R)$ e foi adotada por Demirtas e Üstün (2008) na seleção de fornecedores. A Equação 7, forma multiplicativa de potências, expressa a razão entre méritos positivos e negativos, discutida criticamente por Wijnmalen (2007). A Equação 7 reproduz a forma de quociente apresentada por Wijnmalen (2007), com as prioridades de Custos e Riscos no denominador. Parte da literatura apresenta a mesma formulação com os recíprocos normalizados desses méritos como fatores (Lee, 2009b), variante não adotada nesta pesquisa. Wijnmalen (2007) desaconselha o tratamento de custos e riscos por recíprocos, procedimento que distorce a escala comum das prioridades. A normalização dos recíprocos multiplica todas as alternativas por uma constante comum, preserva a ordenação e desloca o ponto de equilíbrio unitário.

Conforme demonstra Wijnmalen (2007), nenhuma das formulações tradicionais das Equações 4 a 7 incorpora simultaneamente os pesos pessoais dos méritos, derivados da hierarquia de controle, e os *rescaling weights*, que asseguram a comensurabilidade entre escalas de mensuração distintas. Essa limitação é relevante em decisões nas quais os scores de méritos positivos e negativos apresentam magnitudes absolutas distintas, condição frequente na avaliação de investimentos industriais. As formulações que incorporam *rescaling weights* e a respectiva escolha adotada nesta pesquisa são apresentadas no Capítulo 3.

2.4 CRITÉRIOS DE DECISÃO DE INVESTIMENTOS EM I4.0

Os critérios de decisão para investimentos em I4.0 identificados na literatura organizam-se segundo a estrutura BOCR e em três dimensões: competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade. Os benefícios, oportunidades, custos e riscos reportados em estudos recentes sustentam a definição dos vinte subcritérios do modelo de decisão proposto.

2.4.1 Benefícios associados à I4.0

O termo “benefício” é definido como o impacto positivo direto ou a vantagem imediata decorrente de uma decisão ou alternativa específica. Representa ganhos tangíveis ou intangíveis que são quase certos, como melhorias de processos ou de qualidade, ou aumento de

produtividade. No modelo BOCR, o benefício é avaliado em relação à capacidade de gerar resultados favoráveis no presente ou em um futuro previsível (Demirtas; Üstün, 2008; Wijnmalen, 2007).

O Quadro 5 apresenta os benefícios da I4.0 nas dimensões de competitividade, sociotécnicas e de sustentabilidade identificadas na literatura.

Quadro 5 – Benefícios da I4.0

Dimensões	Benefícios	Descrição	Referências
Competitividade	Eficiência e Produtividade	A implementação de sistemas ciberfísicos e automação avançada permite o monitoramento em tempo real e otimização dos processos, reduzindo desperdícios e tempo de produção	Lee, Bagheri e Kao (2015) Frank, Dalenogare e Ayala (2019) Xu, Xu e Li (2018) Zhong *et al.* (2017) Lu (2017) Dalenogare *et al.* (2018) Enrique *et al.* (2023)
	Qualidade	Controle de qualidade mais rigoroso e em tempo real, resulta em produtos de melhor qualidade e aumento de valor de produto	Lee, Bagheri e Kao (2015) Frank, Dalenogare e Ayala (2019) Lu (2017) Zhong *et al.* (2017) Enrique *et al.* (2023)
Sociotécnicas	Ergonomia, saúde e segurança ocupacional	A automação inteligente alivia os trabalhadores de tarefas repetitivas e fisicamente exaustivas, promovendo maior segurança, saúde e redução de riscos no ambiente de trabalho.	Almeida *et al.* (2023) Sony e Naik (2020) Müller, Kiel e Voigt (2018)
Sustentabilidade	Redução de emissões	Tecnologias da I4.0, ajudam a minimizar emissões de gases de efeito estufa	Beltrami *et al.* (2021) Ghobakhloo (2020)
	Conservação de recursos	Sistemas inteligentes otimizam o consumo de energia, permitindo maior eficiência em processos industriais	Beltrami *et al.* (2021) Bai *et al.* (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.4.2 Oportunidades associadas à I4.0

As oportunidades referem-se às possibilidades ou ganhos potenciais futuros que podem surgir como consequência indireta de uma decisão, muitas vezes associadas a condições externas ou a desenvolvimentos futuros favoráveis. Isso inclui perspectivas de mercado, sinergias futuras ou inovações tecnológicas que possam ser exploradas (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023; Wijnmalen, 2007).

O Quadro 6 apresenta as oportunidades geradas pela I4.0 nas dimensões da competitividade, da sociotécnica e de sustentabilidade, encontradas na literatura.

Quadro 6 – Oportunidades da I4.0

Dimensões	Oportunidades	Descrição	Referências
Competitividade	Transformação digital	A integração digital das operações oferece vantagem competitiva ao posicionar as empresas como pioneiras no uso de *smart factories*	Oztemel e Gursev (2020) Verhoef *et al.* (2021)
	Aumento da maturidade tecnológica	Maior prontidão tecnológica, expressa pela escala TRL, reduz o risco de integração na adoção e, por essa via, contribui para o desempenho competitivo	Mankins (1995) Bates e Clausen (2020)
Sociotécnicas	Melhoria do ambiente de trabalho	A valorização dos profissionais cresce com a demanda por habilidades analíticas, autonomia e resolução de problemas, tornando o ambiente de trabalho mais desafiador e gratificante	Marcon *et al.* (2022) Bednar e Welch (2020)
Sustentabilidade	Reforço da reputação corporativa	A implementação de práticas sustentáveis pode melhorar a percepção pública e a reputação da empresa	Beltrami *et al.* (2021) Kamble, Gunasekaran e Gawankar (2018)
	Apoio a certificações e *compliance*	Empresas que utilizam tecnologias da I4.0 para implementar práticas sustentáveis têm maior facilidade em obter certificações ambientais	Bai *et al.* (2020) Müller, Kiel e Voigt (2018)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.4.3 Custos associados à I4.0

Os custos são definidos como os recursos necessários ou as despesas envolvidas na implementação de uma decisão. Inclui aspectos monetários, como investimentos iniciais e custos operacionais, bem como esforços intangíveis, como o impacto ambiental e o tempo investido. No modelo BOCR, os custos são analisados tanto como valores monetários diretos quanto como consequências negativas garantidas (Demirtas; Üstün, 2008; Wijnmalen, 2007).

O Quadro 7 apresenta os custos gerados pela I4.0 nas dimensões de competitividade, sociotécnicas e de sustentabilidade encontradas na literatura.

Quadro 7 – Custos da I4.0

Dimensões	Custos	Descrição	Referências
Competitividade	Valor do investimento	A implementação de tecnologias requer investimentos significativos em infraestrutura e capital humano especializado	Frank, Dalenogare e Ayala (2019) Dalenogare *et al.* (2018) Almeida *et al.* (2023) Müller, Kiel e Voigt (2018) Marcon, Marodin e Frank (2024) Frank *et al.* (2025)
	Infraestrutura digital e custo de operação	Despesas associadas à integração de infraestruturas, como redes, depreciação e licenças.	Müller, Kiel e Voigt (2018) Kamble, Gunasekaran e Gawankar (2018)
	Payback	Rapidez com que o custo de um investimento é recuperado, mas não mede a lucratividade do investimento	Lefley (1996)
Sociotécnicas	Capacitação contínua e gestão do conhecimento	A constante evolução das tecnologias requer treinamentos frequentes, o que representa custos adicionais e esforços organizacionais para atualizar a força de trabalho	Almeida *et al.* (2023) Marcon *et al.* (2022) Abubakar *et al.* (2019) Muniz Jr. *et al.* (2024)
Sustentabilidade	Custos de descarte e conformidade regulatória	O descarte de resíduos eletrônicos em indústrias altamente digitalizadas implica altos custos operacionais, devido à necessidade de cumprir regulamentações ambientais rigorosas.	Beltrami *et al.* (2021) Ghobakhloo (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.4.4 Riscos associados à I4.0

O risco é definido como a probabilidade de ocorrência de eventos adversos ou de resultados incertos que podem comprometer o sucesso de uma decisão. Ele aborda os possíveis efeitos negativos futuros, considerando incertezas ou vulnerabilidades associadas a fatores internos ou externos (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023; Wijnmalen, 2007).

Os riscos na implementação da I4.0 na manufatura estão ligados à complexidade dos sistemas e à transformação tecnológica, afetando negativamente objetivos organizacionais, como a integração de novas tecnologias e as mudanças nos processos operacionais (Pasi; Mahajan; Rane, 2023).

O Quadro 8 apresenta os riscos associados à I4.0, nas dimensões de competitividade, sociotécnicas e de sustentabilidade, identificados na literatura.

Quadro 8 – Riscos da I4.0

Dimensões	Riscos	Descrição	Referências
Competitividade	Segurança cibernética	A alta conectividade das fábricas inteligentes amplia os riscos de ciberataques, comprometendo dados sensíveis e operações críticas	Lasi *et al.* (2014) Verhoef *et al.* (2021) Almeida *et al.* (2023) Bednar e Welch (2020) Marcon *et al.* (2022)
	Complexidade de integração	A implementação integrada de tecnologias é um desafio, especialmente em empresas de países emergentes com infraestrutura tecnológica limitada	Oztemel e Gursev (2020) Dalenogare *et al.* (2018)
	Dependência tecnológica	A integração de sistemas automatizados cria uma dependência excessiva de fornecedores e plataformas tecnológicas	Zhong *et al.* (2017) Dalenogare *et al.* (2018)
Sociotécnicas	Impactos sociais	A automação pode gerar desemprego estrutural em funções de baixa qualificação, exigindo políticas de reconversão profissional	Lu (2017) Xu; Xu e Li (2018) Muniz Jr. *et al.* (2025b)
Sustentabilidade	Aumento de resíduos eletrônicos	A evolução da I4.0 acelera a substituição de equipamentos, o que aumenta a geração de resíduos eletrônicos.	Muller; Kiel; Voigt (2018)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

3.1 MÉTODO DE PESQUISA

A definição do método de pesquisa considerou a natureza do problema investigado, o tipo de conhecimento produzido e a forma de interação do pesquisador com a organização. Na Engenharia de Produção, a escolha do método depende da natureza da pesquisa, da abordagem do problema, dos objetivos e dos procedimentos de investigação (Bertrand; Fransoo, 2002; Gil, 1991; Miguel *et al.*, 2018). O Quadro 9 apresenta a classificação metodológica desta dissertação.

Quadro 9 – Classificação da pesquisa

Categorias de pesquisa	Caracterização adotada nesta dissertação
Quanto à natureza	Aplicada
Quanto à abordagem	Qualitativa e Quantitativa
Quanto ao objetivo	Normativa
Quanto ao método	Pesquisa-ação e modelagem matemática

Fonte: Adaptado de Miguel (2018), Gil (1991) e Bertrand e Fransoo (2002).

Esta pesquisa é aplicada, já que parte de um problema específico da organização estudada, a necessidade de estruturar a avaliação de investimentos em tecnologias da I4.0. O estudo busca propor um modelo de apoio à decisão que gestores possam utilizar para comparar alternativas tecnológicas, considerando critérios associados à competitividade, sociotécnicos e ambientais. A pesquisa também possui caráter normativo. Não se limita a analisar uma situação existente, e propõe um procedimento para orientar a tomada de decisão.

A abordagem combina elementos qualitativos e quantitativos. A dimensão qualitativa está presente na compreensão do problema organizacional, na definição dos critérios de avaliação, na construção da estrutura hierárquica e na coleta de julgamentos de especialistas. Esses julgamentos expressam a percepção dos gestores sobre os benefícios, oportunidades, custos e riscos associados às alternativas avaliadas. A dimensão quantitativa ocorre no tratamento matemático desses julgamentos, por meio do AHP integrado ao modelo BOCR, e abrange o cálculo de prioridades, pesos dos critérios, índices de consistência, scores globais e análises de sensibilidade.

Quanto ao método, a pesquisa combina a pesquisa-ação e a modelagem matemática. A pesquisa-ação foi adotada porque o pesquisador participa diretamente do contexto

organizacional investigado e interage com os gestores envolvidos no problema. Esse método é adequado a estudos que buscam produzir conhecimento científico e, ao mesmo tempo, colaborar para a solução de um problema prático da organização (Coughlan; Coghlan, 2002; Miguel *et al.*, 2018; Thiollent, 2022). A aderência ao método verifica-se pelo cumprimento das cinco fases em um ciclo completo, detalhadas adiante nesta seção. O planejamento correspondeu ao diagnóstico da ausência de protocolo formal de priorização e à definição do campo de ação junto à direção industrial. A coleta de dados abrangeu o levantamento técnico das alternativas, a estimação paramétrica dos custos, a aplicação do instrumento de comparações pareadas ao painel de especialistas e a realimentação dos dados coletados. A análise e o planejamento de ações compreenderam o processamento das matrizes, a verificação de consistência e a síntese BOCR. A implementação consistiu na adoção do protocolo e da ferramenta computacional pela organização. A avaliação dos resultados ocorreu na sessão de devolutiva, com discussão das percepções dos participantes sobre a adequação do modelo, registrada pelo pesquisador.

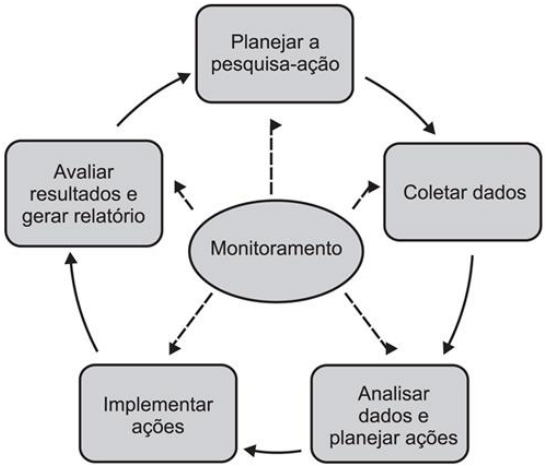
A modelagem matemática complementa a pesquisa-ação ao formalizar o problema decisório. A modelagem matemática, por sua vez, transforma os julgamentos dos especialistas em prioridades relativas, com base em uma estrutura multicritério. O modelo AHP-BOCR decompõe a decisão em méritos, critérios, subcritérios e alternativas, possibilitando a comparação sistemática entre tecnologias de I4.0.

A combinação entre pesquisa-ação e modelagem matemática é adequada ao problema investigado porque as decisões de investimento em tecnologias digitais não dependem apenas de indicadores financeiros. Essas decisões envolvem incertezas técnicas, riscos de implantação, impactos sobre as pessoas, ganhos operacionais, possibilidades futuras de aprendizado e efeitos sobre a sustentabilidade. O uso exclusivo de análises econômico-financeiras poderia limitar a avaliação das alternativas. O modelo multicritério, associado à interação com os gestores da organização, permite incorporar essas dimensões de forma mais explícita.

A pesquisa foi conduzida em uma organização industrial em que as decisões de investimento envolvem diferentes áreas, níveis hierárquicos e critérios de avaliação. A ausência de um protocolo formal para priorização de tecnologias da I4.0 caracterizou o problema prático que motivou o estudo. A pesquisa-ação foi utilizada para aproximar o desenvolvimento do modelo às necessidades da empresa, e o AHP-BOCR forneceu o procedimento de cálculo e de síntese das preferências.

A condução da pesquisa-ação organizou-se em cinco fases por ciclo, sob monitoramento constante, a saber, planejamento, coleta de dados, análise e planejamento de ações, implementação e avaliação dos resultados (Miguel *et al.*, 2018). Deriva o esquema do ciclo de referência da pesquisa-ação, no qual a compreensão do contexto e do propósito antecede a coleta e a análise dos dados, o planejamento e a implementação das ações e a avaliação dos resultados, sob monitoramento contínuo (Coughlan; Coghlan, 2002; Thiollent, 2022; Westbrook, 1995). A ação implementada nesta pesquisa é o próprio protocolo de avaliação de investimentos, adotado pela organização em substituição à prática anterior, e não a instalação da tecnologia priorizada. A implantação física da alternativa recomendada pertence ao ciclo de investimento da empresa e situa-se fora do escopo definido na Seção 1.2.1. A Figura 10 apresenta a estruturação adotada para a condução da pesquisa-ação.

Figura 10 – Estruturação para condução da pesquisa-ação



Fonte: Miguel *et al.* (2018) e Coughlan e Coghlan (2002).

O ciclo completo desdobra-se em sete etapas relacionadas aos objetivos específicos da dissertação (Figura 11). As etapas 1 e 2 correspondem ao diagnóstico organizacional e à definição da estrutura conceitual-teórica, na qual o mapeamento da literatura sustenta a escolha do AHP-BOCR e dos critérios de decisão, e atendem aos objetivos específicos (a) e (b). As etapas 3 a 7 compreendem a definição da unidade de análise, a coleta dos julgamentos dos gestores pelo sistema web, a análise das matrizes para geração do ranking das alternativas, a implementação da decisão e a avaliação dos resultados, da consistência e da robustez do método, e cumprem o objetivo específico (c). A Seção 3.4 detalha as etapas.

Figura 11 – Fases, etapas e atividades para condução da pesquisa-ação



Fonte: Miguel *et al.* (2018).

Após o processamento das matrizes, os resultados foram avaliados por meio dos índices de consistência, dos pesos obtidos, da síntese BOCR e da análise de sensibilidade. Os resultados foram apresentados em sessão de devolutiva realizada em 2 de junho de 2026, com a alta direção da empresa, composta pelo presidente e pelos vice-presidentes de operações e administrativo, e com os integrantes do painel. A sessão discutiu a coerência do ranking, a adequação dos critérios e a aplicabilidade prática do modelo. A recepção foi favorável, com registro, pela presidência, de que métodos estruturados de decisão semelhantes são adotados por empresas concorrentes do setor. Essa etapa de devolutiva é constitutiva da pesquisa-ação, ao verificar se o conhecimento produzido é reconhecido como útil pelos atores organizacionais envolvidos (Coughlan; Coghlan, 2002; Thiollent, 2022).

A pesquisa envolveu exclusivamente a coleta de julgamentos profissionais de gestores adultos sobre alternativas tecnológicas, sem dados pessoais sensíveis. Antes de iniciar os julgamentos, cada respondente teve acesso ao Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, que apresentou os objetivos e os procedimentos da pesquisa, a natureza paramétrica dos dados financeiros, o caráter voluntário da participação, a garantia de confidencialidade e de não

identificação nominal na divulgação dos resultados e o direito de desistir a qualquer momento. O acesso ao instrumento foi condicionado ao aceite expresso do termo, registrado pelo sistema.

A pesquisa integra o projeto Diretrizes para aplicação do Analytic Hierarchy Process na gestão da cadeia de suprimentos e na gestão da energia, sob responsabilidade do Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon, e observa o Plano de Gestão de Dados aprovado pela FAPESP. Em atendimento à Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018), o plano prevê medidas de proteção da identidade e da confidencialidade dos dados coletados de pessoas físicas e jurídicas, a apresentação das opiniões e da caracterização profissional dos especialistas sem identificação nominal dos participantes ou de suas organizações e a designação dos respondentes por siglas. A autenticação individual no sistema serviu ao controle de acesso e à rastreabilidade dos julgamentos, e os respondentes foram designados por R1 a R12 na análise e na divulgação dos resultados. A montadora não é nominada, e a caracterização do painel consta da Tabela 3 em categorias agregadas, de forma a preservar a identidade dos participantes na divulgação dos resultados.

Durante a elaboração do trabalho, ferramentas de IA foram utilizadas em duas frentes. Na construção do sistema web, o modelo de linguagem Claude (Anthropic) atuou como assistente de programação no desenvolvimento e na depuração do código, com validação independente dos algoritmos por meio do microserviço AhpAnpLib (Seção 3.4.2.1). Na produção do texto, as ferramentas ChatGPT (OpenAI), Claude (Anthropic), Grammarly e Scopus AI apoiaram a revisão de literatura, a revisão textual e a verificação de coerência. Todas as ideias, análises, interpretações e conclusões são de autoria própria. As ferramentas serviram exclusivamente como apoio técnico e editorial, sem autonomia decisória quanto ao conteúdo científico.

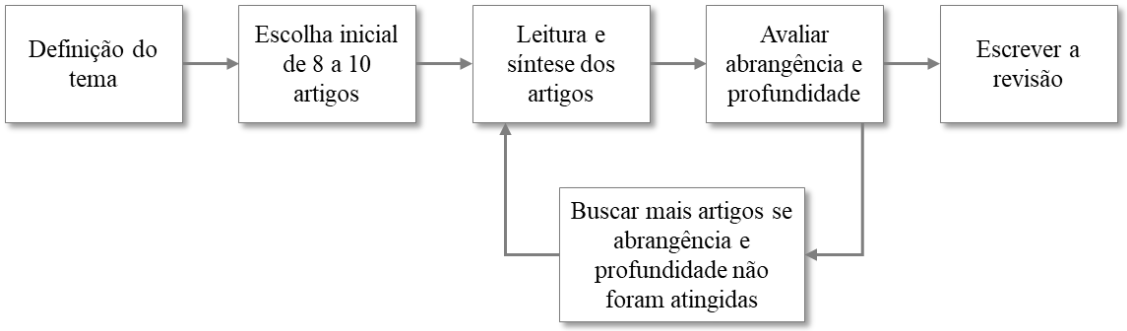
O delineamento metodológico adotado articula a intervenção organizacional à formalização matemática. A pesquisa-ação sustenta a construção do modelo a partir de um problema real, e a modelagem AHP-BOCR confere rigor ao tratamento dos julgamentos e à priorização das alternativas.

3.2 MÉTODO DE REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura teve como objetivo estabelecer o referencial teórico, identificar lacunas de pesquisa e definir os conceitos-chave relativos à decisão de investimentos em tecnologias da I4.0. A revisão foi conduzida por meio de análise crítica, uma abordagem que permite identificar e avaliar criticamente pesquisas relevantes e analisar os dados de forma

sistemática, transparente e reproduzível (Nakano; Muniz Jr., 2018; Snyder, 2019). A Figura 12 apresenta o procedimento adotado.

Figura 12 – Passos da revisão teórica de literatura



Fonte: Adaptado de Nakano e Muniz (2018).

A revisão organizou-se em duas frentes, distintas quanto ao procedimento de busca e quanto ao tratamento aplicado ao material. A primeira mapeou o estado da arte sobre decisão multicritério aplicada a investimentos em I4.0 e sustentou a escolha do AHP-BOCR, com busca sistemática em base de dados e relato do fluxo pelo protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). A segunda identificou os critérios de decisão que compõem o modelo e atendeu ao objetivo específico (a), com constituição de *corpus* por busca complementar e por *snowballing*, e com tratamento do material por análise de conteúdo. A análise crítica é a abordagem que enquadra as duas frentes e orienta a avaliação do material em ambas, e o PRISMA é protocolo de relato do fluxo de informações, sem substituir essa avaliação. No fluxo de pesquisa, a primeira frente integra a atividade 1.4 da Etapa 1 e a segunda corresponde à atividade 1.5.

A primeira frente adotou o protocolo PRISMA no que se refere ao fluxo de informações de revisões sistemáticas, aplicável a disciplinas que demandam revisões estruturadas, e foi conduzida em três fases, a saber, identificação, triagem e inclusão, conforme a versão atualizada do instrumento (Page *et al.*, 2021). Na identificação, foram estabelecidos cinco grupos de palavras-chave, definidos de modo a eliminar resultados irrelevantes e, ao mesmo tempo, assegurar uma abrangência suficiente na busca (Kitchenham *et al.*, 2009; Petticrew; Roberts, 2006). O Quadro 10 apresenta os termos de busca utilizados.

Quadro 10 – Grupos de palavras-chave utilizados na revisão teórica

Relação com o tema da pesquisa	Palavras-chave
Relacionados à decisão de investimentos	*(“investment” and “decision”) or (“capital” and “allocation”) or (“acquisition”) or (“investment” and “allocation”) or (“investment” and “assessment”) or (“investment” and “appraisal”)*
Relacionados à I4.0	*("industr* 4.0") or ("manufactur* of the future") or ("future manufactur*") or ("advanced manufactur*") or ("advanced manufactur* technolog*") or ("smart factor*") or ("smart manufactur*") or ("digitalizat*") or ("digitalisat*") or ("I4.0") or ("digital transformation") or (“digitisat*”)*
Relacionados à MCDM	*("multi-criteria" and "decision" and "analysis") or ("multi-criteria" and "decision" and "making") or ("multiple-criteria" and "decision" and "making") or (“multiple” and “criteria” and “analysis”) or "mcda" or "mcdm"*
Relacionados à AHP	*(“ahp”) or (“analytic hierarchy process”)*
Relacionados à BOCR	*“bocr” or ("benefits" and "opportunities" and "costs" and "risks")*

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A busca foi realizada na base de dados Scopus, reconhecida por sua abrangência e recomendada para revisões sistemáticas (Burnham, 2006; Oliveira *et al.*, 2018). Embora a Web of Science e a Scopus apresentem conteúdos semelhantes, optou-se por uma única base de dados para assegurar consistência metodológica e manter o escopo gerenciável, condição alinhada a revisões com questões de pesquisa específicas (Mongeon; Paul-Hus, 2016; Snyder, 2019).

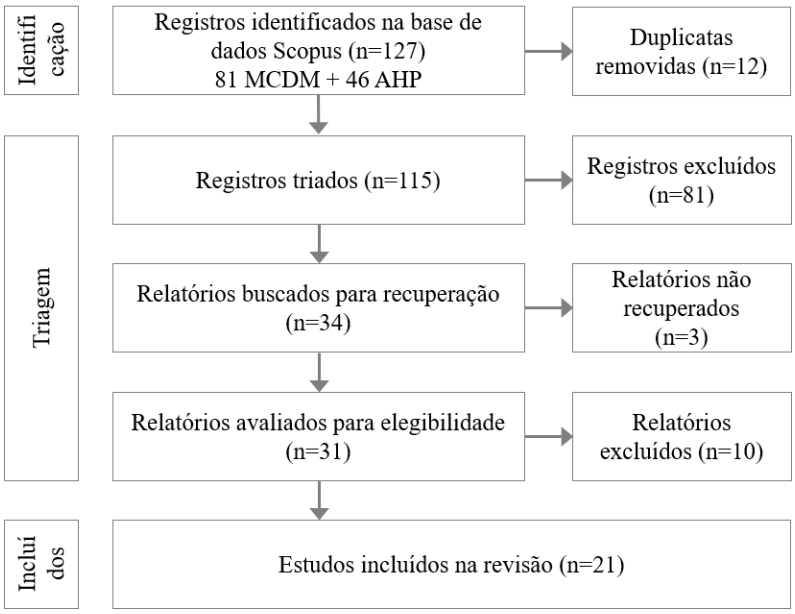
A busca foi conduzida em duas expressões independentes. A primeira combinou os grupos de decisão de investimentos, de I4.0 e de MCDM, e recuperou 81 registros. A segunda combinou os grupos de decisão de investimentos, de I4.0 e de AHP, e recuperou 46 registros. Os dois totais já consideram os critérios de seleção descritos adiante. Os conjuntos assim delimitados compartilhavam 12 registros, quantidade removida por duplicidade antes da triagem. A diferença decorre da prática de indexação. Parte da literatura que aplica o AHP não emprega termos de MCDM entre as palavras-chave, e trata o método como abordagem própria, sem referência à família de métodos à qual pertence. A expressão conjuntiva única excluiria, por construção, os estudos assim indexados. Com duas expressões independentes e posterior remoção das duplicatas, preserva-se a cobertura das duas designações. Um terceiro conjunto de termos, relativo à estrutura BOCR, foi aplicado em busca específica.

Para delimitar os conjuntos de registros das buscas, aplicaram-se três filtros de seleção. O primeiro foi o tipo de documento, restrito a artigos e revisões. O segundo foi o

idioma, restrito ao inglês. O terceiro foi o recorte temporal, com inclusão de documentos publicados até dezembro de 2025, sem delimitação de período inicial. Os registros aprovados nesses critérios passaram por leitura de títulos e resumos quanto à aderência à questão de pesquisa. Os registros remanescentes tiveram os textos completos buscados para recuperação e, quando obtidos, avaliados quanto à elegibilidade mediante leitura integral. A avaliação de elegibilidade excluiu os estudos nos quais o método multicritério não é aplicado à decisão de investimento, apesar do enquadramento sugerido no resumo.

As duas expressões de busca identificaram 127 registros na soma, dos quais 12 foram removidos por duplicidade antes da triagem. Dos 115 registros triados, 81 foram excluídos pela leitura de títulos e resumos e 34 tiveram os textos completos buscados para recuperação, sendo 3 não recuperados. Dos 31 relatórios avaliados quanto à elegibilidade, 10 foram excluídos por não aplicarem o método multicritério à decisão de investimento e 21 foram incluídos para compor a base teórica deste estudo. A busca específica pelo BOCR não recuperou documentos que aplicassem essa estrutura ao apoio à decisão de investimentos em I4.0, nos limites dos termos definidos no Quadro 10. A Figura 13 apresenta o fluxo das três fases.

Figura 13 – Fluxo das fases da revisão da literatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os vinte e um documentos incluídos formam a base sobre a qual a Seção 2.2 discute as aplicações de MCDM a investimentos em I4.0 e delimita a lacuna que motiva esta pesquisa. A busca sistemática teve por finalidade delimitar esse estado da arte e não constitui o referencial

completo da dissertação. Os fundamentos matemáticos do AHP e da estrutura BOCR, as fontes do contexto setorial e as fontes metodológicas foram identificados fora do protocolo de busca e não são contabilizados no fluxo apresentado. A literatura que caracteriza os critérios de decisão recebeu tratamento próprio, descrito a seguir.

A segunda frente constituiu *corpus* próprio para a identificação dos critérios de decisão. O conjunto tem como ponto de partida Almeida *et al.* (2023), documento incluído na busca sistemática, e foi ampliado por duas operações. A primeira consistiu em buscas complementares na base Scopus, orientadas por palavras-chave que relacionam a I4.0 à competitividade, aos aspectos sociotécnicos e à sustentabilidade, apresentadas no Quadro 11. A segunda consistiu em *snowballing* regressivo (*backward snowballing*), técnica que percorre a lista de referências de um documento para identificar novos trabalhos, em contraste com o *snowballing* progressivo, que percorre as citações recebidas (Wohlin, 2014). A varredura foi aplicada em passagem única sobre as referências de Almeida *et al.* (2023), sem as iterações sucessivas previstas no procedimento completo. Por depender dos resultados da busca sistemática, a segunda frente foi conduzida após o encerramento daquela. O *corpus* da análise de conteúdo foi fechado na consolidação da matriz hierárquica, em março de 2026, sem delimitação de período inicial, e reúne vinte e sete obras. A busca complementar prosseguiu até junho de 2026 apenas para atualização do referencial teórico das Seções 2.1.1 a 2.1.3, sem alteração da matriz, já consolidada e submetida ao painel de especialistas em maio de 2026. A constituição observou as regras de homogeneidade e de pertinência, segundo as quais os documentos retidos devem obedecer a critérios precisos de escolha e corresponder ao objetivo que suscita a análise (Bardin, 2016).

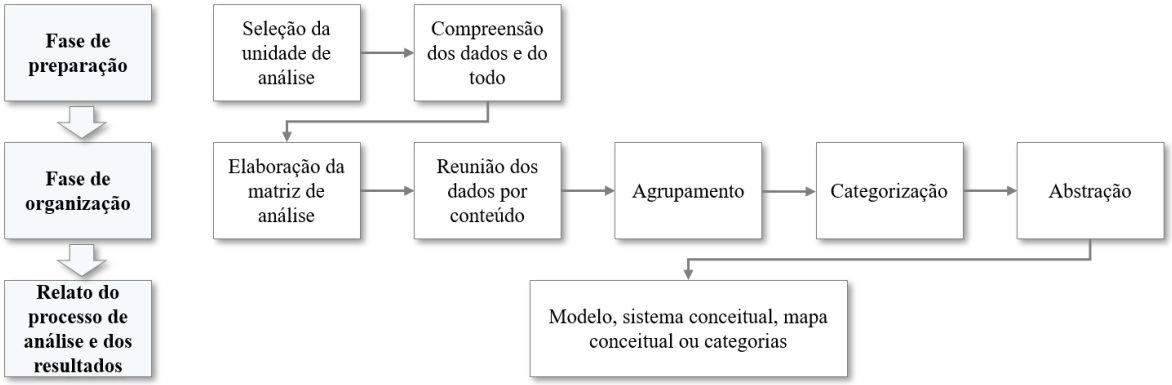
Quadro 11 – Grupos de palavras-chave da busca complementar

Relação com o tema da pesquisa	Palavras-chave
Relacionados à competitividade	*(“competitiveness”) or (“competitive advantage”) or (“market position”) or (“business” and “performance”) or (“firm” and “performance”) or (“economic” and “competitiveness”)*
Relacionados aos aspectos sociotécnicos	*("sociotechnical" and “factor*”) or ("sociotechnical" and “system*”) or ("sociotechnical" and “approach*”) or ("social" and “factor*”) or ("human" and “factor*”)*
Relacionados à sustentabilidade	*(“sustainability”) or ("sustainable development") or ("environmental” and “sustainability") or ("sustainable” and “practices") or ("green” and “technology") or ("eco-friendly") or ("resource” and “efficiency")*

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O tratamento desse *corpus* seguiu a análise de conteúdo, organizada nos três polos cronológicos da pré-análise, da exploração do material e do tratamento dos resultados com inferência e interpretação (Bardin, 2016). O percurso adotado foi o dedutivo, adequado quando a estrutura da análise é operacionalizada a partir de conhecimento anterior (Elo; Kyngäs, 2008). A unidade de registro foi o tema, definido como o critério de decisão enunciado em cada documento, e as categorias iniciais foram derivadas da teoria antes da leitura do material, com definições operacionais estabelecidas a partir dela, procedimento característico da abordagem dirigida (Hsieh; Shannon, 2005). A Figura 14 apresenta as fases do processo.

Figura 14 – Processo de análise de conteúdo dedutiva com matriz não restrita



Fonte: Adaptado de Elo e Kyngäs (2008).

A matriz de análise combinou dois eixos definidos previamente. O primeiro reúne os quatro méritos da estrutura BOCR, com as definições operacionais apresentadas nas subseções da Seção 2.4. O segundo reúne as três perspectivas de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade, estabelecidas na Seção 2.1. A matriz resultante materializa-se nos Quadros 5 a 8 da Seção 2.4, nos quais cada quadro corresponde a um mérito e a coluna de dimensões distribui os critérios pelas três perspectivas. Trata-se do tipo denominado matriz de análise não restrita (*unconstrained matrix*), no qual as categorias são criadas dentro dos limites da matriz segundo princípios indutivos, e não fixadas previamente (Elo; Kyngäs, 2008). Os critérios identificados no *corpus* foram alocados nas células conforme o mérito e a perspectiva correspondentes, e as ocorrências convergentes em documentos distintos foram consolidadas em uma entrada única.

A abstração foi conduzida com dois parâmetros fixados por desenho. O primeiro limitou a cinco os critérios por mérito, para manter a hierarquia balanceada, com o mesmo número de comparações pareadas em cada nó e sem diluição dos pesos locais nos méritos mais

povoados. O segundo exigiu independência entre os critérios de um mesmo mérito, condição que orientou a seleção dos principais entre os identificados e cuja única exceção, o Payback, é registrada na Etapa 1. A independência foi verificada por triagem conceitual das definições operacionais dos critérios reunidos sob cada mérito, com exclusão dos que apresentaram sobreposição de conteúdo, e sem aplicação de teste formal de interdependência, como o DEMATEL empregado por Pakdel, Erol e Oztel (2025) na avaliação de desafios da transformação digital. Nenhum critério apresentou aderência a mais de uma célula da matriz, portanto a alocação não exigiu regra de desempate, e a sobreposição de efeitos entre perspectivas, discutida na Seção 4.7, refere-se à interpretação dos resultados e não à codificação. A codificação foi realizada pelo pesquisador e revisada pelo orientador, sem cálculo de concordância entre codificadores. Os vinte critérios resultantes constituem os subcritérios do modelo de decisão estruturado na Etapa 1 do procedimento metodológico.

Os produtos das duas frentes ocupam lugares distintos no Capítulo 2. A Seção 2.2 apresenta o estado da arte e a lacuna decorrentes da busca sistemática. Os Quadros 5 a 8, na Seção 2.4, apresentam os critérios decorrentes da análise de conteúdo.

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA AHP-BOCR

O modelo trata quatro fontes de incerteza por mecanismos distintos. A incerteza sobre os resultados futuros das alternativas é incorporada à própria estrutura hierárquica, por meio dos méritos Oportunidades e Riscos, que registram efeitos positivos potenciais e perdas esperadas em separado dos benefícios e dos custos tangíveis (Saaty; Ozdemir, 2003; Wijnmalen, 2007). A imprecisão inerente aos julgamentos verbais é atenuada pela agregação dos doze respondentes pela média geométrica, e a coerência interna de cada matriz é verificada pela razão de consistência, com a coesão dos julgamentos do painel examinada pelo teste de dispersão (Saaty, 1977; Saaty; Vargas, 2007). A incerteza sobre os pesos estratégicos atribuídos aos méritos é examinada pelos intervalos de estabilidade da análise de sensibilidade (Mareschal, 1988). A incerteza sobre a forma de agregar os quatro méritos em um score único é examinada pela concordância entre os cinco métodos de síntese implementados no sistema (Wijnmalen, 2007). A representação difusa dos julgamentos, que incide apenas sobre a segunda dessas fontes, é discutida na Seção 4.2.

A pesquisa adota a síntese subtrativa de Wijnmalen (2007), Equação 8, como método principal de agregação. A escolha em relação às formulações clássicas justifica-se por três razões. A forma subtrativa expressa o resultado em escala líquida, na qual o valor zero

indica equilíbrio entre contribuições ponderadas favoráveis e desfavoráveis, e valores negativos indicam saldo multicritério desfavorável, sem demonstrar inviabilidade econômica; corrige distorções de escala por meio dos *rescaling weights* e preserva diferenças cardinais entre alternativas com perfis de custo heterogêneos, condição presente em investimentos em I4.0, nos quais as alternativas diferem em *Capital Expenditure* (CAPEX) e em *Operating Expenditure* (OPEX) (Saaty; Ozdemir, 2003; Wijnmalen, 2007).

O problema de comensurabilidade decorre do fato de que cada sub-hierarquia BOCR gera prioridades locais normalizadas de forma independente. As prioridades das alternativas em cada mérito somam 1, mas suas magnitudes absolutas podem variar entre os méritos. Se duas alternativas são quase equivalentes em Custos, seus scores locais serão próximos, como 0,48 e 0,52, enquanto, em Benefícios, uma pode dominar amplamente a outra, como 0,80 e 0,20. Subtrair Custos de Benefícios sem ajuste de escala confere peso desproporcional ao mérito, com maior dispersão, e distorce o ranking final (Wijnmalen, 2007).

Os *rescaling weights* corrigem essa distorção ao expressar as magnitudes relativas dos quatro méritos e conduzir suas prioridades a uma unidade comum de mensuração (Wijnmalen, 2007). Neste estudo, são obtidos por comparações pareadas de magnitude entre os méritos, na matriz de Magnitude descrita na Seção 3.4, e aplicados de forma multiplicativa na fórmula de síntese, juntamente com os pesos pessoais. Nesta aplicação, os pesos de magnitude representam magnitudes percebidas pelo painel, e a ausência de ancoragem explícita ao referente de normalização limita a interpretação cardinal dos scores, conforme a Seção 5.3. O peso v reflete a importância relativa atribuída pelos decisores a cada mérito, notação que corresponde aos pesos b, o, c e r das Equações 4 a 7. O peso s é empregado para restabelecer a comparabilidade entre as escalas de mensuração antes da agregação:

$$Score_i = v_b \times s_b \times B_i + v_o \times s_o \times O_i - v_c \times s_c \times C_i - v_r \times s_r \times R_i \quad (8)$$

Wijnmalen (2007) propõe ainda uma forma quociente, que expressa a razão entre méritos positivos e negativos de modo análogo à análise custo-benefício clássica e permite a interpretação direta de um ponto de equilíbrio na unidade. Nessa forma, os *rescaling weights* entram como coeficientes, sem os pesos pessoais v:

$$x = \frac{(s_b \times B + s_o \times O)}{(s_c \times C + s_r \times R)} \quad (9)$$

A Equação 8 e a Equação 9 respondem a perguntas distintas. A Equação 8 fornece um valor líquido, ponderado pela importância que o painel atribui a cada mérito, e admite resultado negativo. A Equação 9 expressa a razão entre magnitudes reescalonadas de positivos e negativos, interpretável frente ao ponto de equilíbrio unitário. As duas não são equivalentes. A primeira indica o saldo líquido, e a segunda, a relação multicritério entre efeitos favoráveis e desfavoráveis.

A escolha da Equação 8 como formulação principal decorre da orientação da análise. Wijnmalen (2007) condiciona a expressão de síntese ao tipo de pergunta a ser respondida e recomenda a forma aditiva, com subtração das prioridades reescalonadas de Custos e Riscos, quando a análise se orienta ao valor líquido, e a forma quociente, com os *rescaling weights* como coeficientes, quando a análise se orienta à razão de retorno sobre o dispêndio. O autor demonstra que ambas as formas, aplicadas a prioridades reescalonadas, produzem a ordenação correta das alternativas e indicação válida de atratividade, com o ponto de equilíbrio situado no valor zero na forma líquida e no valor unitário na forma quociente. A opção entre as duas não é, portanto, questão de correção matemática, e sim de correspondência entre a fórmula e a decisão a ser tomada. Nesta aplicação, esses pontos de equilíbrio pertencem à escala multicritério e não equivalem ao equilíbrio de fluxos monetários nem demonstram, isoladamente, viabilidade financeira.

A decisão tratada nesta pesquisa é de valor líquido. Consiste na escolha entre duas alternativas tecnológicas mutuamente exclusivas destinadas ao mesmo ativo produtivo, e não na ordenação de uma carteira de projetos que concorrem por um orçamento comum. A questão pertinente ao decisor é qual alternativa apresenta o maior saldo entre efeitos favoráveis e desfavoráveis, e não qual apresenta o maior retorno por unidade de efeito desfavorável. A Equação 8 responde à primeira questão e é adotada como método principal de síntese.

Duas propriedades adicionais sustentam a adoção da Equação 8. A primeira é a linearidade nas prioridades e nos pesos, que permite decompor o score na parcela aportada por cada mérito e submeter os pesos estratégicos à análise de sensibilidade descrita a seguir. A segunda decorre da estrutura da Equação 9, que carrega apenas os *rescaling weights* e não os pesos pessoais v, e é invariante aos pesos estratégicos atribuídos pelo painel. A formulação quociente adotada não expressa a importância relativa conferida pelos decisores aos quatro méritos e não pode ser submetida à análise de sensibilidade sobre esses pesos. Wijnmalen (2007) apresenta variante do quociente que admite os pesos pessoais aplicados às prioridades reescalonadas, não adotada neste estudo porque cada formulação preserva o esquema de pesos

de sua fonte canônica, condição que permite empregar a Equação 9 como verificação independente da estrutura da fórmula e do esquema de ponderação.

A robustez da escolha pela Equação 8 é verificada *ex post* por meio da análise de concordância entre cinco métodos de síntese implementados no sistema: a forma subtrativa com *rescaling weights* (Equação 8), a forma quociente de Wijnmalen (Equação 9), a forma aditiva probabilística de Demirtas e Üstün (2008) e as formas multiplicativas de potências e simples (Lee, 2009b, 2009a; Saaty; Ozdemir, 2003). Cada formulação preserva o esquema de pesos de sua fonte. Os *rescaling weights* aparecem apenas nas formas de Wijnmalen (Equações 8 e 9), e o peso pessoal v aparece na forma subtrativa e nas formas clássicas aditiva e multiplicativa, conforme cada fórmula de origem o prescreve. A concordância entre os métodos avalia, portanto, a sensibilidade do ranking tanto à estrutura da fórmula quanto ao esquema de ponderação, conforme a recomendação de triangulação em estudos BOCR (Alizadeh *et al.*, 2020; Lee, 2009b, 2009a; Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023). O Quadro 13 da Seção 3.4.2.1 detalha as cinco formulações implementadas no sistema.

A robustez do ranking AHP-BOCR às variações nos pesos estratégicos atribuídos aos méritos é avaliada por análise de sensibilidade sobre os pesos. O procedimento varia o peso de um mérito por vez, redistribui proporcionalmente os pesos dos demais para que a soma permaneça unitária e verifica se a alternativa preferida, aquela de maior score, se mantém. A faixa de valores do peso na qual a alternativa preferida não se altera constitui o intervalo de estabilidade local desse peso; o limite dessa faixa, isto é, o menor afastamento do peso corrente a partir do qual a preferência se inverte, é registrado como ponto de reversão do ranking. Quando a preferência se mantém em toda a faixa admissível do peso, o ranking é classificado como robusto nesse mérito.

O conceito de intervalo de estabilidade de peso como instrumento de análise de sensibilidade foi introduzido por Mareschal (1988). A definição da menor variação relativa do peso capaz de reverter a ordenação das alternativas foi formalizada por Triantaphyllou e Sánchez (1997), e adotada por O'Shea *et al.* (2026). A redistribuição proporcional adotada nesta pesquisa segue a formulação de Karande, Zavadskas e Chakraborty (2016) e de O'Shea *et al.* (2026), adaptada de Mareschal (1988), e foi aplicada ao modelo BOCR por Yap e Nixon (2015) e Alizadeh *et al.* (2020). Para o valor testado w_j do peso de um mérito j, o peso ajustado w_i' de cada mérito não variado i, com $i \neq j$, é dado pela Equação 10:

$$w_i' = w_{i^0} \times \frac{(1-w_j)}{\sum_{k \neq j} w_k^0} \tag{10}$$

em que w_{i^0} é o peso original do mérito i e$\sum_{k\neq j} w_k^0$ é a soma dos pesos originais dos méritos não variados.

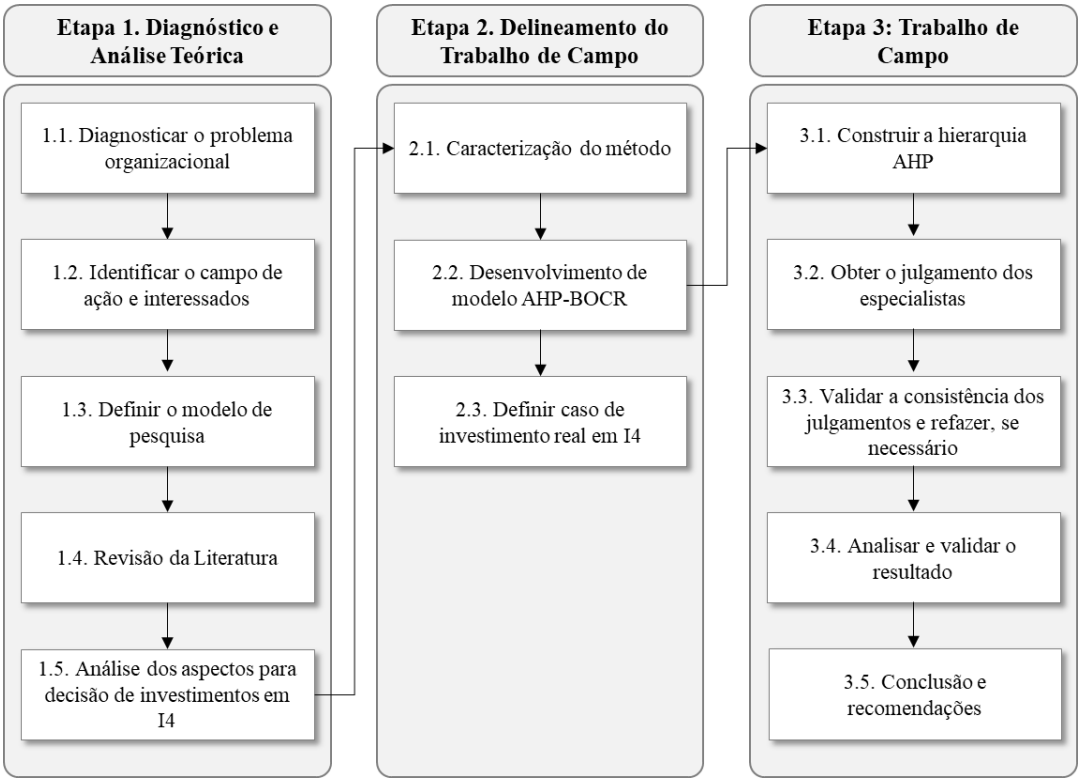
O peso de cada mérito é percorrido em incrementos de 0,01, ao longo de sua faixa admissível de 0 a 1, a partir do valor corrente, mantidos fixos os *rescaling weights* empregados para reescalonar as prioridades dos quatro méritos. Para cada valor da varredura, o score das alternativas é recalculado pela Equação 8 e a alternativa preferida é determinada; o menor afastamento entre o peso corrente e o valor em que a alternativa preferida muda define o ponto de reversão do ranking no mérito. O passo de discretização é parâmetro de implementação, sem correspondência na literatura, e não é atribuído a nenhuma fonte.

A varredura em resolução fina, que se aproxima de uma análise contínua do intervalo, difere da variação por perturbações fixas de cenário, na qual o peso é alterado apenas por percentuais predefinidos, como mais ou menos cinco, quinze ou cinquenta por cento, abordagem que examina somente pontos isolados da faixa (O'Shea *et al.*, 2026). Ao percorrer toda a faixa individual de cada peso, o procedimento permite aproximar eventual limite do intervalo de estabilidade, com resolução determinada pelo passo de 0,01. A abordagem corresponde à variação de um peso por vez (*one-at-a-time,* ou OAT), que é, por construção, unidimensional e não explora as combinações simultâneas dos quatro pesos no espaço de decisão completo, limitação inerente a esse tipo de análise (Karande; Zavadskas; Chakraborty, 2016; O'Shea *et al.*, 2026).

3.4 FLUXO E PROTOCOLO DE PESQUISA

A pesquisa emprega abordagem mista. A dimensão quantitativa utiliza o método AHP combinado ao modelo BOCR, fundamentado nos julgamentos dos gestores da empresa estudada, e a dimensão qualitativa analisa as implicações estratégicas dos resultados. O procedimento metodológico estrutura-se em três etapas, apresentadas na Figura 15: diagnóstico e análise teórica, que compreende a análise organizacional, a revisão da literatura e a identificação de critérios; delineamento do trabalho de campo, que desenvolve o modelo AHP-BOCR e define o caso de aplicação; e trabalho de campo, que implementa o modelo em contexto real e avalia suas implicações estratégicas.

Figura 15 – Etapas do procedimento metodológico adotado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.4.1 Etapa 1 – Diagnóstico e análise teórica

A primeira etapa construiu o arcabouço teórico e organizacional que sustenta a aplicação do modelo, por meio de cinco atividades sequenciais e interdependentes.

O diagnóstico organizacional (1.1) partiu da constatação de que a organização estudada não dispõe de protocolos estruturados para a priorização de investimentos em tecnologias de I4.0. As decisões correntes baseiam-se predominantemente em critérios financeiros, como retorno sobre o investimento, payback e valor presente líquido, sem incorporar de forma sistemática as dimensões sociotécnicas e de sustentabilidade que a literatura recente identifica como determinantes do sucesso de iniciativas de transformação digital na manufatura (Almeida *et al.*, 2023; Breque; De Nul; Petridis, 2021; Khan *et al.*, 2025). Essa lacuna compromete a capacidade da organização de comparar alternativas tecnológicas cujos benefícios e riscos se distribuem de forma heterogênea entre dimensões tangíveis e intangíveis, o que configura o problema de decisão multicritério que motiva a pesquisa.

A identificação do campo de ação e dos interessados (1.2) delimitou o escopo organizacional da investigação. Foram mapeadas as áreas funcionais diretamente envolvidas nos processos de investimento em tecnologia, como estamparia, solda, pintura, montagem,

qualidade e pesquisa e desenvolvimento. As áreas de finanças e compras foram incorporadas em razão de sua participação nos processos de aquisição e viabilidade econômica. Esse mapeamento orientou a definição dos critérios de decisão e a composição do painel de especialistas.

A definição do modelo de pesquisa (1.3) combinou a pesquisa-ação e a modelagem matemática, conforme a classificação apresentada no Quadro 9. A pesquisa-ação caracteriza-se pela intervenção deliberada do pesquisador no contexto organizacional, com o propósito simultâneo de produzir conhecimento acadêmico e resolver um problema prático (Coughlan; Coghlan, 2002; Thiollent, 2022). A modelagem matemática formaliza o problema decisório e transforma os julgamentos dos especialistas em prioridades relativas por meio do AHP integrado ao modelo BOCR (Bertrand; Fransoo, 2002; Miguel *et al.*, 2018). A articulação entre os dois métodos é adequada ao estudo porque o modelo de decisão desenvolvido não se limita a descrever o fenômeno, mas também propõe um instrumento operacional efetivamente utilizado pela organização para fundamentar a alocação de recursos em tecnologia.

A revisão da literatura (1.4) seguiu o procedimento descrito na Seção 3.2 e percorreu três eixos temáticos convergentes, as tecnologias da I4.0 e seus impactos no setor automotivo, os métodos de decisão multicritério aplicados a investimentos em tecnologia e o modelo AHP-BOCR com suas variantes de síntese. A análise sustentou a escolha do AHP e da extensão BOCR, que incorpora ganhos, oportunidades, dispêndios e incertezas não contemplados pelos modelos AHP convencionais (Palma; Bianco; Salomon, 2024; Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023).

A análise dos aspectos para a decisão de investimentos em I4.0 (1.5) consolidou os critérios identificados na literatura em uma estrutura hierárquica organizada em três dimensões: competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade. Cada dimensão foi desdobrada em subcritérios distribuídos entre os quatro méritos BOCR, resultando em vinte subcritérios que compõem o modelo de decisão (Quadros 5, 6, 7 e 8). A construção da estrutura observou o axioma de independência do AHP e buscou a autonomia entre os elementos de um mesmo nível hierárquico (Saaty, 1986). Registra-se uma exceção deliberada. O subcritério Payback guarda dependência funcional com o valor do investimento e com os custos de operação, por ser medida de desempenho que os combina aos benefícios econômicos. Sua manutenção como subcritério decorre da centralidade do tempo de retorno na prática decisória da empresa estudada e amplia a validade ecológica do modelo (Almeida *et al.*, 2023; Lefley, 1996), ao custo de sobreposição parcial com o subcritério de valor do investimento, delimitada e assumida. O axioma de independência incide sobre os elementos comparados entre si sob um

mesmo elemento superior, e não sobre a classificação por perspectivas, que atravessa os quatro méritos e não constitui nível da hierarquia. As três perspectivas não são mutuamente exclusivas, e um mesmo subcritério pode produzir efeitos alcançados por mais de uma delas, condição discutida na Seção 4.7 na leitura dos pesos agregados por perspectiva.

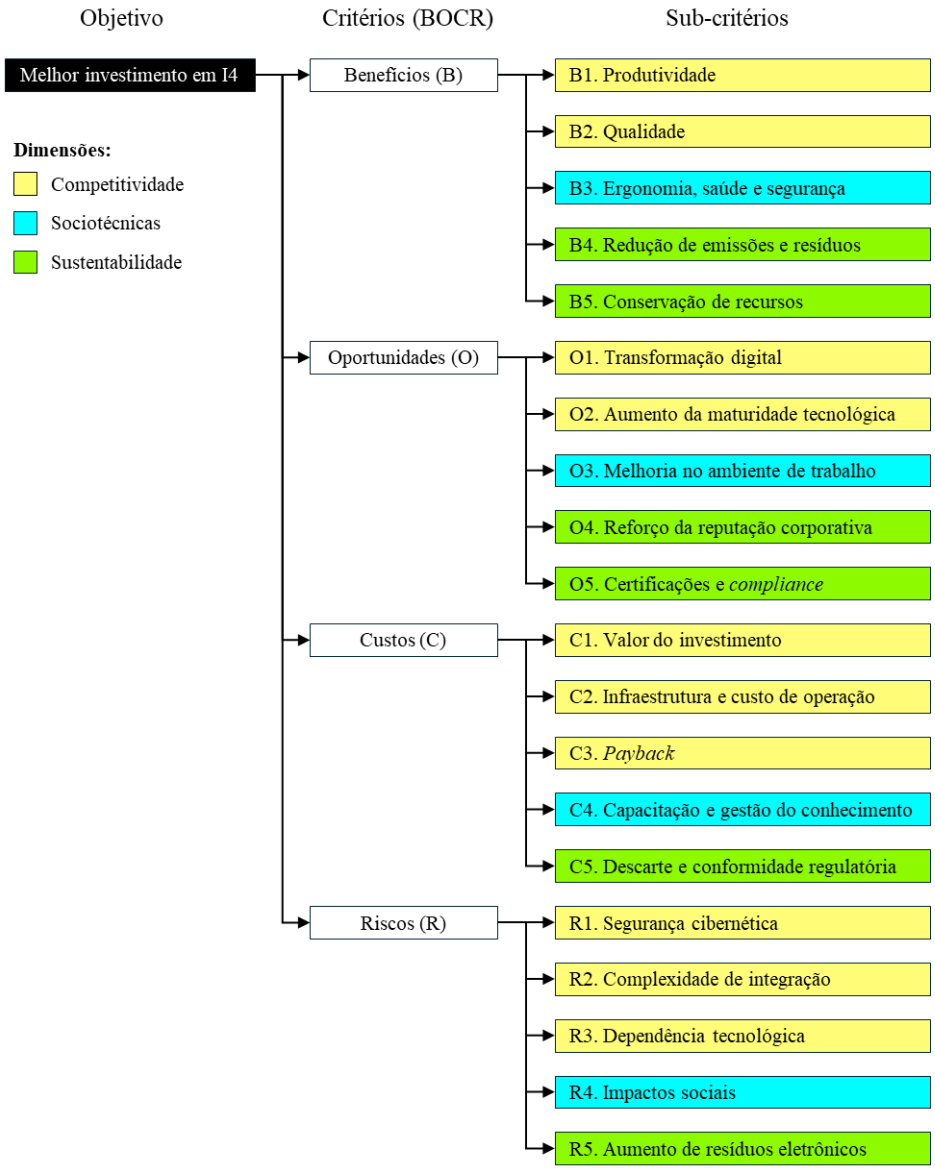
3.4.2 Etapa 2 – Delineamento do trabalho de campo

A segunda etapa traduz o arcabouço teórico da Etapa 1 em um modelo de decisão operacional e define o caso de aplicação real. Compreende três atividades: a caracterização do método, o desenvolvimento do modelo AHP-BOCR e a definição do caso de investimento.

A delimitação da abordagem fundamenta-se no propósito central do estudo: priorizar investimentos em tecnologias de I4.0. A pesquisa configura-se como um cenário de escolha entre múltiplas alternativas sob critérios distintos, o que caracteriza a tomada de decisão multicritério, empregada em contextos que demandam o exame simultâneo de diversos parâmetros, nos quais os responsáveis pela decisão atribuem diferentes graus de relevância (Ishizaka; Nemery, 2013). Dadas as premissas e restrições do problema, a escolha recaiu sobre o AHP, que, uma vez estruturado, baliza a criação do protocolo quantitativo e o desenvolvimento do instrumento de coleta de dados.

O modelo de decisão desta pesquisa foi construído com base nos critérios consolidados na Etapa 1. Os critérios identificados na literatura e organizados sob a estrutura BOCR (Quadros 5 a 8) foram traduzidos em vinte subcritérios, distribuídos entre os quatro méritos e as três dimensões de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade. A exceção ao princípio de exclusividade mútua, relativa ao subcritério Payback, permanece nos termos declarados na Etapa 1. Na modelagem da arquitetura hierárquica, a meta principal, os critérios e as alternativas de investimento precisam estar logicamente vinculados (Ishizaka; Nemery, 2013). O topo da estrutura representa o objetivo de selecionar a tecnologia de I4.0 mais adequada ao negócio; o segundo nível desdobra-se nos quatro méritos BOCR; o terceiro reúne os subcritérios das três dimensões; e a base é completada pelas alternativas tecnológicas. A Figura 16 apresenta o modelo AHP-BOCR resultante.

Figura 16 – Modelo AHP-BOCR para decisão de investimentos em I4.0



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.2.1 Sistema de apoio à decisão

Para operacionalizar o modelo, o autor desenvolveu um sistema web de apoio à decisão, implementado em arquitetura *full-stack*. A aplicação organiza o processo decisório em módulos independentes, cadastro do problema, definição dos méritos e subcritérios, cadastro das alternativas, coleta de julgamentos pareados, agregação das respostas, cálculo dos vetores de prioridade, verificação de consistência, síntese BOCR, análise de sensibilidade e geração de relatórios interpretativos. O Quadro 12 resume a arquitetura do sistema.

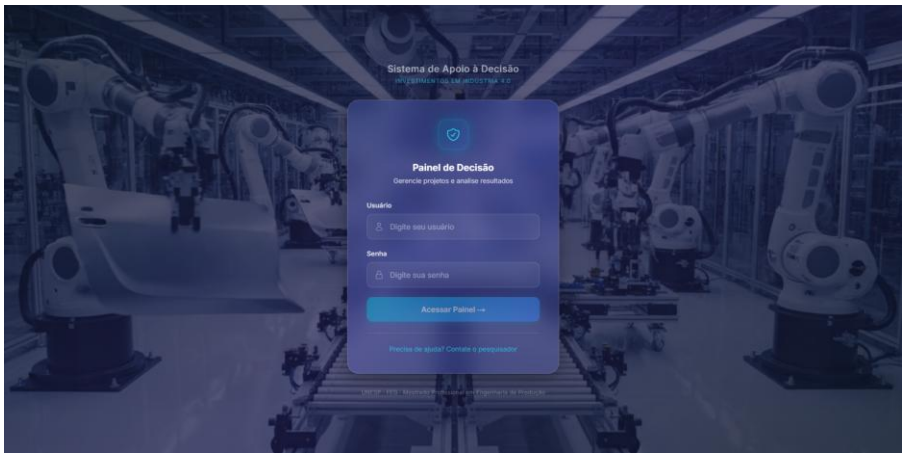
Quadro 12 – Resumo da arquitetura do sistema de apoio à decisão em I4.0

Camada	Ferramenta / Tecnologia	Função
Interface (*Frontend*)	Next.js 14 (React 18) com TypeScript	Implementação de interface responsiva para a coleta de julgamentos pela escala de Saaty e a visualização de rankings, com tipagem estática para garantir a integridade dos dados e a consistência das estruturas de matrizes e vetores de prioridade.
Infraestrutura (*Cloud*)	Vercel e Railway	Hospedagem híbrida, com aplicação principal na Vercel e microserviço de validação (Flask) no Railway.
Persistência de dados	Firebase Firestore (Google)	Armazenamento NoSQL em tempo real dos julgamentos de especialistas e dos metadados de autenticação institucional.
Motor de cálculo	Implementação própria em TypeScript	Algoritmos AHP-BOCR: síntese e análise de sensibilidade.
Validação computacional	AhpAnpLib v2.3	Comparação dos vetores de prioridade e dos índices de consistência com a biblioteca AhpAnpLib.
Explicabilidade (XAI)	Claude Opus 4.6 (Anthropic) com RAG	Geração de pareceres narrativos fundamentados em base científica, com mecanismos de controle da saída textual.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O sistema contempla dois perfis de usuário. O perfil de especialista realiza as comparações pareadas por meio de uma interface responsiva baseada na escala fundamental de Saaty. O perfil de decisor acessa os painéis analíticos do estudo, que incluem vetores de prioridade, índices de consistência, pesos locais e globais, desempenho das alternativas nos méritos BOCR, rankings por métodos de síntese e análise de sensibilidade. Para preservar a rastreabilidade dos julgamentos, a autenticação foi estruturada por meio de código de acesso e de validação de e-mail institucional. A Figura 17 apresenta a tela principal do módulo do decisor.

Figura 17 – Interface principal do módulo do decisor



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O motor de cálculo, implementado em TypeScript, contempla as rotinas de aplicação do AHP-BOCR, montagem das matrizes pareadas, agregação dos julgamentos individuais por média geométrica, cálculo do autovetor principal e de λ_{max}, CI e CR, cálculo dos pesos locais e globais, avaliação das alternativas em cada mérito, síntese final por múltiplos métodos, e análise de sensibilidade. O sistema AHP-OS (Goepel, 2018) adota um ajuste linear no cálculo do índice de consistência. A implementação desta pesquisa, por sua vez, segue o modelo clássico de cálculo do autovetor principal e do índice de consistência (Alonso; Lamata, 2006; Saaty, 1977, 1980).

A validação da implementação utiliza um microserviço em Flask que executa a biblioteca AhpAnpLib v2.3, mantida pela Creative Decisions Foundation (Mu, 2023). Essa arquitetura permitiu processar as mesmas matrizes agregadas em dois ambientes independentes (a implementação própria em TypeScript e a externa em Python) e a comparação entre os vetores de prioridade e os índices de consistência obtidos em ambos os ambientes constituiu a etapa de validação computacional da ferramenta. O motor de síntese implementa simultaneamente cinco métodos, apresentados no Quadro 13, o que permite a análise de concordância realizada na Etapa 3.

Quadro 13 – Métodos de síntese BOCR implementados no sistema

Método	Fórmula	Propriedade	Referência
Subtrativo completo (principal), Equação 8	$\boldsymbol{vb}\ x\ \boldsymbol{sb}\ x\ \mathrm{B} + \boldsymbol{vo}\ x\ \boldsymbol{so}\ x\ \mathrm{O} - \boldsymbol{vc}\ x\ \boldsymbol{sc}\ x\ \mathrm{C} - \boldsymbol{vr}\ x\ \boldsymbol{sr}\ x\ \mathrm{R}$	Admite score negativo; corrige escala via fator *s*	Wijnmalen (2007)
Quociente de somas, Equação 9	$(sb\ x\ \mathrm{B} + so\ x\ \mathrm{O}) / (sc\ x\ \mathrm{C} + sr\ x\ \mathrm{R})$	Razão positiva, análoga à análise benefício-custo	Wijnmalen (2007)
Aditivo probabilístico, Equação 6	$vb{\cdot}B + vo{\cdot}O + vc{\cdot}(1-C) + vr{\cdot}(1-R)$	Trata C e R como complemento; sempre positivo	Saaty e Ozdemir (2003); Demirtas e Üstün (2008)
Multiplicativo de potências, Equação 7	$B^{vb} \cdot O^{vo}\ x\ (1/C)^{vc}\ x\ (1/R)^{vr}$	Não linear; amplifica diferenças entre alternativas	Wijnmalen (2007); Lee (2009b)
Multiplicativo simples, Equação 7 com pesos unitários	(B x O) / (C x R)	Caso especial do multiplicativo sem pesos; referência de benchmarking	Saaty e Ozdemir (2003); Lee (2009b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além dos módulos de cálculo e validação, o sistema incorpora uma camada de XAI, denominada Parecer IA, concebida para apoiar a leitura qualitativa dos resultados quantitativos do modelo. A camada não participa do cálculo dos pesos, prioridades, índices de consistência, scores ou rankings. Atua após o processamento matemático e converte os resultados em

explicações textuais associadas aos critérios, subcritérios, alternativas e referências metodológicas cadastradas.

A camada recebe duas classes de entrada. A primeira corresponde aos dados quantitativos produzidos pelo motor AHP-BOCR, como pesos estratégicos dos méritos, pesos locais e globais dos subcritérios, índices de consistência, prioridades das alternativas por mérito, scores de síntese e resultados da análise de sensibilidade. A segunda corresponde aos dados qualitativos cadastrados no sistema, como a descrição do contexto industrial e a caracterização técnica das alternativas. A função utiliza arquitetura RAG. Nessa arquitetura, uma base bibliográfica sobre AHP, BOCR, agregação de julgamentos, consistência, métodos de síntese e análise de sensibilidade é indexada em base vetorial e consultada no momento da geração do parecer, combinando busca semântica e busca por palavra-chave.

A camada foi estruturada com restrições de controle. Os valores numéricos do parecer são extraídos diretamente do motor de cálculo e não são gerados pelo modelo de linguagem, que atua apenas na organização narrativa, na explicação dos *trade-offs* e na recuperação de fundamentos metodológicos do *corpus* RAG. O parecer permanece sujeito à revisão humana, na qual o pesquisador verifica a aderência da saída aos dados calculados, à lógica BOCR e às referências recuperadas. Preserva-se, desse modo, a separação entre cálculo, interpretação assistida e validação humana. O Quadro 14 sintetiza o funcionamento da camada.

Quadro 14 – Funcionamento da camada de interpretabilidade assistida por IA (XAI)

Componente	Descrição
Entrada quantitativa	Pesos estratégicos BOCR, pesos locais e globais, *Consistency Ratios*, prioridades das alternativas por mérito, scores de síntese e resultados da análise de sensibilidade
Entrada qualitativa	Descrição do contexto industrial, descrições técnicas das alternativas e informações do painel de especialistas
Processamento	Organização dos dados quantitativos, recuperação de referências por RAG e geração de interpretação qualitativa
Base de conhecimento	Artigos científicos sobre AHP, BOCR, consistência, agregação, síntese, sensibilidade e aplicações MCDM
Saída	Parecer qualitativo sobre consistência, configuração dos pesos, *trade-offs*, estabilidade do ranking e implicações gerenciais
Restrições	Uso exclusivo dos dados calculados pelo sistema, apoio em *corpus* bibliográfico controlado e revisão humana antes do uso
Papel na pesquisa	Apoio à interpretação, à comunicação gerencial e à rastreabilidade dos resultados multicritério

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

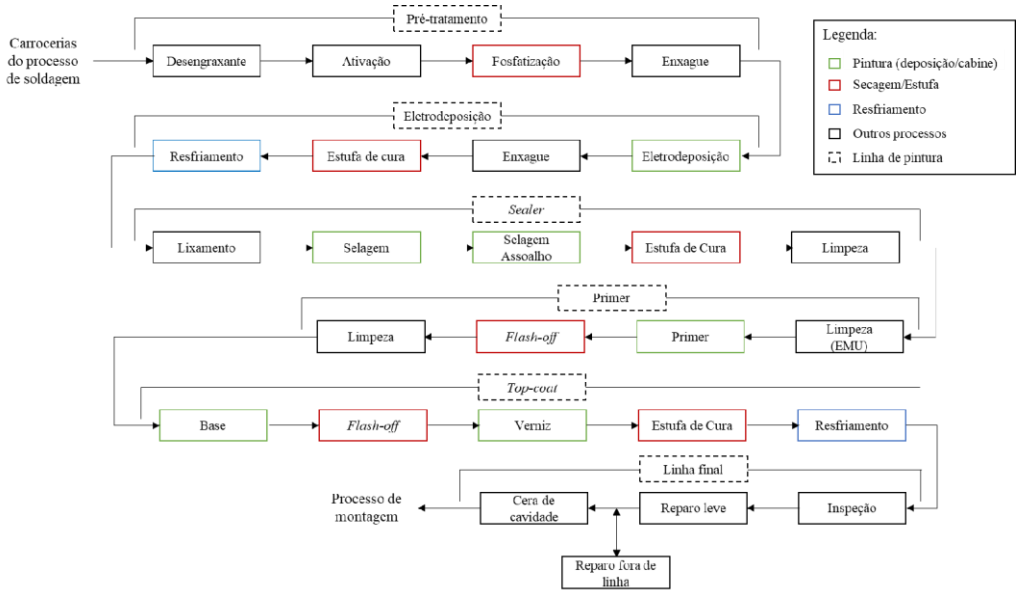
O *corpus* bibliográfico da camada reúne trinta e seis artigos indexados. A composição abrange os fundamentos do AHP, a síntese BOCR e a hierarquia de controle, a agregação de julgamentos e a consistência em grupo, as comparações pareadas incompletas, as aplicações setoriais do método e a análise de viés e equidade em painéis, esta última com dois títulos de teoria organizacional que sustentam o exame da correspondência entre a composição funcional do painel e a dominância de um mérito. O Apêndice H relaciona os artigos com suas referências e com a categoria registrada nos metadados do *corpus*.

A terceira atividade da Etapa 2 caracteriza o caso real ao qual o modelo se aplica, descreve as duas alternativas tecnológicas avaliadas e estima os investimentos correspondentes.

3.4.2.2 Processo de pintura e consumo de gás natural

A pintura confere à carroceria propriedades estéticas, como cor, brilho e uniformidade, e propriedades funcionais de barreira contra corrosão, abrasão e intempéries (Giampieri *et al.*, 2020). O processo compreende o pré-tratamento, a eletrodeposição catódica (*E-coat*), a vedação, a aplicação sequencial do *top-coat*, que inclui *primer*, *base-coat* e *clear-coat*, as zonas de *flash-off* e as estufas de cura, cada camada com espessura e composição específicas (Pendar *et al.*, 2022). A cura ocorre entre 130 e 180 °C, conforme a camada, com resfriamento posterior para manuseio seguro (Giampieri *et al.*, 2020). A Figura 18 apresenta o fluxo do processo.

Figura 18 – Processo convencional de pintura automotiva



Fonte: Giampieri *et al.* (2020).

A pintura é o setor mais intensivo em energia da fábrica e absorve de 30% a 75% do total, conforme a tecnologia, com matriz típica de 56% de eletricidade e 44% de combustíveis, em sua maioria gás natural (Giampieri *et al.*, 2020; Pendar *et al.*, 2022). As estufas de cura respondem por mais de 20% da energia total do processo de pintura e, quando não estão curando veículos, desperdiçam mais de 25% da energia nas fases de *startup* e *set-back* (Pendar *et al.*, 2022). O gás natural gera ar quente nas estufas, aquece o ar das cabines em climas frios, aquece a água do pré-tratamento e alimenta oxidadores térmicos (Giampieri *et al.*, 2020). Na linha estudada, o gás natural é consumido quase integralmente pelas estufas. O aquecimento do ar insuflado nas cabines é reduzido no clima local.

O consumo de gás natural da linha de pintura foi apurado por medição no exercício de 2025, com média de 17,2 m³ por veículo produzido, atribuível quase integralmente às estufas de cura. Considerado o Poder Calorífico Superior de 10,55 kWh por metro cúbico, isso equivale a consumo térmico de aproximadamente 181 kWh por veículo (Brasil, 2024; Pendar *et al.*, 2022, 2025). Por força de confidencialidade contratual, o preço praticado pela empresa não é divulgado e adota-se como referência o preço médio público de R$ 3,79 por metro cúbico fornecido à indústria no estado de São Paulo em agosto de 2025 (Brasil, 2025). Para um volume de 208.000 veículos por ano, o consumo anual totaliza 3.577.600 m³, equivalente a um custo anual de referência de R$ 13.559.104,00.

O volume de 208.000 veículos por ano corresponde ao plano de produção da unidade, dado secundário fornecido pela organização no contexto da pesquisa-ação. O volume não foi estimado pelo pesquisador nem submetido a técnica de previsão de demanda, e constitui parâmetro do planejamento corporativo, adotado como base de cálculo e mantido constante ao longo do horizonte de análise. A premissa é proporcional à natureza paramétrica da estimativa, de Classe 5 (AACE International, 2020). As economias das duas alternativas incidem sobre a mesma base de consumo, e eventual variação do volume deslocaria os períodos de recuperação na mesma direção. As despesas operacionais fixas e as magnitudes de economia diferem entre as alternativas, e a preservação da ordenação sob outros volumes não foi demonstrada, condição retomada na Seção 5.3, no subcritério de payback.

Para mitigar o alto consumo e a volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis, o trabalho propõe duas alternativas de I4.0 para o gerenciamento do consumo de gás nas estufas, avaliadas pelos gestores pelo modelo AHP-BOCR. A Alternativa 1 (A1) é um sistema de combustão inteligente por *Industrial Internet of Things* (IIoT) e IA, com controle em tempo real da estequiometria e redução projetada de 6% a 9% no consumo (Pendar *et al.*, 2025; Varga *et al.*, 2025). A Alternativa 2 (A2) emprega gêmeos digitais com dinâmica de fluidos

computacional (CFD) acoplada a *autoencoders* variacionais (VAE), que reproduzem o escoamento e a transferência de calor nos fornos e permitem economia pela otimização da geometria e do fluxo de ar (Pendar *et al.*, 2025; Vieira *et al.*, 2023). As Seções 3.4.2.3 e 3.4.2.4 detalham cada alternativa.

A inclusão de dados tangíveis, como capital investido e retorno esperado, reduz a subjetividade do julgamento (Assaf Neto, 2020). Os custos de implementação foram estimados pela orçamentação paramétrica de Classe 5 da AACE International, apropriada à fase conceitual de viabilidade, construída por analogia e fatores de escala, com acurácia esperada de −20% a +100% (AACE International, 2020). Os custos de hardware vieram de catálogos de fabricantes; os de software, integração e engenharia, por analogia com projetos similares na literatura técnica; e a contingência foi fixada em 15% do subtotal, conforme a recomendação AACE 18R-97 (Al Zadjali; Joy; Walke, 2024; He; Huang; Wu, 2025; Pendar *et al.*, 2025).

Os valores foram verificados quanto à aderência aos benchmarks setoriais de payback para eficiência energética industrial, entre 2 e 5 anos (DB Energy, 2024; Sensorfact, 2023). As despesas operacionais anuais foram estimadas pelo autor a partir de sua experiência na gestão de processos de pintura automotiva e incluem manutenção de hardware, licenciamento de software, retreinamento de modelos e suporte técnico. Por se tratar de estimativa de Classe 5, os valores não constituem orçamentos executivos, mas referências paramétricas para a caracterização inicial das alternativas. Sua comparabilidade depende da equivalência de escopo, das premissas de economia e do tratamento temporal dos custos. Embora o AHP-BOCR utilize prioridades relativas, alterações nas estimativas podem modificar os julgamentos e requerem nova avaliação; a invariância do ranking a variações de preços e custos não foi demonstrada.

A mensuração do retorno baseia-se no payback descontado, que define o período de recuperação do capital investido com os fluxos de caixa trazidos a valor presente, incorporando o valor do dinheiro no tempo pela taxa SELIC como Taxa Mínima de Atratividade (TMA) (Assaf Neto, 2020; Lefley, 1996; Samanez, 2006). A literatura financeira referência a taxa básica de juros como fator de desconto para projetos industriais no Brasil, por representar o rendimento mínimo de aplicações de baixo risco (Casarotto; Kopittke, 2019). Adotaram-se as projeções da SELIC do Boletim Focus do Banco Central: 12,50% a.a. para 2026, 10,50% para 2027 e 10,00% para 2028 (Banco Central do Brasil, 2026).

Adotou-se o cenário-base de redução energética, no ponto médio das faixas da literatura, com 7,5% para a Alternativa 1, dentro da faixa de 6% a 9%, e 20% para a Alternativa 2, considerando que os 25% reportados por simulação CFD representam o potencial máximo

de desperdício e que a captura efetiva depende do escopo das intervenções físicas. O cenário-base confere conservadorismo à análise e reduz o risco de superestimação dos retornos.

3.4.2.3 Alternativa 1 – Controle em tempo real dos queimadores utilizando IA

A Alternativa 1 é um sistema integrado de combustão inteligente para os fornos contínuos das linhas de pintura, com o objetivo de minimizar o consumo de gás natural e manter a carroceria dentro da janela de cura (Pendar *et al.*, 2025). A solução integra três camadas de IA: monitoramento de integridade via IIoT, otimização estequiométrica por sensores virtuais de oxigênio e controle de chama por visão computacional.

A primeira camada emprega a IIoT no monitoramento da integridade e na prevenção de desperdícios. Em fornos com mais de cinquenta metros, o cabeamento estruturado para múltiplos queimadores tem restrições técnicas e financeiras, o que motiva dispositivos sem fio denominados *iBurner*, com sensores de pressão e temperatura e sinais analógico-digitais, comunicando por Wi-Fi, Bluetooth ou ZigBee. O processamento em nuvem aplica aprendizado de máquina para identificar tendências e detectar bloqueios precocemente (He; Huang; Wu, 2025).

A segunda camada faz a otimização estequiométrica por sensores virtuais de oxigênio. Como os sensores físicos de zircônia têm durabilidade limitada em condições agressivas, o sistema usa Redes de Crença Profunda (*Deep Belief Networks*, DBN) para estimar o teor de oxigênio nos gases de exaustão. Manter o oxigênio residual entre 3,5% e 7,5% promove reduções de combustível de 6% a 9% (Al Zadjali; Joy; Walke, 2024; Varga *et al.*, 2025).

A terceira camada faz a análise e o controle da chama por visão computacional. Câmeras no espectro visível monitoram a operação, e modelos de aprendizado de máquina extraem e classificam características da chama, permitindo ajustes dinâmicos na mistura ar-combustível para maximizar a transferência de calor radiante (Al Zadjali; Joy; Walke, 2024).

A Alternativa 1 é um projeto de desenvolvimento tecnológico, não um produto comercial. Os componentes foram validados isoladamente em ambientes operacionais ou representativos nos estudos de origem, mas a integração das três camadas em um sistema unificado para estufas de cura automotivas não foi demonstrada em escala industrial. Na caracterização fornecida ao painel, adotou-se a faixa TRL 6-7 como estimativa de maturidade, cujo enquadramento exige evidência de demonstração da solução integrada (Mankins, 1995). A estimativa é premissa adotada na caracterização apresentada ao painel, e não classificação

demonstrada. A documentação reunida evidencia a validação isolada dos componentes, e não a demonstração do conjunto integrado no nível estimado. O prazo de implementação estimado é de 12 a 24 meses, e o risco residual concentra-se na calibração e validação do sistema integrado no ambiente térmico agressivo das estufas.

3.4.2.4 Alternativa 2 – Gêmeos digitais para simulação termodinâmica das estufas

A Alternativa 2 propõe um sistema de gêmeos digitais de alta fidelidade para simular e otimizar os parâmetros das estufas de cura. Diferente dos sistemas de controle reativos, seu foco é definir as melhores condições operacionais antes do processo, para reduzir o consumo de gás sem comprometer o filme de pintura nem a produtividade. O sistema acopla a dinâmica de fluidos computacional (CFD), que resolve as equações governantes, a modelos de ordem reduzida, responsáveis pela inferência rápida em cenários operacionais (Łach; Svyetlichnyy, 2026; Pendar *et al.*, 2025).

A fundamentação física baseia-se na resolução numérica das equações de Navier-Stokes para fluidos compressíveis, com *Large Eddy Simulation* para os grandes turbilhões de energia, acoplada a algoritmos de Transferência de Calor Conjugada que simulam a interação térmica entre o ar quente e a carroceria (Dong *et al.*, 2025; Pendar *et al.*, 2025). Como o tempo de execução do CFD inviabiliza testes exaustivos em cenários industriais dinâmicos, a arquitetura incorpora o *Variational Auto-Encoder* (VAE), modelo generativo que reduz a dimensionalidade dos campos de escoamento e das distribuições térmicas (Laubscher; Rousseau, 2021; Zhang *et al.*, 2025).

O VAE é acoplado a uma Rede Neural Artificial do tipo *Multilayer Perceptron*, que conecta as variáveis de processo às representações no espaço latente e permite predições de campos térmicos completos em milissegundos (Laubscher; Rousseau, 2020; Pendar *et al.*, 2025). Assim, engenheiros exploram o espaço de projeto e testam combinações de parâmetros para encontrar o ponto ótimo de eficiência energética antes da produção.

Como a Alternativa 1, a Alternativa 2 é um projeto de desenvolvimento tecnológico. Seus componentes foram validados isoladamente em estudos publicados, mas em condições laboratoriais ou de simulação, e um gêmeo digital calibrado para estufas de cura automotivas específicas, validado experimentalmente contra dados de produção real, ainda não foi relatado na literatura consultada. Na escala TRL, estima-se a solução na faixa TRL 4-5, com componentes validados em laboratório. O prazo de implementação é de 18 a 36 meses, e o risco é mais elevado do que o da Alternativa 1. O modelo pode exigir múltiplas iterações de

calibração e a economia depende da execução das modificações físicas recomendadas pela simulação.

3.4.2.5 Investimentos e despesas operacionais

A configuração técnica das estufas conta com 17 queimadores Maxon Ovenpak distribuídos entre as etapas de *E-coat*, *sealer* e *top-coat,* com o sistema de gerenciamento de combustão Honeywell SLATE, já em operação. Sobre essa infraestrutura, o investimento da Alternativa 1 refere-se apenas à camada incremental de IoT e IA sobre essa infraestrutura. O investimento inicial estimado é de R$ 3.369.500, concentrado em sensores sem fio, câmeras de visão computacional, infraestrutura de rede, software de IA e integração com o sistema de combustão. As despesas operacionais anuais somam R$ 235.865 em manutenção de sensores, licenças de nuvem, retreinamento de modelos e suporte técnico. O Apêndice B detalha a decomposição.

O investimento inicial da Alternativa 2 é estimado em R$ 5.934.000, concentrado no licenciamento de software de CFD de alta fidelidade, infraestrutura de computação de alto desempenho, desenvolvimento e calibração do modelo de ordem reduzida, instrumentação para validação experimental e engenharia de integração. As despesas operacionais anuais somam R$ 885.120, em renovação de licenças, manutenção da infraestrutura, recalibração dos modelos e suporte técnico especializado, com decomposição no Apêndice B. O payback da Alternativa 2 pressupõe a implementação imediata das intervenções físicas recomendadas pela simulação. Sua economia não decorre da operação do software, mas das modificações no projeto termodinâmico da estufa; postergar essas intervenções altera o início das economias e pode alongar o período de recuperação, em magnitude dependente do fluxo de caixa.

A consolidação dos indicadores econômicos, aliada às predições de eficiência térmica, fornece a base para as comparações quantitativas da matriz de decisão. A Tabela 2 registra as estimativas financeiras utilizadas na caracterização apresentada ao painel, sujeitas às ressalvas de comparabilidade descritas a seguir.

Tabela 2 – Estimativas econômicas das alternativas apresentadas ao painel

Indicador	Alternativa 1	Alternativa 2
Investimento inicial (CAPEX)	R$ 3.369.500	R$ 5.934.000
Despesas operacionais anuais (OPEX)	R$ 235.865	R$ 885.120
Redução estimada de gás natural	7,5%	20%
Economia bruta no 1º ano	R$ 1.016.933	R$ 2.711.821
Economia líquida no 1º ano	R$ 781.068	R$ 1.826.701
Payback descontado	6,1 anos	4,3 anos

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: os valores reproduzem as estimativas apresentadas ao painel. Na Alternativa 2, o payback inclui a economia integral esperada, mas omite os custos das intervenções físicas necessárias, o que tende a encurtar o retorno estimado. O licenciamento do primeiro ano figura no CAPEX e a subscrição anual no OPEX desde o primeiro ano, conforme o Apêndice B; essa sobreposição tende a alongá-lo. Os efeitos atuam em sentidos opostos e seu saldo depende da reconstrução dos fluxos de caixa indicada na Seção 5.3, sem a qual o indicador não é comparável ao da Alternativa 1. Os valores são preservados para rastrear a informação que fundamentou os julgamentos, discutidos na Seção 4.8.

Nas estimativas originalmente apresentadas, o payback descontado foi de 4,3 anos para a Alternativa 2 e de 6,1 anos para a Alternativa 1. A diferença nominal não demonstra superioridade financeira, pois os escopos de custo não são equivalentes. Com a base de consumo medida da linha de pintura, o payback descontado da Alternativa 2, de 4,3 anos, situa-se dentro do benchmark setorial de 2 a 5 anos para eficiência energética industrial, e o da Alternativa 1, de 6,1 anos, situa-se acima dele. O confronto com o benchmark é descritivo. As despesas recorrentes já integram a economia líquida usada no cálculo; a incerteza quanto a seus valores e ao momento de realização dos custos e das economias permanece sem tratamento formal. A priorização AHP-BOCR expressa as preferências do painel sob as informações fornecidas, e deve ser reavaliada após a revisão financeira. Eventual acesso a programas de fomento depende da verificação das condições de elegibilidade e ficou fora das estimativas apresentadas ao painel.

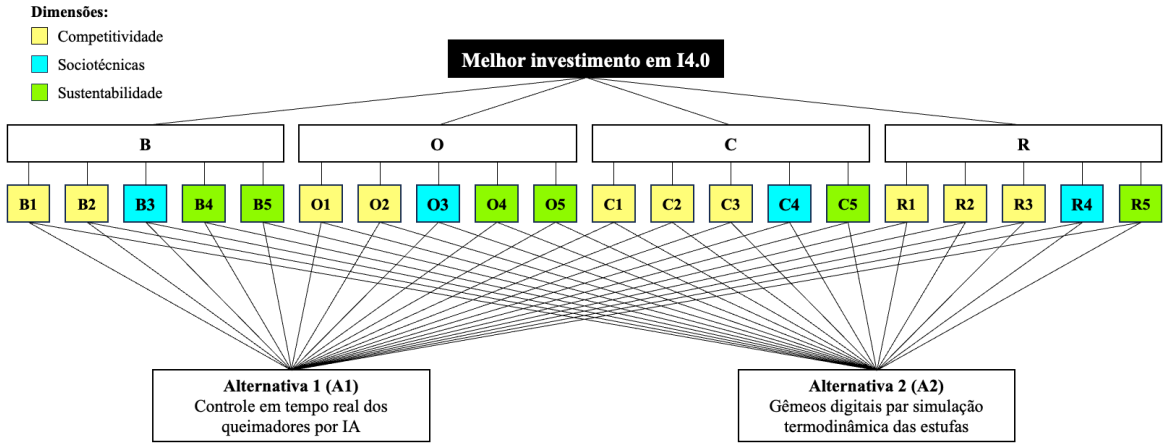
O Apêndice C apresenta a comparação das duas alternativas segundo os vinte subcritérios da estrutura BOCR, elaborada para fundamentar os julgamentos do painel. Os Apêndices B e C preservam as estimativas e a caracterização originalmente fornecidas, incluindo as premissas de maturidade tecnológica; sua reprodução documenta a coleta e deve ser lida com as ressalvas desta seção.

3.4.3 Etapa 3 – Trabalho de campo

A terceira etapa aplica o modelo ao caso real por meio de cinco atividades: a construção da hierarquia AHP, a obtenção dos julgamentos, a validação da consistência, a análise dos resultados e a formulação das conclusões e recomendações.

A sistematização das alternativas sob os vinte subcritérios da estrutura BOCR, apresentada no Apêndice C, fornece a base de evidências para a transição do levantamento técnico-financeiro à modelagem decisória. A transposição dos dados tangíveis e intangíveis para o modelo AHP ampara a subjetividade do decisor em critérios técnicos e resulta na matriz AHP-BOCR completa (Figura 19), que articula competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade para fundamentar a escolha entre as alternativas.

Figura 19 – Matriz AHP-BOCR completa para decisão entre as alternativas 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os julgamentos foram coletados por comparações pareadas, com base na escala fundamental de Saaty (Saaty, 1980), em sistema web acessível por qualquer navegador, sem instalação. Os especialistas foram convidados por e-mail individual, com a contextualização da pesquisa, o tempo estimado, as credenciais de acesso e o contato do pesquisador, e com o esclarecimento de que os dados financeiros e energéticos do questionário são estimativas paramétricas da literatura, não dados reais ou confidenciais da empresa.

Após a autenticação, o respondente preenche um formulário de perfil e recebe instruções sobre o problema, a estrutura hierárquica BOCR, as alternativas e a escala de Saaty. A interface dispõe de uma escala em formato bipolar, com o botão central no valor 1 e os laterais em intensidades crescentes de 2 a 9 em favor de cada elemento, e registra a direção e a

intensidade da preferência em um único gesto. *Badges* interativos exibem definições e descrições de impacto e dispensam a consulta a documentos externos durante o preenchimento.

As comparações organizam-se em blocos por nível da hierarquia, e um painel lateral em árvore permite acompanhar o progresso. O progresso é salvo automaticamente e permite interromper e retomar a coleta, cujo período de abertura e encerramento é controlado pelo decisor. A Tabela 3 caracteriza o painel de especialistas que respondeu ao instrumento.

Tabela 3 – Caracterização do painel de especialistas (n = 12)

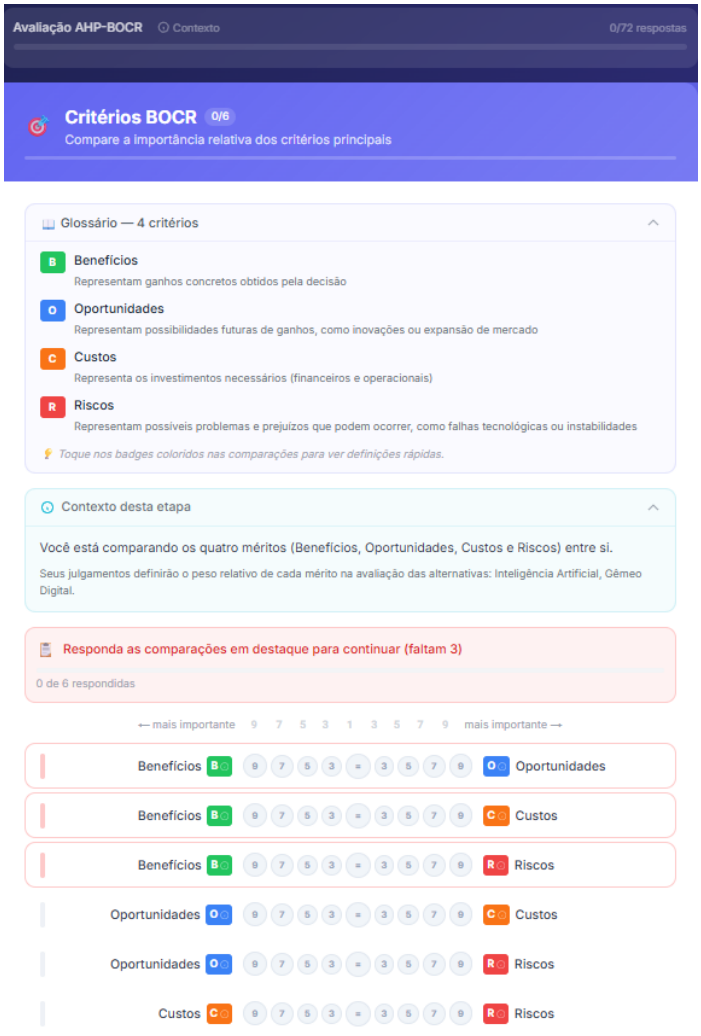
Variável	Categoria	n
Faixa etária	31 a 40 anos	1
	41 a 50 anos	7
	Mais de 50 anos	4
Tempo de experiência	11 a 20 anos	2
	21 a 30 anos	6
	Mais de 30 anos	4
Nível de formação	Especialização ou MBA	8
	Mestrado	4
Área de atuação	Manufatura/Operações	6
	Otimização e custos	2
	Compras	1
	Qualidade	1
	Finanças	1
	Pesquisa e desenvolvimento	1
Cargo	Vice-Presidente	1
	Diretor	4
	Gerente	7
Gênero	Masculino	12

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A composição do painel decorre da abrangência dos méritos avaliados. A estrutura hierárquica alcança as perspectivas de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade, e seus subcritérios remetem a decisões distribuídas por manufatura e operações, otimização e custos, compras, qualidade, finanças e pesquisa e desenvolvimento, exigência de cobertura funcional que orientou a seleção dos participantes. Os doze respondentes ocupam cargos de gerência ou superiores nessas seis áreas e integram o corpo que aprova investimentos na unidade, configuração que Forman e Peniwati (1998) associam ao grupo que atua como unidade sinérgica, exemplificada pelos responsáveis por departamentos reunidos para definir política corporativa.

A Figura 20 apresenta um exemplo de questão, na qual o respondente julga, pela escala fundamental, a direção e a intensidade da preferência, em confronto com uma questão orientadora sobre os critérios mais relevantes para a decisão

Figura 20 – Exemplo de questão estruturada no questionário AHP-BOCR aplicado



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A coleta seguiu a sequência das quatro etapas correspondentes aos níveis da hierarquia BOCR, e cada etapa alimenta a síntese com um componente do modelo. A primeira pondera os quatro méritos BOCR em uma matriz 4×4 e determina os pesos pessoais dos méritos (v_b, v_o, v_c, v_r), que expressam a importância relativa de cada dimensão e definem sua contribuição proporcional no score final.

A segunda etapa avalia a magnitude de impacto dos méritos em uma segunda matriz, cujos pesos (s_b, s_o, s_c, s_r), denominados *rescaling weights*, calibram a contribuição de cada mérito na síntese. O instrumento apresentou a instrução de comparar as magnitudes totais

de cada par de méritos, sem considerar critérios individuais, e a pergunta, repetida nas seis comparações, indagava qual fator apresentava maior impacto absoluto no investimento, com resposta na escala fundamental de nove pontos. Distingue-se, na formulação, a magnitude total da importância estratégica elicitada na primeira etapa, e os pesos foram elicitados com a finalidade de reescalonar as prioridades a partir das magnitudes totais percebidas. A terceira pondera, dentro de cada mérito, seus cinco subcritérios, estabelecendo a importância relativa entre eles (Saaty, 1980). A quarta avalia as alternativas sob cada um dos vinte subcritérios, por meio da questão orientadora “Qual alternativa apresenta maior impacto em [subcritério]?”, formulada na direção da magnitude de impacto nos quatro méritos. Nos méritos negativos, a prioridade maior expressa o maior ônus percebido. A etapa revela a prioridade local de cada uma, depois agregada aos pesos anteriores para compor os scores globais pelos métodos de síntese BOCR sistematizados por Saaty e Ozdemir (2003) e refinados por Wijnmalen (2007), com aplicações em Demirtas e Üstün (2008) e Lee (2009a).

O procedimento totalizou setenta e duas comparações pareadas distribuídas em vinte e seis matrizes de julgamento por respondente, com seis comparações em cada matriz 4 × 4, dez em cada matriz 5 × 5 e uma em cada matriz 2 × 2 de alternativas. O vetor de prioridades de cada matriz foi obtido pelo método clássico do autovetor principal, conforme a Equação 1, e os índices de consistência foram calculados pelas Equações 2 e 3 (Alonso; Lamata, 2006; Saaty, 1977, 1980). As matrizes agregadas foram obtidas pela média geométrica dos julgamentos individuais conforme o método AIJ, indicado quando o grupo de decisores atua como uma unidade (Forman; Peniwati, 1998).

As prioridades das alternativas foram derivadas no modo distributivo, com normalização para soma unitária em cada mérito. Com duas alternativas, os modos distributivo e ideal produzem a mesma ordenação e o fenômeno de reversão de ordem não se manifesta; a escolha do modo torna-se relevante apenas na presença de alternativas adicionais (Saaty; Ozdemir, 2003).

A consistência é o mecanismo de controle de qualidade do método e foi verificada individualmente em cada matriz pela razão de consistência, com limiar de aceitação de 10% sugerido por Saaty (1977). A análise individual dos CRs e a discussão sobre a coerência dos julgamentos do painel estão apresentadas na Seção 4.2.

O processamento das matrizes produziu cinco conjuntos de resultados: o vetor de prioridades estratégicas dos méritos BOCR; os pesos globais dos vinte subcritérios, obtidos pela composição hierárquica dos pesos locais com os dos respectivos méritos; a tabela de prioridades BOCR por alternativa; o comparativo entre os cinco métodos de síntese, que avalia a robustez

do ranking; e a análise de sensibilidade, que identifica os limiares de variação dos pesos a partir dos quais o ranking se inverte.

A verificação do motor de cálculo seguiu o procedimento de validação de software adotado por Goepel (2018) na implementação do AHP-OS, que consiste em teste de caixa preta, com a comparação dos resultados do programa contra resultados calculados de forma independente e contra resultados publicados na literatura.

A verificação abrangeu as duas etapas do cálculo. A primeira é a agregação dos julgamentos individuais. Goepel (2018) estabelece que a decisão em grupo é validada pela verificação de que os elementos da matriz consolidada correspondem à média geométrica dos elementos das matrizes individuais. Nesta pesquisa, cada elemento das matrizes agregadas produzidas pelo sistema foi confrontado com a média geométrica dos julgamentos dos doze respondentes, recalculada de forma independente a partir dos registros individuais. A verificação cobriu os cinquenta e dois elementos independentes das seis matrizes de ordem superior a dois e os vinte elementos das matrizes de alternativas, o que corresponde à totalidade dos oitocentos e sessenta e quatro julgamentos coletados.

A segunda etapa é a derivação das prioridades e da consistência a partir das matrizes agregadas. O resultado de referência foi produzido pela biblioteca AhpAnpLib, implementação independente do AHP mantida pela Creative Decisions Foundation (Mu, 2023). As seis matrizes agregadas não triviais, a matriz estratégica BOCR, as quatro matrizes de subcritérios e a matriz de Magnitude, foram processadas nos dois ambientes. As vinte matrizes de alternativas, de ordem 2×2, têm solução fechada e consistência trivial, e não integram essa comparação.

Duas grandezas foram comparadas nessa segunda etapa. A primeira é o vetor de prioridades, obtido pelo método do autovetor principal (Saaty, 1977;1980). O vetor é a origem de todas as grandezas subsequentes do modelo: os pesos estratégicos dos méritos, os pesos locais dos subcritérios, os *rescaling weights* e, por composição, os scores das alternativas. Implementações do AHP divergem sobretudo no método de derivação das prioridades, e a comparação dos vetores é o que detecta essa divergência. A segunda é a razão de consistência, grandeza derivada do mesmo vetor, cuja comparação verifica a cadeia do autovalor, do índice de consistência e do índice aleatório.

O critério de aderência adotado é a coincidência dos valores na precisão em que os resultados são reportados nesta dissertação, quatro casas decimais nos elementos das matrizes agregadas e nas prioridades, e duas casas decimais na razão de consistência percentual. Diferenças abaixo dessa precisão não alteram nenhum valor publicado. As matrizes agregadas

constam do Apêndice E e as prioridades locais das alternativas constam do Apêndice F, o que permite a reprodução independente dos resultados reportados.

Com base nesses resultados, o módulo de interpretabilidade assistida por IA gerou um parecer qualitativo sobre os *trade-offs* entre os méritos BOCR, a sensibilidade dos pesos críticos e a qualidade e consistência dos julgamentos. O recurso complementou a interpretação do pesquisador ao sistematizar, a partir da base de conhecimento científico do módulo, elementos que exigiriam extensa análise manual das matrizes e dos vetores de prioridade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados do modelo AHP-BOCR no caso de aplicação, discutidos à luz dos objetivos da pesquisa, operam em dois níveis. O primeiro é o resultado aplicado da decisão: a priorização entre as duas alternativas avaliadas para a otimização do consumo energético das estufas de cura. O segundo é a aplicabilidade do modelo e da ferramenta, sustentada pela estruturação dos critérios, pela coleta dos julgamentos, pela verificação da consistência, pela síntese das prioridades, pela análise de sensibilidade e pela validação computacional. O objetivo geral, portanto, não se limita à indicação de uma alternativa.

Os três objetivos específicos são retomados ao longo do capítulo. O primeiro, identificar na literatura os critérios de decisão aplicáveis a investimentos em tecnologias da I4.0 no setor automotivo, materializou-se na estrutura de critérios e subcritérios organizada nos méritos Benefícios, Oportunidades, Custos e Riscos. O segundo, desenvolver a estrutura hierárquica de decisão baseada no modelo AHP-BOCR, com quatro méritos, vinte subcritérios e duas alternativas. O terceiro, avaliar a aplicabilidade e os resultados em um caso real de aplicação, junto a doze especialistas da indústria automotiva, na obtenção de pesos e prioridades, na análise de consistência e na interpretação dos resultados no contexto da linha de pintura.

O software operacionalizou as comparações pareadas, registrou os julgamentos, calculou as prioridades locais e globais, verificou a consistência das matrizes e organizou os resultados para análise. Como os respondentes tinham familiaridade prévia limitada com AHP-BOCR e com métodos MCDM, a ferramenta, além de processar os dados, estruturou a interação dos especialistas com o método.

Os julgamentos analisados neste capítulo foram emitidos pelo painel caracterizado na Tabela 3, composto por doze profissionais seniores da unidade estudada. Dez dos doze acumulam mais de vinte anos de experiência profissional, todos possuem formação de pós-graduação e todos ocupam cargos de gerência ou superiores, distribuídos pelas seis áreas funcionais que participam da aprovação de investimentos na unidade. A competência do painel sobre o objeto da decisão, portanto, corresponde à das pessoas que efetivamente decidem investimentos nesse contexto. A familiaridade prévia com métodos multicritério, ao contrário, era limitada, e a aplicação constituiu o primeiro contato da maioria dos respondentes com comparações pareadas. O grau de familiaridade não foi aferido por item do instrumento,

restrição retomada na Seção 5.3. As duas condições são distintas e produzem efeitos distintos sobre os resultados, conforme a Seção 4.2.

A apresentação segue a ordem das etapas da decisão. Examinam-se primeiro a consistência dos julgamentos e a validação computacional da ferramenta, por comparação com a AhpAnpLib (Mu, 2023), que tratam da validade dos dados de entrada e da confiabilidade do cálculo. Seguem os pesos estratégicos dos méritos BOCR, os pesos locais e globais dos subcritérios, o desempenho das alternativas em cada mérito, a síntese global e a análise de sensibilidade, que tratam da interpretação da decisão.

4.2 ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA DOS JULGAMENTOS

A verificação de consistência dos julgamentos foi conduzida em dois níveis. O primeiro compreende as setenta e duas matrizes individuais, seis por respondente, e o segundo, as seis matrizes agregadas obtidas pela média geométrica dos julgamentos dos doze respondentes, conforme o protocolo da Seção 3.4.3. Em ambos os níveis, o vetor de prioridades foi derivado pelo autovetor principal e a razão de consistência foi calculada pelas Equações 2 e 3. A razão de consistência afere a coerência cardinal interna de uma matriz e constitui atributo do conjunto de julgamentos nela registrados, medida que não se transfere de um nível para o outro. A verificação antecede a interpretação dos resultados porque as prioridades que alimentam a síntese BOCR derivam das matrizes agregadas, e a consistência é a medida de qualidade do dado de entrada do método (Salomon; Gomes, 2024). A distribuição das razões individuais é reportada em seguida, para tornar visível a variação existente antes da agregação, e os índices das matrizes agregadas constam da Tabela 6.

O limiar de aceitação adotado é de 10% (Saaty, 1977). Matrizes com CR acima do limiar exigem cautela interpretativa e, quando possível, revisão dos julgamentos.

O instrumento totalizou seis matrizes não triviais por respondente, sendo uma matriz 4 × 4 de pesos pessoais BOCR, uma matriz 4 × 4 de magnitudes BOCR e quatro matrizes 5 × 5 de subcritérios, e os doze respondentes geraram setenta e duas matrizes individuais (12 × 6) submetidas à análise de consistência. Os índices λ_{max}, CI e CR foram calculados pelas Equações 2 e 3, com índices aleatórios RI(4) = 0,90 e RI(5) = 1,12 (Salomon; Gomes, 2024), e as matrizes agregadas, pela média geométrica dos julgamentos individuais (AIJ).

A consistência individual foi avaliada por matriz, conforme o procedimento do AHP, no qual cada matriz de comparação é aceita quando seu CR fica em ou abaixo de 10% (Saaty, 1977). O CR BOCR, da matriz estratégica 4 × 4, expressa a coerência dos julgamentos

entre os quatro méritos e é reportado por respondente. As demais matrizes de cada respondente, a de Magnitude e as quatro de subcritérios, têm o seu próprio CR, avaliado individualmente. Estudos aplicados reportam em geral apenas os índices das matrizes agregadas (Alizadeh *et al.*, 2020; Lee, 2009a). Este estudo expõe o CR BOCR individual para tornar visível a distribuição da consistência da matriz estratégica antes da agregação, sendo a consistência uma medida de qualidade do dado de entrada (Salomon; Gomes, 2024). A Tabela 4 apresenta o CR BOCR dos doze respondentes, codificados de R1 a R12 para preservar o anonimato.

Tabela 4 – Razões de consistência individuais dos 12 respondentes

ID Respondente	CR BOCR (matriz 4 × 4)
R1	1,21%
R2	21,69%
R3	27,21%
R4	48,02%
R5	19,96%
R6	46,10%
R7	9,36%
R8	19,62%
R9	25,97%
R10	18,00%
R11	8,45%
R12	6,94%
Média geral	**21,04%**

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: CR BOCR refere-se à matriz estratégica 4 × 4 dos méritos Benefícios, Oportunidades, Custos e Riscos, obtido pelo método do autovetor principal, conforme a Equação 1. No AHP, a consistência é avaliada por matriz. Cada matriz é aceita quando CR ≤ 10% (Saaty, 1977;1980). Identificadores de R1 a R12 anonimizados, atribuídos na ordem cronológica de conclusão do questionário, a mesma adotada no Apêndice G.

Quatro dos doze respondentes apresentaram CR BOCR ≤ 10% na matriz estratégica, com amplitude de 1,21% a 48,02% e média de 21,04%. Os oito demais ficaram acima do limite nessa matriz. As matrizes de subcritérios e de Magnitude foram avaliadas individualmente pelo mesmo critério.

A distribuição das razões individuais nas seis matrizes de cada respondente consta do Apêndice G. Quarenta e sete das setenta e duas matrizes superaram o limite de 10%, com variação sistemática entre as tarefas. As matrizes de Benefícios e de Oportunidades registraram quatro e cinco casos acima do limite, a matriz estratégica registrou oito, e as matrizes de Magnitude, de Custos e de Riscos registraram dez cada. Nenhum respondente permaneceu no limite nas seis matrizes e dois ficaram acima em todas elas. O gradiente é compatível com

diferenças no grau de abstração da comparação, com os menores índices nas matrizes que confrontam critérios operacionais de mesma natureza e os maiores nas que confrontam magnitudes de impacto e dimensões de custo de horizontes temporais distintos. O efeito manifesta-se nas matrizes de ordem quatro e cinco, que contêm comparações redundantes capazes de expor contradições, e não nas matrizes 2 × 2 de alternativas, trivialmente consistentes por conterem uma única comparação. Na matriz estratégica, que confronta méritos de naturezas distintas, a dificuldade é mais acentuada, como evidencia o teste de dispersão da Tabela 5, no qual apenas a comparação entre Benefícios e Oportunidades atingiu coesão. O padrão distribui-se pelo painel e é compatível com a complexidade cognitiva da tarefa, sem permitir isolá-la de outras causas. O padrão é compatível com a dependência da inconsistência em relação às propriedades da tarefa registrada por Bozóki *et al.* (2013) e apresentada na Seção 2.3.1.

Uma explicação plausível do padrão está no desenho do procedimento de coleta. O instrumento aplicou setenta e duas comparações pareadas por respondente em formulário eletrônico autoadministrado, com as instruções sobre o problema, a hierarquia e a escala fundamental apresentadas na própria interface, conforme a Seção 3.4.2.1, e registrou as respostas sem cálculo da razão de consistência durante o preenchimento e sem devolutiva que permitisse a revisão dirigida dos julgamentos. O procedimento do AHP prevê a revisão das matrizes que superam o limite de aceitação (Saaty, 1977), etapa que o protocolo adotado não contemplou. A natureza dos julgamentos verbais concorre para o resultado, e as preferências humanas não se ajustam a uma fórmula precisa (Saaty, 1977), condição que o limiar de 10% já acomoda e que não explica, isoladamente, a proporção observada. A ausência de verificação da consistência durante a coleta é retomada na Seção 5.3 entre as limitações do estudo.

A distribuição observada encontra paralelo na literatura. Morgan (2017) reporta proporção semelhante em aplicação do AHP a painel de cinquenta e oito profissionais e interessados do setor pesqueiro, com 75,9% dos respondentes acima do limite de 0,1 em matriz de ordem cinco, e destaca que o resultado evidencia a necessidade de considerar a adequação do método a respondentes não familiarizados com a técnica. No mesmo estudo, os praticantes diretos da atividade apresentaram inconsistência significativamente maior que os demais interessados, resultado que dissocia a proximidade com o objeto da decisão da coerência cardinal dos julgamentos. Ishizaka, Balkenborg e Kaplan (2011) obtiveram distribuição próxima em experimento controlado com vinte e um estudantes universitários de experiência profissional limitada e sem contato prévio com o método, no qual apenas 31% dos participantes registraram CR igual ou inferior a 10%, e verificaram ausência de correlação entre o grau de

inconsistência das comparações pareadas e a variação das ordenações declaradas pelo mesmo participante ao longo do experimento. Os dois estudos, de perfis opostos quanto à senioridade e à proximidade com o objeto avaliado, convergem na dissociação entre a qualificação do respondente e a consistência cardinal das comparações.

A composição do painel seguiu o critério de autoridade decisória e de cobertura funcional, adequado ao grupo que atua como unidade decisória (Forman; Peniwati, 1998). Selecionar participantes apenas pela familiaridade com métodos multicritério poderia afastar o painel dos decisores efetivos, sem assegurar maior consistência. Essa justificativa de composição não exclui efeitos de experiência, compreensão ou perfil dos respondentes. A verificação computacional da Seção 4.3 sustenta a correção dos cálculos testados; o desenho da coleta permanece uma explicação plausível da inconsistência, não uma causa isolada empiricamente.

A atribuição da inconsistência à natureza da comparação verbal suscita a representação dos julgamentos por números difusos, examinada na Seção 2.3.1. A adoção dessa representação privaria a análise do indicador de qualidade do dado de entrada aqui adotado. A razão de consistência mantém-se, portanto, como indicador reportável da qualidade dos julgamentos, atributo que Ahmed e Kilic (2024) apontam como vantagem do AHP frente a métodos que não o incorporam.

A consistência de cada matriz e a coesão do painel são medidas distintas, conforme a Seção 2.3.1 (Dong *et al.*, 2010). A análise foi complementada pelo teste de dispersão de Saaty e Vargas (2007), com julgamentos coesos quando a probabilidade acumulada é inferior a 5%. A Tabela 5 apresenta o resultado para as seis comparações da matriz estratégica BOCR.

Tabela 5 – Dispersão geométrica das comparações da matriz estratégica BOCR

Comparação	Dispersão geométrica	p-valor	Coesão a 5%
B vs O	2,33	0,019	Sim
B vs C	3,43	0,446	Não
B vs R	3,03	0,225	Não
O vs C	3,56	0,520	Não
O vs R	3,36	0,408	Não
C vs R	2,56	0,055	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: dispersão geométrica e teste de coesão conforme Saaty e Vargas (2007), com a distribuição Gamma ajustada pelos autores para grupos de doze membros; julgamentos coesos quando a probabilidade acumulada é inferior a 5%.

Apenas a comparação entre Benefícios e Oportunidades atingiu coesão de 5%, e a comparação entre Custos e Riscos situou-se no limiar. Nas demais 66 comparações do instrumento, 18 atingiram coesão, sendo uma das seis na matriz de Magnitude, dezesseis das quarenta nas matrizes de subcritérios e uma das vinte nas comparações entre alternativas, conforme o Apêndice D. A cobertura das seis áreas funcionais decorre da abrangência dos méritos avaliados e está caracterizada na Tabela 3. Para comparações de dispersão elevada, Saaty e Vargas (2007) indicam a discussão adicional dos julgamentos ou a divisão do painel em subgrupos homogêneos, recomendação incorporada à Seção 5.3.

A inconsistência das matrizes individuais não afeta os julgamentos locais de desempenho das alternativas nos vinte subcritérios, feitos em matrizes 2 × 2 de consistência trivial, mas pode afetar indiretamente a síntese global pelos pesos atribuídos aos méritos e aos subcritérios, razão pela qual a consistência agregada foi avaliada separadamente. No procedimento AIJ, a inclusão dos julgamentos individuais na média geométrica depende da definição do grupo como unidade decisória (Forman; Peniwati, 1998). Os doze respondentes foram preservados na agregação, pela qualificação técnica do painel, pela homogeneidade de experiência e nível hierárquico e pelo objetivo de representar a preferência coletiva da unidade decisória. A decisão torna explícita e delimitada a inconsistência das matrizes individuais, sem eliminá-la, e a média geométrica não suprime a subjetividade dos julgamentos nem valida automaticamente matrizes inconsistentes (Saaty; Vargas, 2007).

A dispersão observada situa a agregação fora da condição em que Saaty e Vargas (2007) consideram a média geométrica representativa do julgamento do grupo, verificada quando a probabilidade acumulada é inferior a 5%, e os autores recomendam nesse caso a discussão adicional das comparações ou a divisão do painel em subgrupos homogêneos. A agregação foi mantida por decisão declarada, e o resultado não se interpreta como consenso homogêneo do painel. A média geométrica dos julgamentos individuais (AIJ) preserva a propriedade de reciprocidade das matrizes (Forman; Peniwati, 1998). Os limiares de grupo determinados para o método do autovetor, apresentados na Seção 2.3.1, são de quarenta respondentes em matrizes 4 × 4 e vinte e cinco em matrizes 5 × 5 (Aull-Hyde; Erdogan; Duke, 2006). Com doze respondentes, o painel situa-se abaixo desses limiares, e a consistência agregada constitui resultado empírico deste estudo, não propriedade garantida, já que as seis matrizes agregadas atenderam ao limite de Saaty (1977).

Tabela 6 – Índices de consistência das matrizes agregadas

Matriz	λ_{max}	CI	CR (%)
BOCR (n=4)	4,0286	0,0095	1,06%
Magnitude (n=4)	4,0698	0,0233	2,58%
Benefícios (n=5)	5,0494	0,0123	1,10%
Oportunidades (n=5)	5,0414	0,0103	0,92%
Custos (n=5)	5,1165	0,0291	2,60%
Riscos (n=5)	5,0626	0,0157	1,40%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: CI e CR calculados conforme as Equações (2) e (3). Índices Aleatórios: RI(4) = 0,90; RI(5) = 1,12 (Salomon; Gomes, 2024). Limite de aceitação: CR ≤ 10% (Saaty, 1977). Todas as matrizes agregadas apresentam CR inferior a 3%, situando-se entre 3,8 e 10,9 vezes abaixo do limite de aceitação.

As seis matrizes agregadas apresentaram CR inferior a 3%, sendo 1,06% na matriz estratégica BOCR e 2,58% na de Magnitude, e entre 0,92% em Oportunidades e 2,60% em Custos nas quatro matrizes de subcritérios. No nível agregado, os julgamentos produziram matrizes com coerência interna suficiente para o cálculo das prioridades que alimentam a síntese BOCR. Entre elas, a de Custos apresentou o maior CR agregado, à frente da de Magnitude. O mérito Custos compara o valor do investimento, a infraestrutura digital e o custo de operação, o payback, a capacitação contínua e os custos de descarte, dimensões de horizontes e bases distintas. O payback recebeu peso local de 0,4166, o valor do investimento, 0,1573, e a infraestrutura digital, 0,1543. A comparação entre retorno temporal, dispêndio inicial e custos recorrentes demanda maior esforço cognitivo e ajuda a explicar o CR relativo mais alto. O CR mede a coerência interna das comparações, não a validade empírica futura da alternativa escolhida (Salomon; Gomes, 2024), e as prioridades obtidas constituem a estrutura de preferência do painel no contexto do caso de aplicação.

A consequência da distribuição das razões individuais para a decisão depende de três distinções. A primeira separa a coerência de cada matriz da validade das prioridades. O autovetor principal representa as prioridades enquanto a matriz é pequena perturbação de uma matriz consistente, propriedade que Saaty (2003) associa ao julgamento sobre intangíveis, e deixa de representá-las sob inconsistência elevada, conforme a Seção 2.3.1. Os vetores das matrizes individuais acima do limite não são, portanto, representações confiáveis das prioridades de cada respondente e não são usados diretamente na síntese, embora os julgamentos correspondentes integrem as seis matrizes agregadas da Tabela 6.

A segunda distinção separa ruído de viés. Uma leitura compartilhada e equivocada das perguntas pode produzir matrizes coerentes e um agregado consistente, porém inválido; também pode coexistir com inconsistência individual e divergência entre respondentes. A razão

de consistência não identifica esse viés, e a distinção de Grzybowski (2016) entre a inconsistência da matriz e a utilidade da matriz para a estimação das prioridades explica por que o cenário permanece indetectável. Contradições individuais e divergência entre respondentes podem decorrer da dificuldade da comparação. Com razões acima do limite em 47 das 72 matrizes individuais, coesão em apenas 19 das 72 comparações e razões inferiores a 3% nas seis matrizes agregadas, o padrão observado é compatível com essa hipótese. A média geométrica pode atenuar desvios individuais, com fundamento no modelo de erro multiplicativo da Seção 2.3.1 (Crawford; Williams, 1985), e a consistência do agregado é compatível com essa atenuação, sem revelar se também há vieses compartilhados. O padrão não prova a validade das prioridades e não descarta a contaminação sistemática do agregado por dificuldades de compreensão ou vieses compartilhados. A consistência do agregado, por si, tampouco certifica a presença de sinal, porque a agregação pela média geométrica de matrizes individuais aleatórias também produz agregados consistentes quando o grupo é suficientemente grande (Aull-Hyde; Erdogan; Duke, 2006). A leitura apoia-se, por isso, no padrão conjunto das razões individuais e da dispersão, e não no CR agregado isolado.

A terceira distinção separa o lugar da inconsistência do lugar da decisão. As matrizes estratégica e de Magnitude produzem os pesos dos méritos, cuja variação não altera o ranking em toda a faixa admissível, conforme a Seção 4.10, e as matrizes de subcritérios produzem prioridades cujo efeito sobre o ranking é verificado na Seção 4.9 pela permutação dos méritos negativos e pela exclusão de respondentes. A ordenação é mais vulnerável à inconsistência quando as prioridades são próximas, como verificam Ishizaka e Lusti (2006). As diferenças entre as alternativas em Custos, de 0,0194, e em Riscos, de 0,0392, situam-se na ordem de grandeza em que esse efeito poderia operar. A diferença de 0,2002 em Benefícios, uma ordem de grandeza acima da menor delas, ajuda a explicar a estabilidade nos testes realizados, sem impedir mudanças sob outras perturbações dos julgamentos.

A análise da consistência estabelece três resultados e delimita o que permanece fora de seu alcance. Nos cálculos testados, a validação computacional da Seção 4.3 sustenta a correção do motor. O desenho do procedimento de coleta é explicação plausível das razões individuais acima do limite, não isolada empiricamente de outras causas concorrentes, entre as quais a dificuldade da comparação, diferenças de compreensão conforme o conteúdo julgado e divergência legítima de preferências. O padrão conjunto das razões individuais e da dispersão é compatível com a dificuldade da comparação, e a verificação dessas causas exigiria esclarecimento com os respondentes, ressalvado na Seção 5.3. A inconsistência incide nas matrizes que produzem os pesos dos méritos e dos subcritérios; a variação dos pesos

estratégicos é examinada na Seção 4.10. A validade das prioridades não é demonstrável por indicadores de consistência, conforme a Seção 5.3, e a robustez do resultado é verificada nas Seções 4.9 e 4.10 por permutação, exclusão de respondentes e variação unidimensional dos pesos.

4.3 VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL DA FERRAMENTA DESENVOLVIDA

A validação computacional verificou se o motor de cálculo do software processa os julgamentos de forma correta. Essa etapa é distinta da análise de consistência. A consistência avalia a coerência interna dos julgamentos emitidos pelos especialistas. A validação computacional avalia o algoritmo. A verificação cobriu as duas etapas do cálculo, a agregação dos julgamentos individuais e a derivação das prioridades e da razão de consistência a partir das matrizes agregadas. A Tabela 7 apresenta os resultados da validação computacional do software desenvolvido contra a biblioteca AhpAnpLib.

Tabela 7 – Validação computacional do software desenvolvido contra AhpAnpLib

Matriz	ΔAIJ Máx.	CR (Sistema)	CR (AhpAnpLib)	ΔPesos Máx. (%)	ΔCR
BOCR (n=4)	0,00004	1,06%	1,10%	0,000%	0,039%
Benefícios (n=5)	0,00005	1,10%	1,10%	0,000%	0,002%
Oportunidades (n=5)	0,00005	0,92%	0,90%	0,000%	0,024%
Custos (n=5)	0,00005	2,60%	2,60%	0,000%	0,000%
Riscos (n=5)	0,00005	1,40%	1,40%	0,000%	0,003%
Magnitude (n=4)	0,00005	2,58%	2,60%	0,000%	0,017%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: ΔAIJ Máx. = maior diferença absoluta entre os elementos da matriz agregada produzida pelo sistema, reportada no Apêndice E, e a média geométrica dos julgamentos individuais dos doze respondentes, recalculada de forma independente. ΔPesos Máx. = maior diferença absoluta entre as componentes homólogas dos vetores de prioridade obtidos nos dois ambientes, em pontos percentuais. ΔCR = diferença absoluta entre as razões de consistência obtidas nos dois ambientes. A AhpAnpLib reporta a razão de consistência com três casas decimais, o que corresponde a uma casa decimal na forma percentual.

A coluna ΔAIJ Máx. registra a verificação da agregação. Os elementos das seis matrizes agregadas produzidas pelo sistema coincidem com a média geométrica dos julgamentos individuais dos doze respondentes, recalculada de forma independente, com diferença máxima de 0,00005, abaixo da quarta casa decimal em que as matrizes são reportadas

no Apêndice E. As vinte matrizes de alternativas, de ordem 2 × 2, foram submetidas ao mesmo procedimento, e as prioridades locais reportadas no Apêndice F coincidem com a agregação recalculada, com diferença máxima de 0,00005. A verificação da agregação abrange, portanto, a totalidade dos oitocentos e sessenta e quatro julgamentos coletados, e confirma que a média geométrica preserva a reciprocidade das matrizes, conforme demonstrado por Forman e Peniwati (1998).

Os vetores de prioridade coincidiram nas seis matrizes na precisão de quatro casas decimais adotada no relato dos pesos, e os valores publicados nas Tabelas 8 e 9 são reproduzidos pela implementação de referência. A coincidência abrange a matriz de Magnitude, que origina os *rescaling weights* empregados na síntese pela Equação 8. Os resíduos na razão de consistência, todos inferiores a 0,04 ponto percentual, refletem a precisão com que a AhpAnpLib reporta essa grandeza, expressa com três casas decimais na razão, o que equivale a uma casa decimal na forma percentual. Nas matrizes de Benefícios e de Riscos o ponto fica evidente. Os dois ambientes exibem a mesma razão de consistência, e o resíduo remanescente, de 0,002 e de 0,003 ponto percentual, decorre do arredondamento do valor reportado pela biblioteca. Como os vetores de prioridade coincidem, o autovalor principal e o índice de consistência derivados de cada matriz são os mesmos nos dois ambientes, e a razão de consistência anterior ao arredondamento também.

A seção anterior mostrou que as seis matrizes agregadas apresentam CR inferior a 3%, ainda que parte das matrizes individuais tenha superado o limite de 10%. Confirma-se, pela validação computacional, que o software agregou os julgamentos pela média geométrica e derivou as prioridades e a consistência de forma aderente à AhpAnpLib. Os índices individuais reportados no Apêndice G e os índices agregados da Tabela 6 são produzidos pela mesma rotina de cálculo do autovetor principal, e a aderência verificada alcança, portanto, os dois níveis. As duas verificações, uma sobre a coerência das matrizes agregadas e outra sobre o cálculo, sustentam o uso dos resultados nas seções seguintes. A inconsistência individual permanece como limitação, retomada na Seção 5.3.

4.4 AVALIAÇÃO DA CAMADA DE ANÁLISE DE INTERPRETABILIDADE ASSISTIDA POR IA (XAI)

A saída gerada pela função Parecer IA foi avaliada após a validação computacional do motor de cálculo. A verificação concentrou-se na aderência da interpretação aos resultados quantitativos do modelo, às descrições cadastradas das alternativas e ao *corpus* bibliográfico

controlado. O relatório completo consta no Apêndice A. A função teve papel interpretativo e posterior ao cálculo: o ranking permaneceu definido pelos julgamentos dos especialistas, pelos cálculos AHP-BOCR, pela validação computacional e pela síntese global.

No resumo da submissão, a função registrou A1 à frente de A2 e indicou ausência de ponto de virada na análise de sensibilidade. Esses dois pontos coincidem com o resultado do método Subtrativo completo e com a análise de sensibilidade realizada no software. A saída também aplicou corretamente a lógica BOCR. A priorização de A1 foi associada a desempenho superior nos méritos positivos e a desempenho favorável nos méritos negativos. Os menores valores de Custos e Riscos foram tratados como menor exposição relativa, e não como uma desvantagem.

A interpretação qualitativa diferenciou as alternativas com base nas descrições técnicas cadastradas. A maior separação entre A1 e A2 foi associada ao mérito Benefícios e à natureza operacional da A1, voltada ao controle em tempo real dos queimadores. A A2 foi interpretada como uma solução de engenharia e de simulação orientada à modelagem CFD. A saída também apontou limitações da aplicação, como o tamanho do painel e a homogeneidade de gênero. Esses elementos não alteram os cálculos, mas delimitam o alcance da interpretação.

A menção à infraestrutura para análise de Disparate Impact descreve uma capacidade adicional do software, cuja aplicação depende da definição de um atributo sensível e de grupos de comparação. A classificação “aceito” que a acompanha é decisão editorial da camada.

A revisão humana identificou quatro imprecisões factuais na saída da camada de IA. A primeira é a afirmação de que todos os respondentes apresentaram CR individual inferior a 10%, com faixa de 1,1% a 9,6%; a Tabela 4 registra oito respondentes acima do limite na matriz estratégica, e a faixa citada corresponde a uma média diluída entre as vinte e seis matrizes de cada respondente, vinte delas de ordem 2 × 2 e consistência trivial. A segunda é a descrição do painel como distribuído à razão de três respondentes por mérito BOCR, desenho que não existiu. Os doze respondentes responderam à totalidade das setenta e duas comparações. A terceira é a citação de uma página inexistente em Wijnmalen (2007), cujo artigo abrange as páginas 892 a 905; o número da equação indicado está correto. A quarta é a invocação da condição de consistência de grupo de Xu (2000 *apud* Escobar; Aguarón; Moreno-Jiménez, 2004), cuja premissa, a consistência aceitável de todas as matrizes individuais, não se verifica neste estudo. As quatro imprecisões não alteram os resultados numéricos, calculados de forma determinística pelo motor de cálculo, e reforçam a necessidade da revisão humana prevista na arquitetura.

A origem das quatro imprecisões foi rastreada na configuração da camada. A primeira e a terceira decorrem do conjunto de exemplos incorporado ao prompt do sistema, que ilustra o estilo exigido por meio de trechos integralmente redigidos. Um desses exemplos contém a faixa de razões de consistência reproduzida no parecer, e outro atribui a Wijnmalen (2007) página fora do intervalo do artigo. A segunda decorre do escopo dos dados descritivos enviados à camada, que informam a caracterização funcional do painel e os pesos dos méritos e solicitam o exame da correspondência entre ambos, sem informar a estrutura do instrumento, na qual os doze respondentes julgaram a totalidade das comparações. A quarta decorre do registro das referências autorizadas, que enuncia os resultados de Xu (2000) e de Escobar, Aguarón e Moreno-Jiménez (2004) sem as condições sob as quais se aplicam. As quatro causas situam-se na configuração textual da camada e nos metadados do *corpus* bibliográfico, e não nos valores calculados, verificados na Seção 4.3.

A avaliação indica que a camada preservou a direção do ranking e contribuiu para organizar a leitura qualitativa da decisão, com aderência que não alcança a descrição da consistência nem a fundamentação das afirmações, onde estão as imprecisões identificadas. O relatório reproduzido no Apêndice A foi gerado antes do cálculo final e apresenta divergências em pesos e scores em relação às Tabelas 8 e 12, o que impede afirmar sua fidelidade numérica aos resultados publicados. As divergências decorrem da versão dos dados empregada na geração, e não das imprecisões registradas nesta seção, e o relatório é preservado na forma original como objeto da avaliação. A revisão humana permaneceu necessária para selecionar referências, ajustar o grau de certeza das conclusões e decidir quais elementos seriam incorporados ao texto acadêmico.

4.5 PESOS ESTRATÉGICOS BOCR E PESOS DOS SUBCRITÉRIOS

A aplicação do AHP-BOCR resultou nos pesos estratégicos dos quatro méritos. Os pesos expressam a importância relativa atribuída pelo painel a cada dimensão da decisão e foram obtidos pela agregação dos julgamentos individuais dos doze especialistas pelo método AIJ, conforme a Seção 4.2.

Os pesos estratégicos obtidos foram: Benefícios = 0,3723; Riscos = 0,2786; Custos = 0,1974; e Oportunidades = 0,1517, normalizados para soma unitária conforme Wijnmalen (2007). Os méritos favoráveis, Benefícios e Oportunidades, somam 0,5240, e os méritos desfavoráveis, Custos e Riscos, somam 0,4760, seguindo a distinção entre méritos positivos e negativos do método (Saaty; Ozdemir, 2003). A distribuição indica um peso ligeiramente maior

atribuído aos efeitos favoráveis das alternativas, mantendo-se a relevância dos fatores de custo e de risco.

Tabela 8 – Pesos estratégicos dos méritos BOCR

Mérito	Peso	Peso (%)	*Rescaling weight* (s)	Orientação
Benefícios	0,3723	37,23%	0,4393	Positiva
Oportunidades	0,1517	15,17%	0,1593	Positiva
Custos	0,1974	19,74%	0,1868	Negativa
Riscos	0,2786	27,86%	0,2146	Negativa
Total	**1,0000**	**100,00%**	**1,0000**	**-**

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O mérito Benefícios recebeu o maior peso estratégico, de 0,3723. O painel atribuiu maior importância aos efeitos associados à geração de valor operacional, como a produtividade, a qualidade, a segurança ocupacional, a redução de emissões e a conservação de recursos. Para essa prioridade pesa a criticidade das estufas de cura para a qualidade do produto, o consumo energético e a continuidade operacional. O mérito Riscos recebeu o segundo maior peso, de 0,2786. A adoção de tecnologias de I4.0 nas estufas não foi avaliada apenas pela capacidade de gerar ganhos. O painel também ponderou a possibilidade de falhas de integração, de segurança cibernética, de dependência tecnológica, de impactos sociais e de resíduos eletrônicos. Em uma planta automotiva em operação, esses fatores afetam a disponibilidade, a segurança, a manutenção e a governança tecnológica.

A Tabela 8 apresenta também os *rescaling weights* obtidos da matriz de Magnitude, de 0,4393 para Benefícios, 0,1593 para Oportunidades, 0,1868 para Custos e 0,2146 para Riscos, normalizados para soma unitária e aplicados exclusivamente nas Equações 8 e 9. A ordenação dos *rescaling weights* coincide com a dos pesos pessoais, com perfis próximos, o que sugere discriminação apenas parcial entre os construtos de importância e de magnitude pelo painel. A dependência ordinal e cardinal do resultado em relação ao vetor de magnitude é examinada na Seção 4.9, e a manutenção do ranking ali verificada decorre da dominância da A1 nos quatro méritos. A validação da elicitação exigiria vincular explicitamente as comparações de magnitude ao referente de normalização das prioridades distributivas, procedimento indicado na Seção 5.3.

O mérito Custos recebeu um peso de 0,1974. Ainda que considerados, os aspectos econômicos não dominaram a estrutura de avaliação. O resultado é compatível com a proposta do AHP-BOCR, que trata o retorno financeiro como parte da decisão, e não como critério único.

O mérito Oportunidades recebeu peso de 0,1517, o menor entre os quatro. O painel atribuiu menor prioridade relativa aos efeitos futuros e aos associados à maturidade tecnológica, em comparação com os benefícios operacionais e os riscos de implementação. Os méritos de efeito mais direto e de curto prazo, Benefícios e Custos, somam 56,97% do peso total, e os de efeito contingente ou de horizonte mais longo, Oportunidades e Riscos, somam 43,03%. A predominância de efeitos de curto prazo é coerente com a prática industrial de avaliação de investimentos, na qual as dimensões econômica e financeira predominam (Almeida *et al.*, 2023).

Os cinco subcritérios com maior peso global foram Qualidade (B2, 0,1131), Ergonomia, Saúde e Segurança Ocupacional (B3, 0,0844), Eficiência e Produtividade (B1, 0,0830), Payback (C3, 0,0823) e Segurança Cibernética (R1, 0,0806). Juntos, esses cinco subcritérios representam 44,34% do peso total do modelo. A composição combina três subcritérios de Benefícios, um de Custos e um de Riscos, e abrange as perspectivas de competitividade e de aspectos sociotécnicos. Os pesos expressam a estrutura de preferência de doze especialistas de uma única montadora, no contexto e no período de coleta, e não autorizam generalização para o setor. A ressalva vale para todos os pesos apresentados neste capítulo e é retomada na Seção 5.3.

O maior peso global do modelo coube ao subcritério Qualidade, com 0,1131. No plano técnico, as estufas de cura desempenham um papel crítico na consolidação do revestimento. Variações térmicas durante o processo afetam a aderência, o brilho e a resistência da pintura e geram defeitos cuja correção implica retrabalho, descarte ou intervenções corretivas em etapas posteriores da linha. O impacto desses defeitos vai além do desempenho operacional. A qualidade percebida do produto é antecedente do valor percebido pelo consumidor e da intenção de compra, relação formulada como um modelo *means-end* aplicável a diversas categorias de produtos (Zeithaml, 1988). Em ambiente de varejo, a qualidade percebida também reduz o risco percebido na aquisição, e o valor percebido medeia a relação entre a qualidade e a disposição de compra (Sweeney; Soutar; Johnson, 1999). No setor automotivo, Hamzah e Pontes (2024) verificaram, em compradores de automóveis, que a qualidade percebida influencia positivamente o valor percebido e exerce efeito direto sobre a intenção de compra, no contexto de uma relação consumidor-marca. A estabilidade térmica das estufas de cura preserva a integridade do acabamento, dimensão da qualidade do produto, e pode, por essa via, repercutir na qualidade percebida pelo consumidor e no valor de marca. O maior peso atribuído a Qualidade é compatível com essa interpretação.

A Tabela 9 apresenta os pesos locais, os pesos dos respectivos méritos e os pesos globais dos vinte subcritérios, permitindo identificar os fatores de maior influência na decisão.

Tabela 9 – Pesos locais e globais dos subcritérios

Mérito	Subcritério	Peso local	Peso do mérito	Peso global
Benefícios	B1. Eficiência e Produtividade	0,2230	0,3723	0,0830
	B2. Qualidade	0,3038	0,3723	0,1131
	B3. Ergonomia, Saúde e Segurança Ocupacional	0,2268	0,3723	0,0844
	B4. Redução de Emissões	0,0957	0,3723	0,0356
	B5. Conservação de Recursos	0,1507	0,3723	0,0561
Oportunidades	O1. Transformação Digital	0,2327	0,1517	0,0353
	O2. Aumento da Maturidade Tecnológica	0,1647	0,1517	0,0250
	O3. Melhoria do Ambiente de Trabalho	0,2317	0,1517	0,0351
	O4. Reforço da Reputação Corporativa	0,1429	0,1517	0,0217
	O5. Apoio a Certificações e *Compliance*	0,2280	0,1517	0,0346
Custos	C1. Valor do Investimento	0,1573	0,1974	0,0311
	C2. Infraestrutura Digital e Custo de Operação	0,1543	0,1974	0,0305
	C3. Payback	0,4166	0,1974	0,0823
	C4. Capacitação Contínua e Gestão do Conhecimento	0,1663	0,1974	0,0328
	C5. Custos de Descarte e Conformidade Regulatória	0,1055	0,1974	0,0208
Riscos	R1. Segurança Cibernética	0,2895	0,2786	0,0806
	R2. Complexidade de Integração	0,2876	0,2786	0,0801
	R3. Dependência Tecnológica	0,2083	0,2786	0,0580
	R4. Impactos Sociais	0,1276	0,2786	0,0355
	R5. Aumento de Resíduos Eletrônicos	0,0871	0,2786	0,0243

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na linha de pintura avaliada, as áreas próximas às estufas de cura expõem os trabalhadores a temperaturas elevadas, vapores orgânicos e ruído contínuo. Nesse ambiente, a redução de intervenções manuais é um objetivo operacional relevante. O subcritério Ergonomia, Saúde e Segurança Ocupacional, segundo em peso global, é o único da perspectiva de aspectos sociotécnicos entre os cinco de maior peso. A literatura registra impactos mensuráveis de acidentes ocupacionais sobre indicadores de desempenho corporativo, entre eles custos de compensação, interrupções de produção e efeitos sobre a margem operacional, e associa positivamente indicadores de segurança ao desempenho operacional em ambientes

industriais (Fernández-Muñiz; Montes-Peón; Vázquez-Ordás, 2009; Kim; Park, 2021). Na pintura automotiva, a substituição de inspeções manuais por monitoramento remoto e a redução da presença humana em áreas de exposição térmica afetam, simultaneamente, a segurança das equipes e a estabilidade do processo. A dupla contribuição oferece interpretação plausível para o peso elevado.

As estufas de cura estão entre os maiores consumidores de gás natural da planta. O subcritério Eficiência e Produtividade, terceiro em peso global, traduz essa preocupação na estrutura de critérios.

O subcritério Payback tem o maior peso local no mérito Custos (0,4166) e o quarto lugar no ranking global. A política de investimentos da empresa estudada utiliza o tempo de retorno como um dos critérios centrais para a aprovação de projetos, e a estrutura de avaliação reflete essa prática. O retorno financeiro tende a ser priorizado nas decisões de investimento tecnológico em I4.0, mesmo quando a estrutura de avaliação contempla múltiplos critérios (Almeida *et al.*, 2023; Bai; Sarkis, 2017; Lefley, 1996). Os subcritérios dos méritos Benefícios, Oportunidades e Riscos somam 80,26% do peso global agregado neste estudo, e a decisão do painel não se reduziu a um único critério financeiro. Entre os elementos econômicos, contudo, o tempo de retorno foi considerado mais relevante do que o valor inicial isolado ou o custo de operação contínua.

Com 0,0806, Segurança Cibernética é o quinto subcritério em peso global e o de maior peso local dentro do mérito Riscos, com 0,2895. Tecnologias de I4.0 aplicadas a estufas de cura conectam sensores, redes industriais, sistemas de controle e camadas de software em integração contínua com a infraestrutura de automação existente, e o subcritério registra essa exposição. A conectividade das fábricas inteligentes amplia a superfície de ataque e pode comprometer dados sensíveis e operações críticas (Lasi *et al.*, 2014; Verhoef *et al.*, 2021). O subcritério Complexidade de Integração segue em quase empate, com peso local de 0,2876 e peso global de 0,0801, e registra a exigência de interoperar com sistemas legados de automação, supervisão e gestão da produção. Em uma planta automotiva em operação contínua, incidentes cibernéticos e falhas de integração entre tecnologias emergentes e sistemas legados podem resultar em paradas de produção, perda de dados de processo e intervenções não planejadas. A concentração do peso de Riscos nesses dois subcritérios evidencia a atenção do painel às vulnerabilidades da digitalização no ambiente avaliado.

A análise dos cinco subcritérios de maior peso global indica que a priorização registrada pelo painel combinou aspectos operacionais, sociotécnicos, econômicos e de segurança tecnológica, sem se concentrar em um único eixo de avaliação. A composição atinge

três méritos do modelo BOCR e duas das três perspectivas decisórias. As interpretações propostas para os cinco pesos são compatíveis com os julgamentos registrados, sem esclarecimento dos motivos individuais, ressalvado na Seção 5.3.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS AVALIADAS

As alternativas avaliadas foram: A1, controle em tempo real dos queimadores com IA, e A2, gêmeo digital CFD para simulação termodinâmica das estufas. A comparação qualitativa realizada no software, com base nas descrições técnicas cadastradas no sistema e apresentadas aos respondentes, mostrou que as duas têm lógicas distintas de geração de valor. A A1 é orientada para a operação em tempo real, com foco no monitoramento contínuo, no controle de combustão, no diagnóstico preditivo, na estabilidade térmica e na redução de anomalias em queimadores. A A2 é orientada para simulação, engenharia e reconfiguração estrutural da estufa, com foco na modelagem CFD, na análise de gradientes térmicos, na recirculação de ar, na geometria interna e na otimização do projeto.

Os pesos globais da Seção 4.5 ganham precisão ao serem confrontados com essa caracterização. A relevância atribuída pelos especialistas a subcritérios como Qualidade, Eficiência e Produtividade, Payback e Complexidade de Integração depende de como cada alternativa contribui para esses fatores. O Quadro 15 organiza a caracterização segundo os quatro méritos do BOCR.

Quadro 15 – Síntese interpretativa dos perfis BOCR das alternativas

Mérito BOCR	Alternativa 1	Alternativa 2
Benefícios	Ganhos contínuos na operação, maior disponibilidade, controle térmico, qualidade da cura, segurança operacional e economia incremental de gás.	Ganhos estruturais por meio de simulação, otimização de geometria, identificação de pontos frios, de recirculação inadequada e de gradientes térmicos.
Oportunidades	Digitalização do chão de fábrica, IIoT, monitoramento em tempo real, desenvolvimento de competências operacionais e dados auditáveis.	Sofisticação analítica da engenharia, integração entre PLM e MES, simulação avançada e apoio à reengenharia de processos.
Custos	Menor investimento inicial e menor custo anual, mas payback estimado mais longo.	Maior investimento inicial e maior custo anual, mas payback estimado mais curto, condicionado à execução de melhorias estruturais.
Riscos	Maior exposição cibernética por meio da integração em tempo real com o controle industrial, porém menor dependência de ativos altamente especializados.	Menor exposição direta à cibersegurança, porém maior complexidade técnico-modelar, maior dependência de CFD/HPC e necessidade de calibração experimental.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A síntese consolida as características técnicas das alternativas cadastradas no sistema e apresentadas aos respondentes, organizadas conforme os quatro méritos da estrutura BOCR. A caracterização é compatível com a leitura da camada de interpretabilidade assistida por IA, apresentada na Seção 4.4, que identificou a mesma diferenciação entre as duas alternativas. A comparação entre A1 e A2 envolve duas estratégias distintas de transformação tecnológica. A primeira é operacional, incremental e conectada ao chão de fábrica. A segunda é analítica, estrutural e conectada à engenharia avançada.

4.7 ANÁLISE PELAS PERSPECTIVAS DE COMPETITIVIDADE, ASPECTOS SOCIOTÉCNICOS E SUSTENTABILIDADE

Os vinte subcritérios do modelo foram organizados na estrutura BOCR e classificados nas perspectivas de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade, conforme o Capítulo 2. A leitura dos pesos agregados por perspectiva exige cautela. Cada perspectiva agrupa um número distinto de subcritérios, dez em competitividade, quatro em aspectos sociotécnicos e seis em sustentabilidade. Uma perspectiva pode apresentar peso agregado elevado apenas pelo número de subcritérios que comporta, sem que cada subcritério individual tenha sido considerado relevante. A classificação por perspectivas tampouco é

mutuamente exclusiva. Um subcritério classificado em uma perspectiva pode produzir efeitos alcançados por outra. A soma de pesos por perspectiva não distingue esse cruzamento, e a comparação pareada não o avalia, por não confrontar subcritérios de perspectivas distintas entre si.

Três métricas complementares evitam esse viés. A primeira é o peso agregado, a soma dos pesos globais dos subcritérios de cada perspectiva. A segunda é o peso médio por subcritério, a média aritmética dos pesos globais dos subcritérios da perspectiva. A terceira é a razão de discriminação, o quociente entre o peso médio observado e 1/n, em que n é o número total de subcritérios do modelo, igual a 0,050 para n = 20. A razão de discriminação compara o peso médio observado com o peso uniforme 1/n, valor que corresponde à atribuição de importância igual a todos os subcritérios (Greco *et al.*, 2019; OECD, 2008). Pesos iguais não diferenciam subcritérios essenciais de subcritérios menos importantes (Greco *et al.*, 2019), e o afastamento em relação a esse valor de referência expressa o grau de diferenciação produzido pelos julgamentos do painel. Razões superiores a um indicam um peso médio maior do que o da uniformidade, e razões inferiores a um indicam o contrário. A Tabela 10 apresenta as três métricas.

Tabela 10 – Pesos globais agregados por perspectiva decisória

Perspectiva	Subcritérios associados	Peso agregado	Peso médio por subcritério	Razão de discriminação
Competitividade	B1, B2, O1, O2, C1, C2, C3, R1, R2, R3	61,90%	0,0619	1,24
Aspectos Sociotécnicos	B3, O3, C4, R4	18,80%	0,0470	0,94
Sustentabilidade	B4, B5, O4, O5, C5, R5	19,30%	0,0322	0,64
Total	20 subcritérios	100,00%	0,0500	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A leitura por peso agregado indica predominância da competitividade, com 61,90% do peso global, seguida pela sustentabilidade, com 19,30%, e pelos aspectos sociotécnicos, com 18,80%. Pesa nessa ordenação, porém, o número de subcritérios em cada perspectiva. Pelo peso médio por subcritério, o padrão é distinto. A competitividade mantém a primeira posição, com 0,0619 por subcritério, mas a distância em relação aos aspectos sociotécnicos, com 0,0470, é de aproximadamente 32%, e não de mais de 200%, como sugere a soma agregada. A sustentabilidade, com 0,0322 por subcritério, permanece na terceira posição. A razão de discriminação refina a leitura. A competitividade apresenta razão de 1,24, peso médio 24%

superior à uniformidade. Os aspectos sociotécnicos apresentam uma razão de 0,94, com um desvio de apenas 6% em relação à uniformidade. A sustentabilidade apresenta razão de 0,64, peso médio 36% inferior à uniformidade.

A comparação entre as três métricas separa amplitude de intensidade. A competitividade combina amplitude, o maior número de subcritérios e uma intensidade média superior à da uniformidade. Os aspectos sociotécnicos apresentam foco, poucos subcritérios e intensidade próxima da uniformidade. A sustentabilidade apresenta amplitude moderada e intensidade inferior à da uniformidade; ou seja, múltiplos aspectos ambientais e regulatórios foram considerados na avaliação, mas cada um foi avaliado como de importância relativamente menor. Conforme a Seção 4.5, quatro dos cinco subcritérios de maior peso global pertencem à competitividade e um aos aspectos sociotécnicos, e nenhum subcritério com peso global superior a 0,080 pertence à sustentabilidade. Os aspectos sociotécnicos concentram seu peso em poucos aspectos de alta relevância. A sustentabilidade tem peso distribuído entre múltiplos subcritérios, sem que nenhum deles atinja a faixa superior do modelo.

A predominância da competitividade é consistente com o padrão identificado em estudos sobre adoção de I4.0 na manufatura brasileira. A literatura indica que as expectativas de contribuição da I4.0 ao desempenho industrial brasileiro se concentram na melhoria da qualidade, na redução de custos e no aumento da produtividade, com predominância de aplicações associadas ao controle de processo e à otimização operacional, em detrimento de aplicações associadas à transformação organizacional ampla (Dalenogare *et al.*, 2018; Frank; Dalenogare; Ayala, 2019).

A concentração sob a perspectiva de competitividade, neste estudo, é compatível com o padrão setorial. Almeida *et al.* (2023) identificam que a inclusão da perspectiva sociotécnica na avaliação multicritério pode alterar o ranking de projetos de I4.0, especialmente quando o retorno econômico-financeiro ainda não está claro. Os resultados deste estudo convergem com esse reconhecimento da multidimensionalidade da decisão, mas divergem quanto à intensidade atribuída à perspectiva sociotécnica. Uma possível explicação para a diferença é o escopo do problema, examinado na Seção 5.3. Almeida *et al.* (2023) avaliam portfólio diversificado de projetos, enquanto esta dissertação avalia duas alternativas voltadas a um problema operacional específico. Contador *et al.* (2020), em estudo com líderes de empresas manufatureiras brasileiras, identificam que as oportunidades associadas à I4.0 são percebidas predominantemente em termos de planejamento da produção, competitividade global, qualidade e desempenho de produtos, com avaliação mais modesta dos subcritérios

ambientais. Nas empresas industriais brasileiras, a I4.0 é percebida sobretudo como instrumento de competitividade operacional.

A ordem interna da perspectiva de competitividade refina essa convergência. Os quatro subcritérios de maior peso, Qualidade, Eficiência e Produtividade, Payback e Segurança Cibernética, são os de efeito observável no processo ou no caixa, e os dois que expressam a transformação digital como valor em si, Transformação Digital (O1), com 0,0353, e Aumento da Maturidade Tecnológica (O2), com 0,0250, o menor peso da perspectiva, situam-se entre os quatro de menor peso. A literatura que situa a própria transformação como fonte de vantagem competitiva (Oztemel; Gursev, 2020; Verhoef *et al.*, 2021) não encontra respaldo nos pesos do painel, e a literatura que localiza a expectativa brasileira na melhoria operacional encontra (Dalenogare *et al.*, 2018; Frank; Dalenogare; Ayala, 2019). O peso de Segurança Cibernética, quinto maior do modelo, e o de Complexidade de Integração, sexto, convergem com a identificação da segurança cibernética como principal gargalo da adoção no país (Contieri; Anholon; De Santa-Eulalia, 2022) e com a dificuldade de integração a sistemas legados registrada nas montadoras brasileiras (Muniz Jr.; Ribeiro; Kakavelakis, 2026).

A posição intermediária da sustentabilidade tensiona parte da literatura recente, que defende a centralidade da dimensão ambiental como direcionadora da adoção de I4.0 (Bai *et al.*, 2020; Ghobakhloo, 2020). Múltiplos subcritérios ambientais e regulatórios compõem a perspectiva, somando 19,30% do peso agregado, mas cada um recebeu peso médio inferior à uniformidade. Há três interpretações não excludentes para essa posição. A primeira é que, no contexto industrial brasileiro, a sustentabilidade ainda não foi internalizada como direcionador central da adoção tecnológica e permanece como dimensão complementar, absorvida sobretudo pelo ângulo da eficiência no uso de recursos e pouco pelos ângulos reputacional e regulatório. A segunda é que, em problemas nos quais a redução do consumo energético atende ao mesmo tempo a objetivos econômicos e ambientais, parte do efeito ambiental é capturada por subcritérios classificados na competitividade, em particular Eficiência e Produtividade. A terceira é que a menor intensidade atribuída reflete a ausência de parâmetros consolidados de mensuração. Entre os 192 artigos revisados por Piccarozzi *et al.* (2022), apenas 5 indicam parâmetro preciso para medir o impacto da I4.0 sobre a sustentabilidade, e Beier *et al.* (2020) registram que somente 17 dos 684 fragmentos analisados apresentam evidência empírica para os efeitos de sustentabilidade afirmados. Onde o efeito não dispõe de métrica estabelecida, a comparação pareada apoia-se em percepção e não em evidência. A intensidade dos julgamentos pode ser afetada por isso, em direção que os dados não permitem predeterminar.

A ordem dos pesos dentro da perspectiva permite pesar as três interpretações. Conservação de Recursos (B5) recebeu 0,0561, o maior peso da perspectiva, seguido de Redução de Emissões (B4), com 0,0356, e de Apoio a Certificações e Compliance (O5), com 0,0346, enquanto Aumento de Resíduos Eletrônicos (R5), Reforço da Reputação Corporativa (O4) e Custos de Descarte e Conformidade Regulatória (C5) receberam os três menores pesos globais do modelo, entre 0,0208 e 0,0243. Os dois subcritérios de maior peso são os que dispõem de base física de mensuração no processo, o consumo de gás natural e as emissões de combustão registrados na Seção 2.1.3, e os três de menor peso são os que dependem de percepção ou de efeito diferido sem métrica estabelecida na linha, distribuição compatível com a terceira interpretação, mas insuficiente para excluir as demais ou estabelecer a causa da ponderação observada. A terceira leitura é testável e sugere que a ponderação de critérios ambientais em modelos multicritério depende menos da importância declarada e mais da disponibilidade de instrumentos de medida. A sensibilidade à classificação adotada pode ser quantificada. Na cura de tinta, a redução do consumo de gás natural e a redução de emissões constituem o mesmo efeito físico, e o painel atribuiu 0,0830 ao primeiro, em Eficiência e Produtividade, e 0,0356 ao segundo, em Redução de Emissões. A reclassificação de Eficiência e Produtividade na perspectiva de sustentabilidade elevaria o peso agregado desta de 19,30% para 27,61% e o peso médio por subcritério de 0,0322 para 0,0394, sem alteração de nenhum julgamento. A diferença mede o efeito da reclassificação sobre os pesos agregados por perspectiva, e não a intenção ambiental dos respondentes.

O resultado responde ainda a outra indicação de Almeida *et al.* (2023), distinta da já discutida sobre a perspectiva sociotécnica. Almeida *et al.* (2023) reconhecem como limitação do modelo que propõem o fato de a sustentabilidade não constituir dimensão central, permanecendo diluída entre os elementos das perspectivas econômica, financeira e sociotécnica, e indicam que ela precisaria tornar-se dimensão adicional. O modelo desta dissertação adota essa indicação e trata a sustentabilidade como perspectiva autônoma, com seis subcritérios próprios distribuídos pelos quatro méritos. Ainda assim, a perspectiva recebeu a menor intensidade média entre as três, com razão de discriminação de 0,64. A autonomia estrutural na hierarquia decisória não assegurou, portanto, maior intensidade média de ponderação. A explicação pela disponibilidade de métricas permanece uma hipótese a testar.

A concentração do peso sociotécnico em segurança e saúde ocupacional dialoga com a literatura que reconhece a centralidade dos fatores humanos na implementação da I4.0 e é compatível com a hipótese de que, no painel e no contexto analisados, a dimensão sociotécnica tenha sido internalizada sobretudo pelo vetor da segurança operacional (Marcon

et al., 2022; Sony; Naik, 2020; Tortorella *et al.*, 2023). Os subcritérios sociotécnicos do modelo operacionalizam os níveis micro, meso e macro descritos na Seção 2.1.2 (Muniz Jr. *et al.*, 2025b). O peso da perspectiva concentra-se no nível micro, representado pela ergonomia, saúde e segurança ocupacional (B3), único subcritério sociotécnico entre os cinco de maior peso global, enquanto o nível meso, do ambiente de trabalho e da capacitação (O3 e C4), e o nível macro, dos impactos sociais da automação (R4), receberam pesos inferiores. A ordenação descreve a prioridade relativa das dimensões sociotécnicas neste painel e oferece uma observação empírica de caso único relacionada à recomendação de ordenamento dessas dimensões na manufatura (Muniz Jr. *et al.*, 2025b), com o alcance ressalvado na Seção 4.5.

A ordenação atende à recomendação de método, mas o seu conteúdo inverte a ênfase substantiva da literatura que fundamenta a perspectiva. Muniz Jr. *et al.* (2025b) situam nos níveis meso e macro os determinantes negligenciados do sucesso da transformação digital, entre eles o desenvolvimento de competências, os processos de aprendizagem e de colaboração nas organizações e os fatores institucionais de qualificação, e observam que a literatura reconhece de forma insuficiente os fatores de nível societal. O painel atribuiu pesos inferiores aos três subcritérios que operacionalizam esses dois níveis. Duas hipóteses não excludentes explicam a divergência. A primeira é que fatores organizacionais e institucionais não são percebidos como critérios de decisão de investimento, e sim como condições prévias da empresa, que não diferenciam alternativas tecnológicas entre si. A segunda é que a comparação pareada favorece critérios cujos efeitos são atribuíveis à tecnologia avaliada e penaliza critérios cujos efeitos dependem de ações organizacionais posteriores à implantação. Ambas são testáveis e constituem agenda para trabalhos futuros. Uma terceira condição, de desenho, concorre com as duas hipóteses. A retenção deliberada de conhecimento por receio quanto à manutenção do posto, registrada por Muniz Jr., Ribeiro e Kakavelakis (2026), incide sobre o nível operacional, ausente do painel caracterizado na Tabela 3, e tende a rebaixar os pesos de Capacitação Contínua e Gestão do Conhecimento (C4) e de Impactos Sociais (R4). A diversificação do painel indicada na Seção 5.3 permitiria verificá-la.

Um segundo contraponto incide sobre o mecanismo que sustenta o subcritério sociotécnico de maior peso. A substituição de inspeções manuais por monitoramento automatizado, avaliada pelo painel como benefício de ergonomia e segurança, corresponde ao movimento em direção à manutenção preditiva que Muniz Jr. *et al.* (2025b) associam à redução da demanda por criatividade, conhecimento tácito e capacidade de solução de problemas do trabalhador. O mesmo mecanismo configura benefício no nível micro e perda potencial no nível

meso. O modelo captura o primeiro efeito em B3 e não dispõe de subcritério que capture o segundo, limitação registrada na Seção 5.3.

As três métricas e o diálogo com a literatura descrevem a forma como este painel avaliou o investimento em I4.0 no contexto da empresa estudada. Neste caso, os pesos indicam uma avaliação centrada na capacidade de produzir ganhos observáveis no processo industrial, em uma orientação pragmática e operacional da adoção tecnológica. A presença conjunta de subcritérios de benefício esperado e de risco de implementação entre os de maior peso global é compatível com atenção simultânea à viabilidade técnica da implantação e às vulnerabilidades da digitalização. Como o estudo não compara organizações nem contextos operacionais distintos, não permite inferir que essa configuração caracterize ambientes industriais em operação contínua de modo geral.

A leitura por perspectiva oferece elementos para interpretar as alternativas. A A1 atua diretamente sobre o controle em tempo real dos queimadores. Conecta-se principalmente à competitividade, por qualidade, produtividade e estabilidade térmica; tem conexão com os aspectos sociotécnicos, pela redução da dependência de inspeções manuais, e contribui para a sustentabilidade pela eficiência no uso de gás natural e pela redução de emissões associada ao controle estequiométrico da combustão. A A2 concentra sua contribuição na competitividade e na sustentabilidade, pela simulação termodinâmica e pelo apoio à reengenharia da estufa, com conexão mais indireta aos aspectos sociotécnicos. A A1 aproxima-se da lógica de captura operacional contínua, e a A2 aproxima-se da engenharia e do planejamento técnico. As duas alternativas situam-se, porém, fora do padrão de adoção identificado no setor manufatureiro brasileiro. No ranking de Contieri, Anholon e De Santa-Eulalia (2022), apresentado na Seção 2.1.1, a IA e o aprendizado de máquina ocupam a sétima posição em prioridade de implantação e a quarta em dificuldade, e a simulação digital ocupa a décima primeira e a quinta, respectivamente. As tecnologias que sustentam A1 e A2 estão, portanto, entre as menos priorizadas e as mais difíceis na percepção do setor. A decisão da empresa estudada situa-se à frente do padrão setorial. Um instrumento estruturado de avaliação torna-se, por isso, mais pertinente, ao explicitar os critérios que sustentam a escolha quando a referência setorial não a respalda.

4.8 DESEMPENHO DAS ALTERNATIVAS NOS MÉRITOS BOCR

Os pesos estratégicos da Seção 4.5, as perspectivas decisórias da Seção 4.7 e a caracterização qualitativa da Seção 4.6 sustentam a leitura do desempenho de A1 e A2 em cada

um dos quatro méritos. Os valores desta seção correspondem às prioridades das alternativas obtidas pela síntese dos julgamentos do painel nos vinte subcritérios, ponderadas pelos respectivos pesos locais e agregadas em cada mérito. A Tabela 11 apresenta essas prioridades, agrupadas em méritos positivos (Benefícios e Oportunidades) e negativos (Custos e Riscos), com soma unitária em cada mérito.

Tabela 11 – Prioridades das alternativas nos méritos BOCR

Alternativas	Positivos (+)		Negativos (–)	
	B_i	O_i	C_i	R_i
A1 (Controle em tempo real dos queimadores utilizando IA)	0,6001	0,5289	0,4903	0,4804
A2 (Gêmeo digital CFD para simulação termodinâmica das estufas)	0,3999	0,4711	0,5097	0,5196
Soma (Σ)	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A alternativa A1 apresenta desempenho agregado mais favorável nos dois méritos positivos. No mérito Benefícios, A1 obtém 0,6001 contra 0,3999 da A2, a maior separação observada entre as alternativas em qualquer dos quatro méritos. No mérito Oportunidades, a A1 mantém vantagem, com 0,5289 contra 0,4711 da A2, ainda que com diferença menor. O desempenho mais favorável da A1 nos méritos de maximização indica que o painel reconheceu maior contribuição da A1 para a geração de valor operacional e para os ganhos potenciais associados à digitalização e à transformação tecnológica.

Em ambos os méritos negativos, a alternativa A1 também apresenta desempenho agregado mais favorável, com prioridades menores. No mérito Custos, A1 registra 0,4903, contra 0,5097 da A2. No nível dos subcritérios (Apêndice F), os julgamentos do painel atribuíram à A2 a maior desvantagem justamente em Payback, com prioridade de 0,5265 contra 0,4735 da A1, em divergência com o indicador nominal da Tabela 2, no qual a A2 apresenta o menor tempo de retorno. Como a questão orientadora da quarta etapa solicita a alternativa de maior impacto no subcritério (Seção 3.4.3), a prioridade maior da A2 expressa maior ônus percebido, e não preferência. Divergência de mesma natureza ocorre em B5, no qual a prioridade local da A1 é de 0,5988 contra 0,4012 da A2, embora a redução estimada de consumo da A2 seja superior. A diferença entre as duas economias é de natureza distinta. A da A1 é capturada na operação, e a da A2 depende de intervenções físicas nas estufas, conforme a nota da Tabela 2 e o subcritério B5 do Quadro 18. O julgamento do painel é compatível com a distinção entre ganho contínuo e ganho condicionado, verificação remetida à Seção 5.3.

A condicionalidade declarada na Seção 3.4.2.5 oferece uma explicação plausível para esse julgamento. O payback nominal da A2 pressupõe a execução imediata das intervenções físicas recomendadas pela simulação, e o julgamento pareado pode ter captado o risco de realização desse retorno, e não apenas o valor calculado. O desempenho agregado de Custos incorpora ainda o valor do investimento, a infraestrutura digital, o custo de operação, a capacitação contínua e os custos de descarte e conformidade regulatória. A diferença de prioridades agregadas em Custos entre as alternativas, de 0,0194, tem efeito limitado na síntese. Ainda que as prioridades de Custos das duas alternativas fossem permutadas, o score subtrativo da A1 permaneceria superior ao da A2, com 0,0634 contra 0,0276 pela Equação 8, e a priorização se manteria nos cinco métodos de síntese. No mérito Riscos, A1 registra 0,4804, contra 0,5196 da A2. A A2 apresenta vantagem parcial em Segurança Cibernética, por sua natureza predominantemente offline, mas o resultado agregado de Riscos também considera Complexidade de Integração, Dependência Tecnológica, Impactos Sociais e Aumento de Resíduos Eletrônicos. No nível dos méritos BOCR, A1 apresenta, no agregado do painel completo, desempenho mais favorável nos quatro méritos avaliados, relação cuja dependência da composição do painel é examinada na Seção 4.9.

Padrão análogo ao do Payback ocorre nos subcritérios Valor do Investimento (C1) e Infraestrutura Digital e Custo de Operação (C2), nos quais os julgamentos pareados divergem dos indicadores nominais da Tabela 2. Em C1, a prioridade local atribuída à A1 é de 0,5405 contra 0,4595 da A2 (Apêndice F), sinal de maior ônus percebido para a A1, embora seu investimento inicial seja inferior ao da A2. Em C2, as prioridades ficam próximas do equilíbrio, 0,5052 para a A1 e 0,4948 para a A2, apesar de a A1 apresentar despesa operacional anual substancialmente menor. Duas leituras não excludentes explicam essa divergência. A primeira decorre da própria formulação da quarta etapa (Seção 3.4.3), na qual a questão orientadora pergunta pela alternativa de maior impacto no subcritério. Nos méritos negativos, a maior prioridade expressa maior ônus percebido, e não preferência; a segunda é a heterogeneidade dos julgamentos nessas comparações, que registram as duas maiores dispersões geométricas do instrumento, 4,3064 em C1 e 4,8008 em C2 (Apêndice D), sinal de que o painel não convergiu quanto à direção do ônus nesses itens. A divergência não altera a decisão. Como a diferença de prioridades agregadas em Custos é de apenas 0,0194, a permuta integral das prioridades de Custos entre as alternativas mantém a A1 à frente, com 0,0634 contra 0,0276 pela Equação 8, e o ranking se preserva nos cinco métodos de síntese. As comparações de C1 e C2 acrescentam, portanto, dispersão ao mérito Custos, mas não invertem a priorização final. O subcritério Payback, cuja dependência funcional com o investimento e os custos operacionais foi assumida

na Seção 3.4.1, foi submetido a teste análogo. Sua exclusão, com a renormalização proporcional dos quatro subcritérios restantes de Custos, eleva a prioridade de Custos da A1 de 0,4903 para 0,5024 e reduz a da A2 para 0,4976, invertendo a vantagem local da A1 nesse mérito. Ainda assim, a A1 permanece em primeiro nos cinco métodos de síntese, sinal de que a priorização final não depende desse subcritério.

O desempenho agregado confirma o padrão antecipado pela caracterização qualitativa da Seção 4.6. A A1, definida como tecnologia de controle em tempo real com captura contínua de ganhos operacionais, é mais favorável nos méritos de geração de valor, nas oportunidades associadas à digitalização do chão de fábrica e nos méritos negativos, quando considerados em sua composição completa de subcritérios. A A2, definida como tecnologia de simulação e reengenharia estrutural, preserva vantagem parcial julgada em Segurança Cibernética, dentro de Riscos, em razão de sua natureza predominantemente offline, e apresenta a menor estimativa nominal de payback (Tabela 2), sem que isso demonstre vantagem financeira, pois os escopos de custo não são equivalentes. Os julgamentos do subcritério correspondente tampouco referendaram essa diferença nominal (Apêndice F). Resta verificar como esse desempenho nos quatro méritos se converte em uma priorização única, o que depende das cinco fórmulas de síntese BOCR.

4.9 SÍNTESE GLOBAL E RANKING DAS ALTERNATIVAS

Na síntese global, as prioridades de Benefícios, Oportunidades, Custos e Riscos são agregadas em um score final para cada alternativa. A etapa é central no AHP-BOCR e requer a escolha de uma fórmula de agregação. A literatura oferece múltiplas fórmulas, apresentadas nas Equações 4 a 7 do Capítulo 2 e 8 e 9 do Capítulo 3, com propriedades matemáticas e implicações interpretativas distintas. Em estudos aplicados, recomenda-se calcular o ranking com base no conjunto de fórmulas disponíveis e verificar a estabilidade do resultado entre elas. Esse procedimento reduz a dependência da decisão a uma única fórmula de agregação (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023).

Foram calculados cinco scores por alternativa, sistematizados no Quadro 13: o Subtrativo completo (Equação 8) e o Quociente de Somas (Equação 9), formulações com reescalonamento fundamentadas no Capítulo 3, e o Aditivo Probabilístico (Equação 6), o Multiplicativo de Potências (Equação 7) e o Multiplicativo Simples, caso particular da Equação 7 com pesos unitários, formulações tradicionais apresentadas no Capítulo 2. O conjunto acompanha o protocolo de comparação de Lee (2009b), que confronta cinco formulações de

síntese em um mesmo caso. As Equações 4 e 5 não integram o conjunto. A Equação 4 corresponde à forma subtrativa sem reescalonamento, substituída pela Equação 8, que incorpora esse reescalonamento. A Equação 5 aplica os recíprocos de custos e riscos, procedimento cuja indicação de atratividade Wijnmalen (2007) demonstra não ser válida mesmo após o reescalonamento e cujo uso o autor desaconselha. A Tabela 12 apresenta os scores obtidos.

Tabela 12 – Scores e ranking das alternativas pelos cinco métodos de síntese BOCR

Alternativas	Subtrativo completo Eq. (8)	Quociente de somas Eq. (9)	Aditivo probabilístico Eq. (6)	Multiplicativo de potências Eq. (7)	Multiplicativo simples Eq. (7)*
A1 (Controle em tempo real dos queimadores utilizando IA)	0,0641 (1º)	1,7870 (1º)	0,5490 (1º)	1,0599 (1º)	1,3472 (1º)
A2 (Gêmeo digital CFD para simulação termodinâmica das estufas)	0,0269 (2º)	1,2131 (2º)	0,4510 (2º)	0,8694 (2º)	0,7115 (2º)
Concordância	5/5 (100%)				

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), adaptado de Lee (2009b).

Nota: *Caso particular da Equação 7 com pesos unitários.

Os cinco métodos convergem quanto à direção do ranking. Em todos, a alternativa A1 apresenta score superior ao da A2, com concordância de 5/5. A convergência decorre da relação de dominância entre as alternativas. A A1 supera a A2 em Benefícios e Oportunidades e apresenta prioridade menor em Custos e Riscos (Tabela 11), e as cinco fórmulas são crescentes nos méritos positivos e decrescentes nos méritos negativos, com pesos não negativos. A ordenação da A1 à frente da A2 é, portanto, consequência algébrica dessa dominância. A propriedade tem fundamento no próprio método. Saaty e Vargas (1984) demonstram que a dominância de uma linha sobre outra em uma matriz de comparação garante a preservação da ordem pelo autovetor principal sem exigência de consistência, e que a ordem é fator estrutural dos dados, que a inconsistência mascara sem eliminar. A convergência entre os métodos é o análogo dessa propriedade no nível da síntese. A concordância de 5/5 é coerente com a consequência algébrica da dominância e mostra que, entre as cinco formulações examinadas, a priorização não depende da fórmula adotada. O alcance dessa verificação é a escolha da fórmula: a qualidade dos julgamentos, a estrutura dos critérios, a consistência das matrizes e a validação computacional respondem pelas demais condições da interpretação e são tratadas nas seções anteriores.

A separação entre A1 e A2 varia conforme a fórmula utilizada. No Subtrativo completo, a diferença é de 0,0372, com score líquido de 0,0641 para a A1 e de 0,0269 para a A2. No Aditivo Probabilístico, a distância chega a 9,80 pontos percentuais, 0,5490 contra 0,4510, na escala probabilística distributiva. O Quociente de Somas expressa a vantagem da A1 na forma de relação multicritério entre efeitos favoráveis e desfavoráveis, 1,7870 contra 1,2131; não se trata de razão monetária benefício-custo. As fórmulas multiplicativas ampliam a separação relativa: 1,0599 contra 0,8694 no Multiplicativo de Potências e 1,3472 contra 0,7115 no Multiplicativo Simples. A maior separação ocorre no Multiplicativo Simples, resultado esperado para uma fórmula que não modera os produtos por pesos.

O método Subtrativo completo foi adotado como referência primária para a interpretação do ranking final, pelas razões detalhadas no Capítulo 3. Por esse método, a A1 é priorizada com score líquido de 0,0641 e a A2 ocupa a segunda posição com score líquido de 0,0269. As duas apresentam score positivo, sinal de predomínio dos efeitos favoráveis sobre os desfavoráveis no balanço subtrativo sob os pesos do painel. A diferença de 0,0372 expressa o maior saldo líquido da A1.

O ranking não significa que a A2 seja inadequada ao problema. A A2 apresenta vantagem parcial julgada em Segurança Cibernética e contribui com a simulação termodinâmica e o planejamento de intervenções físicas nas estufas de cura. Também apresenta a menor estimativa nominal de payback (Tabela 2), cuja leitura comparativa exigiria escopos de custo equivalentes, reconstruídos conforme a Seção 5.3. No nível agregado dos quatro méritos BOCR, a A1 apresenta desempenho mais favorável. A escolha da A1 reflete esse balanço sob os pesos do painel, com destaque para o mérito Benefícios, no qual a A1 obteve tanto o maior peso estratégico quanto a maior diferença de prioridade entre as alternativas. A robustez da decisão a variações nos pesos estratégicos é examinada na Seção 4.10.

Três grandezas distintas concorrem para o resultado da síntese e não devem ser confundidas. A primeira é o peso estratégico atribuído pelo painel a cada mérito, que expressa importância declarada, com 0,3723 para Benefícios, 0,2786 para Riscos, 0,1974 para Custos e 0,1517 para Oportunidades. A segunda é o coeficiente efetivamente aplicado na Equação 8, produto do peso estratégico pelo fator de escala apresentado na Seção 4.5, cuja participação na soma dos coeficientes em valor absoluto é de 57,51% para Benefícios, 21,02% para Riscos, 12,97% para Custos e 8,50% para Oportunidades. A terceira é a contribuição de cada mérito para a diferença entre os scores das alternativas, que combina o coeficiente com a diferença de prioridades observada, e alcança 88,02% em Benefícios, 6,30% em Riscos, 3,75% em Oportunidades e 1,92% em Custos. A distinção é de natureza matemática; a discriminação entre

os construtos de importância e de magnitude nos julgamentos do painel permanece em aberto, conforme a Seção 4.5.

Duas verificações adicionais examinam a robustez do ranking à direção dos méritos negativos e à composição do painel. A primeira estende a permutação de Custos da Seção 4.8 aos dois méritos negativos ao mesmo tempo. Com as prioridades de Custos e de Riscos das duas alternativas permutadas, mantidos os pesos e as prioridades dos méritos positivos, A1 permanece em primeiro nos cinco métodos, com 0,0611 contra 0,0300 pela Equação 8, 1,6829 contra 1,2879 pela Equação 9, 0,5343 contra 0,4657 pela Equação 6, 1,0291 contra 0,8954 pela Equação 7 e 1,1984 contra 0,7998 pelo Multiplicativo Simples. Pela Equação 8, a inversão do ranking exigiria prioridades de A1 próximas de 0,68 nos dois méritos negativos ao mesmo tempo, diferença de cerca de 0,35 entre as alternativas em cada um, contra as diferenças observadas de 0,0194 e 0,0392. O ranking não depende, portanto, da dominância de A1 nos méritos negativos, e a convergência registrada na Tabela 12 sobrevive à hipótese de que as matrizes de subcritérios de Custos e de Riscos, as de menor consistência individual, tenham invertido a direção desses dois méritos.

A segunda verificação repete a agregação e a síntese com subconjuntos do painel. Na exclusão de cada respondente isolado, em doze rodadas, A1 permanece em primeiro nos cinco métodos em todas elas, com score pela Equação 8 entre 0,0495 e 0,0776 para A1 e entre 0,0086 e 0,0372 para A2. Em seis dessas doze rodadas, a direção agregada de Custos ou de Riscos se inverte em favor de A2, sem inversão do ranking em nenhuma. A dominância de A1 nos quatro méritos é, assim, propriedade do painel completo, e o ranking permaneceu estável nas exclusões e nos subconjuntos examinados. Na exclusão dos dois respondentes acima do limite de consistência nas seis matrizes, conforme o Apêndice G, A1 permanece em primeiro nos cinco métodos, com 0,0834 contra 0,0374 pela Equação 8, margem superior à do painel completo. Na agregação restrita aos quatro respondentes com CR inferior a 10% na matriz estratégica, conforme a Tabela 4, A1 permanece em primeiro nos cinco métodos, com 0,1555 contra 0,0719, a maior margem entre os subconjuntos examinados, ressalvado o tamanho reduzido desse subpainel. A retirada dos respondentes de menor consistência amplia a vantagem de A1 em vez de reduzi-la, resultado que responde de forma direta à hipótese de que a inconsistência individual teria conduzido o ranking. O resultado é coerente com a evidência experimental de que a correção da inconsistência não aproxima necessariamente as prioridades das preferências declaradas pelos decisores (Linares, 2009) e com a distinção entre consistência como qualidade do dado de entrada e validade da escolha (Salomon; Gomes, 2024). A verificação no nível do painel, e não no de cada respondente, decorre da adoção da AIJ, na qual

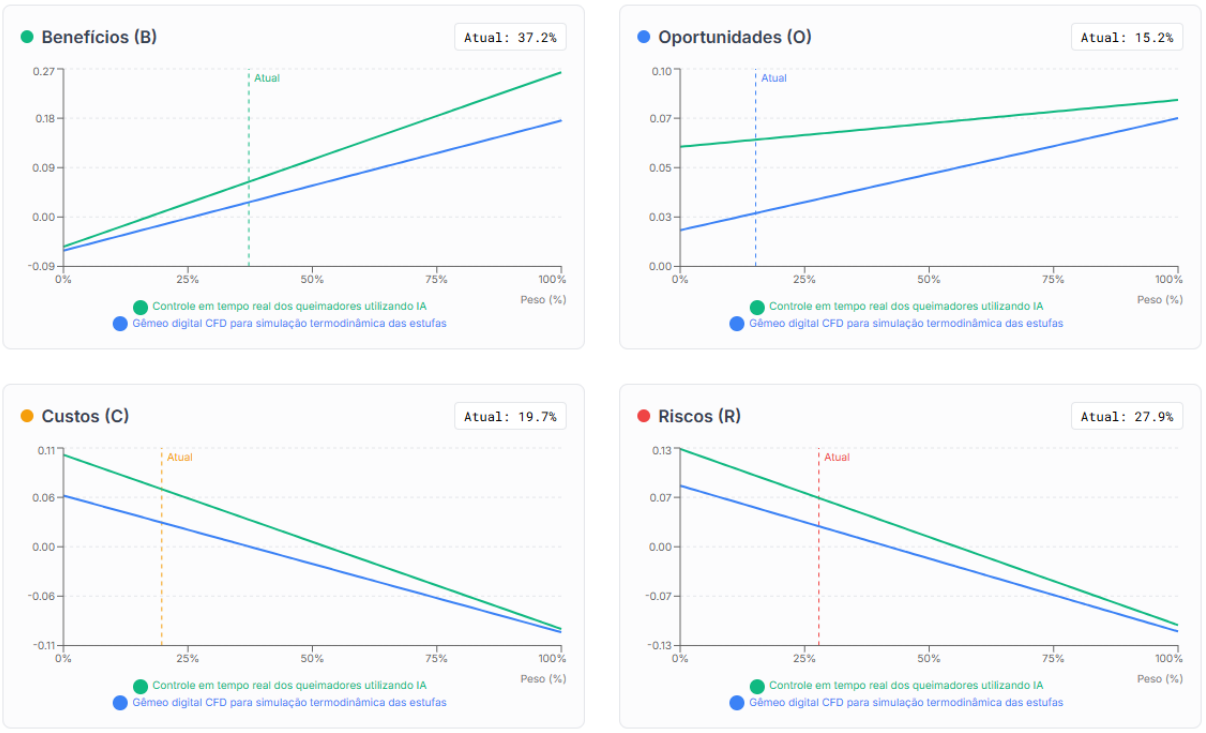
o grupo é tratado como unidade sinérgica e as identidades individuais se dissolvem na agregação (Forman; Peniwati, 1998). As duas verificações foram executadas por replicação independente do procedimento de agregação e de síntese a partir dos julgamentos brutos, validada pela reprodução exata das Tabelas 8, 11 e 12.

Uma terceira verificação examina a dependência do ranking em relação ao mérito Benefícios, responsável pela maior parte da diferença entre os scores. Mantidos os demais parâmetros, o empate ocorre quando a prioridade da A1 em Benefícios atinge 0,4864, contra os 0,6001 observados, condição que exige não a redução da vantagem, mas sua inversão em favor da A2. A inversão de um único julgamento local não produz esse deslocamento. Com a permutação das prioridades das alternativas em B5, subcritério no qual o julgamento diverge do indicador nominal conforme a Seção 4.8, a prioridade da A1 em Benefícios passa a 0,5703, ainda acima do limiar. A verificação estende-se à atenuação simultânea das quatro vantagens, hipótese compatível com a suposição de que as descrições técnicas tenham favorecido a A1 nos quatro méritos ao mesmo tempo. Como a A1 apresenta desempenho mais favorável nos quatro, nenhuma atenuação proporcional inverte o ranking, e a inversão exige mudança de sinal em pelo menos um mérito. No cenário extremo em que as prioridades de Oportunidades, Custos e Riscos se invertem integralmente em favor da A2, a A1 permanece em primeiro desde que mantenha em Benefícios prioridade superior a 0,5136. Uma alteração adversa simultânea de cerca de 0,065 na prioridade da A1 em cada um dos quatro méritos também produz empate, cenário que mede a sensibilidade a revisões coordenadas das descrições técnicas, distinta da robustez à variação dos pesos estratégicos. Como verificação da dependência do ranking em relação aos *rescaling weights*, a Equação 8 foi recalculada com pesos de magnitude iguais, de 0,25 para cada mérito, e com o vetor de magnitude igual ao vetor de pesos estratégicos. A A1 permaneceu priorizada nos dois cenários, com scores de 0,0183 contra −0,0063 e de 0,0390 contra 0,0061, respectivamente. A invariância do ranking decorre da dominância da A1 nos quatro méritos e da não negatividade dos coeficientes. A mudança de sinal do score da A2 no cenário de pesos iguais mostra que a interpretação cardinal dos resultados em relação ao ponto zero permanece condicionada ao vetor de reescalonamento adotado. Os limiares medem a magnitude da alteração necessária; sua plausibilidade depende das descrições técnicas e das premissas apresentadas ao painel, ressalvadas na Seção 5.3.

4.10 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A robustez do ranking às variações nos pesos estratégicos dos méritos BOCR foi verificada por análise de sensibilidade, conforme o procedimento de cálculo do intervalo de estabilidade de peso descrito na Seção 3.3. A varredura foi executada de forma determinística e replicável a partir dos pesos publicados. A Figura 21 apresenta, para cada um dos quatro méritos BOCR, a evolução do score subtrativo das duas alternativas ao longo da faixa admissível do peso do mérito.

Figura 21 – Análise de sensibilidade dos quatro méritos BOCR



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: gráfico gerado pelo sistema de apoio à decisão desenvolvido nesta pesquisa. As curvas de cada mérito foram traçadas a partir de vinte e um pontos igualmente espaçados no intervalo do peso, com passo de 0,05, ligando os scores subtrativos calculados para as duas alternativas em cada ponto. A busca por eventual ponto de reversão, reportada nesta seção, emprega varredura independente, em passo de 0,01, descrita na Seção 3.3.

Os gráficos revelam o mesmo padrão de estabilidade nos quatro méritos. Nos méritos positivos da fórmula subtrativa, Benefícios (0,3723) e Oportunidades (0,1517), o score das duas alternativas cresce com o aumento do peso; nos méritos negativos, Custos (0,1974) e Riscos (0,2786), o score decresce. Em todos eles a curva da A1 mantém-se acima da curva da A2 em toda a faixa do peso, e as duas curvas não se cruzam. No mérito de maior peso, Benefícios, as curvas divergem, partindo de valores próximos quando o peso é nulo, cerca de

−0,05 para a A1 e −0,06 para a A2, afastam-se até aproximadamente 0,27 e 0,18, respectivamente, no extremo superior da faixa, o que produz a maior separação entre as alternativas. Nos três demais méritos as curvas aproximam-se à medida que o peso cresce, sem se cruzarem. Em Oportunidades a curva da A1 é quase horizontal e a da A2 cresce de modo mais acentuado, de sorte que ambas quase se encontram no extremo superior, ainda com a A1 acima. Em Custos e Riscos as duas curvas decrescem e convergem no extremo superior, mantendo-se a A1 acima da A2 em todo o intervalo. Em nenhum dos quatro méritos a variação isolada do peso conduz ao cruzamento das curvas.

A ausência de cruzamento das curvas significa que nenhum dos quatro méritos apresenta ponto de reversão do ranking dentro da faixa testada. O intervalo de estabilidade de cada peso, definido por O'Shea *et al.* (2026) como a faixa de valores em que a ordenação das alternativas não se altera, abrange toda a faixa admissível, e a A1 permanece a alternativa de maior score para qualquer valor do peso. Nos termos de Karande, Zavadskas e Chakraborty (2016) e de Triantaphyllou e Sánchez (1997), nenhum dos méritos é crítico, ou seja, nenhuma variação isolada do respectivo peso é capaz de reverter a preferência, e o ranking é robusto nos quatro méritos. Esse resultado é reforçado pela relação de dominância entre as alternativas. Como a A1 supera a A2 nos quatro méritos agregados (Tabela 11) e os pesos pessoais e os *rescaling weights* são não negativos, a diferença de score em favor da A1 permanece positiva para qualquer combinação admissível dos pesos estratégicos. Embora a varredura gráfica varie um peso por vez, a relação de dominância e a não negatividade dos coeficientes estendem analiticamente a invariância do ranking a qualquer combinação simultânea admissível dos pesos estratégicos. A extensão vale para os pesos estratégicos. As perturbações simultâneas das prioridades locais, dos julgamentos, das descrições técnicas e da estrutura dos critérios permanecem fora do alcance da verificação e orientam as direções reunidas na Seção 5.3.

Essa robustez soma-se à estabilidade registrada na Seção 4.9, em que os cinco métodos de síntese BOCR convergiram para o mesmo ranking. As verificações incidem sobre dimensões distintas da incerteza decisória. A comparação dos cinco métodos examina a sensibilidade do ranking à fórmula de agregação, a permutação dos méritos negativos e a exclusão de respondentes examinam a sensibilidade à direção das prioridades e à composição do painel, e a análise de sensibilidade examina a estabilidade à variação dos pesos estratégicos. A recomendação da A1 sobre a A2 sustenta-se em todas.

A varredura é unidimensional por construção, própria da variação de um peso por vez, e a extensão a combinações simultâneas dos pesos estratégicos decorre da relação de dominância, e não da varredura (Karande; Zavadskas; Chakraborty, 2016; O'Shea *et al.*, 2026).

A varredura incide sobre os pesos dos méritos e não sobre os pesos locais dos subcritérios, cuja influência sobre o ranking é verificada na Seção 4.9 pela permutação das prioridades dos méritos negativos e pela exclusão de respondentes. Dentro desse alcance, o resultado mostra que a preferência pela A1 não decorre de uma configuração particularmente sensível dos pesos nem da escolha de um método de síntese específico, e sustenta a recomendação sob os parâmetros adotados.

4.11 COMPARAÇÃO COM BENCHMARKS DA LITERATURA

A interpretação dos pesos estratégicos é complementada pela comparação com configurações de pesos BOCR registradas em outras aplicações setoriais publicadas. Os estudos analisados pertencem a domínios decisórios distintos, com perfis de decisores, critérios e contextos próprios, e a comparação tem função contextual: situar a configuração encontrada no panorama de aplicações empíricas do AHP-BOCR e identificar convergências e divergências interpretativas. A comparação entre estudos é recomendada em revisões metodológicas do método como forma de qualificar a leitura contextual dos resultados (Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023). A Tabela 13 reúne os pesos estratégicos BOCR de cinco estudos selecionados a partir do *corpus* do referencial teórico, com prioridade para estudos com pesos explicitamente reportados e contextos decisórios distintos.

Tabela 13 – Pesos estratégicos BOCR em estudos selecionados

Mérito	B	O	C	R
Estudo atual (2026)	0,3723	0,1517	0,1974	0,2786
Demirtas e Üstün (2008)	0,3184	0,2093	0,1784	0,2938
Kabak e Dağdeviren (2014)	0,3740	0,3470	0,2030	0,0760
Yap e Nixon (2015) (India)	0,1750	0,4930	0,0850	0,2470
Yap e Nixon (2015) (Reino Unido)	0,0750	0,4510	0,2050	0,2680
Saaty e Ozdemir (2003)	0,2500	0,2000	0,3100	0,2400

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: pesos normalizados para soma unitária. Diferenças de arredondamento nos valores reportados pelas fontes fazem a soma das linhas Demirtas e Üstün (2008) e Yap e Nixon (2015, Reino Unido) diferir de 1,0000.

Três dos cinco estudos, Demirtas e Üstün (2008), Kabak e Dağdeviren (2014) e Yap e Nixon (2015), figuram entre os dez documentos mais citados sobre BOCR no levantamento bibliométrico de Petrillo, Salomon e Tramarico (2023), o que reforça sua representatividade na

literatura aplicada. Saaty e Ozdemir (2003) compõem o conjunto como trabalho seminal, que sistematizou as quatro formulações tradicionais de síntese BOCR adotadas como referência metodológica neste estudo. Os cinco estudos cobrem seleção de fornecedores, gestão de energia, gestão de resíduos e decisão política, uma amostra heterogênea de contextos decisórios.

A comparação exige a caracterização prévia dos contextos, dos painéis e dos subcritérios de cada caso. Sem ela, há risco de comparar magnitudes numéricas conceitualmente distintas. Demirtas e Üstün (2008) aplicaram ANP-BOCR à seleção de fornecedores em uma fábrica de geladeiras na Turquia, com painel formado pela equipe interna de compras e subcritérios voltados ao desempenho operacional do fornecedor. Kabak e Dağdeviren (2014) aplicaram ANP-BOCR à priorização de fontes de energia renovável para a Turquia, com painel de especialistas em planejamento energético e subcritérios de dimensão econômica, ambiental e de segurança energética nacional. Yap e Nixon (2015) aplicaram AHP-BOCR à seleção comparativa de tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos na Índia e no Reino Unido, com um painel de seis acadêmicos especialistas em *waste-to-energy* e subcritérios de viabilidade técnica e institucional. Saaty e Ozdemir (2003) aplicaram AHP-BOCR à decisão sobre o status de relações comerciais permanentes entre os Estados Unidos e a China em 2000, com análise distribuída a líderes do Congresso norte-americano. O presente estudo aplicou AHP-BOCR à seleção entre duas tecnologias I4.0 para eficiência energética nas estufas de cura da linha de pintura automotiva de uma montadora multinacional brasileira, com painel de doze especialistas seniores e vinte subcritérios distribuídos pelas perspectivas de competitividade, sociotécnica e sustentabilidade. O Quadro 16 sintetiza as cinco aplicações.

Quadro 16 – Caracterização dos cinco estudos comparados

Estudo	Tipo de decisão	Painel	Setor e País	Subcritérios
Estudo atual (2026)	Tática operacional com impacto estratégico	12 especialistas seniores da empresa estudada	Automotivo, Brasil	20 (5+5+5+5)
Demirtas e Üstün (2008)	Tática operacional recorrente	Equipe interna do departamento de compras	Eletrodomésticos, Turquia	14 (5+3+3+3)
Kabak e Dağdeviren (2014)	Estratégica nacional	*Expert team* em planejamento energético	Energia renovável, Turquia	19 (4+4+5+6)
Yap e Nixon (2015)	Política pública comparativa	6 acadêmicos especialistas em *waste-to-energy* (3 India + 3 Reino Unido)	Gestão de resíduos, Índia e Reino Unido	14 (3+3+3+5)
Saaty e Ozdemir (2003)	Política internacional	Análise enviada a líderes do Congresso EUA	Relações comerciais, Estados Unidos e China	12 (variável por mérito)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O primeiro padrão refere-se ao mérito Benefícios. A proximidade numérica entre o estudo atual, 0,3723, Kabak e Dağdeviren, 0,3740, e Demirtas e Üstün, 0,3184, não corresponde à convergência conceitual entre os méritos. Em Demirtas e Üstün (2008), benefícios captam características operacionais do fornecedor, como taxa de defeito, flexibilidade de processo e pontualidade de entrega. Em Kabak e Dağdeviren (2014), captam externalidades positivas da política energética nacional, como preservação ambiental e desenvolvimento industrial associado. No presente estudo, capta ganhos operacionais e estratégicos da adoção tecnológica, como eficiência operacional, qualidade do produto e contribuições sociotécnicas. A semelhança numérica reflete, em cada caso, o protagonismo da dimensão de ganho direto na estrutura de preferência do painel, sem equivalência semântica entre os méritos. Yap e Nixon (2015) obtêm pesos menores em Benefícios, 0,1750 para a Índia e 0,0750 para o Reino Unido, no contexto em que o painel acadêmico avaliou tecnologias de gestão de resíduos sob o critério de viabilidade institucional, e o protagonismo se deslocou para Oportunidades. Saaty e Ozdemir (2003) obtêm 0,2500 em uma decisão política na qual ganhos econômicos diretos competem com segurança nacional e valores políticos.

O segundo padrão envolve o mérito Oportunidades. O peso obtido neste estudo, 0,1517, é o menor entre os cinco. Essa posição admite três interpretações contextuais, cujos efeitos não foram isolados, conforme a Seção 5.3. A primeira refere-se ao horizonte temporal do decisor. É plausível que o painel tenha considerado resultados de curto prazo na conjuntura macroeconômica volátil do período de coleta (IMF, 2026), e a prática industrial de avaliação

de investimentos prioriza as dimensões econômica e financeira, com ênfase em retornos diretos (Almeida *et al.*, 2023). O segundo é o tipo de decisão. Nos estudos comparados, as decisões táticas operacionais, como a deste estudo e a de Demirtas e Üstün (2008), apresentaram peso menor para Oportunidades do que as decisões classificadas como estratégicas ou políticas; o número reduzido e a heterogeneidade dos casos impedem atribuir a diferença ao tipo de decisão. Avalia-se a tecnologia da estufa de cura principalmente pelo retorno operacional concreto, não pela transformação organizacional ampla que poderia habilitar. O terceiro é o perfil do painel. A maior ponderação de oportunidades em alguns painéis acadêmicos ou de planejamento nacional pode estar associada a horizontes de longo prazo. O peso elevado de Yap e Nixon, 0,4930 para a Índia e 0,4510 para o Reino Unido, é compatível com essa interpretação, com o painel acadêmico tratando as oportunidades institucionais e de maturação tecnológica como dimensão dominante. A hipótese de maior atenção à operação presente em painéis corporativos seniores é compatível com o contexto analisado, e o peso de 0,2093 em Demirtas e Üstün (2008), também em ambiente corporativo industrial, é igualmente compatível com essa leitura, sem confirmá-la.

O terceiro padrão diz respeito ao mérito Custos. O peso obtido neste estudo, 0,1974, situa-se entre o mínimo de 0,0850, de Yap e Nixon para a Índia, e o máximo de 0,3100, de Saaty e Ozdemir. Está próximo do valor de Kabak e Dağdeviren, 0,2030, e acima do de Demirtas e Üstün, 0,1784. O peso reduzido em Demirtas e Üstün concentra-se em subcritérios de dispêndio operacional do fornecedor. A estrutura deste estudo agrega, além do custo direto, o Payback e os custos de infraestrutura digital, de capacitação e de conformidade, o que pode influenciar seu peso relativo. Em posição intermediária, o presente estudo mostra que o painel analisado ponderou o custo direto sem subordinar a ele os benefícios operacionais futuros. A divergência interna no estudo de Yap e Nixon, 0,0850 para a Índia e 0,2050 para o Reino Unido, é compatível com possível influência do contexto socioeconômico. A infraestrutura de gestão de resíduos e a percepção da necessidade do investimento oferecem explicações contextuais para a diferença entre Índia e Reino Unido, sem constituírem teste causal. O peso máximo de Saaty e Ozdemir reflete custos políticos e econômicos macro, como perda de empregos e resistência política interna, categoria conceitualmente distinta dos custos operacionais deste estudo.

O quarto padrão abrange o mérito Riscos. O peso obtido neste estudo, 0,2786, supera quatro dos cinco estudos comparados. Uma possível explicação para essa posição é a composição dos subcritérios do mérito. A estrutura adotada incorpora Segurança Cibernética, Complexidade de Integração, Dependência Tecnológica, Impactos Sociais e Resíduos

Eletrônicos, dimensões relevantes em decisões de investimento em tecnologias da I4.0, nas quais a interconexão de sistemas amplia a superfície de exposição a falhas, ameaças e dependências externas. Kabak e Dağdeviren (2014) obtêm 0,0760 em Riscos, peso obtido em avaliação de fontes de energia renovável tecnologicamente maduras, em país com busca por soberania energética. Demirtas e Üstün (2008) obtiveram 0,2938 em riscos compostos por três subcritérios contratuais, categoria mais estreita que a deste estudo. Yap e Nixon (2015) apresentam 0,2470 para a Índia e 0,2680 para o Reino Unido, em estrutura que inclui riscos socioambientais e operacionais. Saaty e Ozdemir (2003) registram 0,2400 em estrutura voltada a riscos geopolíticos e de segurança nacional, conceitualmente distinta da deste estudo. O peso elevado de Riscos deve ser lido pela composição dos subcritérios e pelo caráter sistêmico dos riscos da I4.0, sem permitir inferir, apenas pelo peso, o grau de conservadorismo do painel.

A comparação entre os cinco estudos sugere que os pesos BOCR podem estar associados a três fatores contextuais, o tipo de decisão, o perfil do painel e o contexto socioeconômico do setor no período. A configuração obtida neste estudo é compatível com uma decisão tática em ambiente corporativo industrial. Entre os estudos comparados, o perfil mais próximo é o de Demirtas e Üstün (2008), também conduzido em ambiente corporativo industrial em país emergente, ainda que com composição semântica distinta dos méritos. A heterogeneidade entre as configurações registradas é compatível com diferenças de contexto decisório, perfil dos decisores, tecnologias avaliadas e critérios incluídos. A comparação direta de magnitudes só é informativa quando se considera essa estrutura tripla. A configuração obtida expressa a estrutura de preferências do painel de doze especialistas de uma montadora brasileira, diante do problema específico de seleção entre duas tecnologias para a otimização do consumo energético nas estufas de cura.

5 CONCLUSÃO

Esta dissertação propôs e aplicou um modelo de apoio à decisão baseado em AHP-BOCR para avaliação de investimentos em tecnologias da I4.0 no setor automotivo. O estudo foi conduzido em uma montadora multinacional com operação no estado de São Paulo. O problema empírico foi a seleção entre duas alternativas tecnológicas voltadas à otimização do consumo de gás natural em estufas de cura na linha de pintura automotiva. A pesquisa adotou estratégia de pesquisa-ação, integrou abordagens qualitativas e quantitativas e mobilizou um painel de doze especialistas seniores da empresa estudada para a coleta dos julgamentos pareados.

O objetivo geral, desenvolver e aplicar um modelo de apoio à decisão baseado em AHP-BOCR para avaliação de investimentos em tecnologias da I4.0 na indústria automotiva, foi alcançado. O modelo foi formalizado em estrutura hierárquica composta por quatro méritos, Benefícios, Oportunidades, Custos e Riscos, vinte subcritérios distribuídos pelas perspectivas de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade, e duas alternativas tecnológicas avaliadas em condições reais de decisão. A aplicação ao caso real produziu uma priorização condicional entre as alternativas, com convergência integral entre os cinco métodos de síntese BOCR e manutenção do ranking sob a variação unidimensional dos pesos estratégicos testada, conforme as Seções 4.9 e 4.10. A indicação apoiou a discussão decisória e cumpriu a finalidade prática de estruturar a comparação. Ela não equivale à autorização de investimento e deve ser revista após a reconstrução dos fluxos de caixa e, se essa revisão alterar os insumos decisórios, a atualização dos julgamentos afetados.

Os três objetivos específicos foram tratados nas etapas correspondentes do trabalho. O primeiro, identificar na literatura os critérios de decisão aplicáveis a investimentos em tecnologias da I4.0 no setor automotivo, foi atendido pela revisão da literatura, que consolidou vinte subcritérios organizados sob a estrutura BOCR e classificados pelas três perspectivas decisórias. O conjunto incorpora dimensões frequentemente tratadas de forma fragmentada em estudos anteriores, em particular os subcritérios sociotécnicos e de sustentabilidade, e atende à recomendação de Almeida *et al.* (2023) de incluir riscos e sustentabilidade como critérios independentes. O segundo objetivo, desenvolver a estrutura hierárquica de decisão utilizando AHP-BOCR, materializou-se na formalização da estrutura hierárquica completa, na definição da síntese subtrativa com *rescaling weights* como método primário de agregação e na implementação do modelo em ferramenta computacional dedicada, cujo motor de cálculo foi verificado por comparação com implementação independente com a biblioteca de referência

AhpAnpLib (Mu, 2023; Wijnmalen, 2007). Na estrutura resultante, as perspectivas de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade articulam-se em uma única hierarquia auditável. O terceiro objetivo, avaliar a aplicabilidade e os resultados do modelo em um caso real de aplicação, foi cumprido pela aplicação do protocolo junto ao painel de doze especialistas, pela obtenção de matrizes agregadas com CR inferior a 3% em todas as dimensões, pela síntese dos resultados sob cinco formulações matemáticas distintas e sob variação unidimensional dos pesos, e pela apresentação dos resultados aos especialistas em sessão de devolutiva, com discussão oral das percepções sobre a adequação do modelo, registrada de forma global pelo pesquisador, sem instrumento estruturado nem registro das respostas individuais. A devolutiva completou o ciclo de pesquisa-ação.

A questão de pesquisa indagou como avaliar e priorizar investimentos em tecnologias da I4.0 no setor automotivo quando os efeitos relevantes não se reduzem a indicadores financeiros. A resposta obtida consiste na estruturação da decisão sob os quatro méritos do BOCR, com os efeitos favoráveis e desfavoráveis capturados simultaneamente e com os critérios não financeiros incorporados em igualdade de tratamento com os financeiros. A demonstração empírica evidenciou que o modelo estrutura decisões multidimensionais com rastreabilidade e produz priorização estável sob variações metodológicas e sob variação dos pesos dos méritos. A identificação dos critérios de decisão está tratada no Capítulo 2 e na Seção 4.5, e a caracterização das contribuições do modelo para gestores e decisores da indústria automotiva brasileira, na Seção 5.1.

5.1 CONTRIBUIÇÕES ORGANIZACIONAIS

A pesquisa entregou à empresa estudada um protocolo estruturado para avaliação de investimentos em tecnologias da I4.0. O protocolo articula critérios financeiros e não financeiros sob a estrutura BOCR, com rastreabilidade matemática dos julgamentos e suporte computacional integrado. Ele formaliza a priorização de investimentos, aumenta a transparência da alocação de capital e integra as áreas de operações, engenharia, finanças, recursos humanos e meio ambiente em uma estrutura única de avaliação.

No problema avaliado, o modelo priorizou a alternativa A1, controle em tempo real dos queimadores utilizando IA, sobre a alternativa A2, gêmeo digital CFD para simulação termodinâmica das estufas, sob os julgamentos e as informações fornecidos ao painel. Essa indicação é condicional e requer revisão das premissas financeiras antes de qualquer autorização de investimento. No espaço multicritério analisado, a fundamentação está ancorada

no desempenho agregado mais favorável da A1 nos quatro méritos BOCR e na manutenção do ranking sob as formulações matemáticas e configurações de pesos testadas. A indicação foi acompanhada de orientação gerencial para utilização complementar da A2 em análises pontuais de engenharia. Essa orientação preserva o aporte analítico da simulação termodinâmica para apoio à reengenharia estrutural, quando justificável por análise de retorno específica. A exclusividade declarada na Seção 3.4 refere-se ao aporte de capital no ativo produtivo, que a decisão avaliada destina a uma única alternativa. Ela não impede a contratação pontual de estudos de simulação em intervenções de engenharia, custeados fora do escopo desta decisão, arranjo que preserva a contribuição analítica da Alternativa 2 sem reabrir a comparação entre as duas.

A ferramenta computacional desenvolvida constitui contribuição organizacional adicional. O sistema implementa o protocolo completo de coleta, agregação, cálculo, validação, síntese e análise de sensibilidade em ambiente web acessível sem necessidade de instalação de software. Ele incorpora uma camada de interpretabilidade assistida por IA que traduz prioridades numéricas em interpretações qualitativas auditáveis. A solução está disponível para reutilização em estudos futuros e permite a aplicação do mesmo protocolo a painéis e contextos distintos. Sua configuração foi planejada para reduzir a barreira de entrada associada à familiaridade prévia com métodos MCDM e ao acesso a ferramentas comerciais especializadas, característica relevante para a difusão da abordagem em empresas industriais com restrições orçamentárias ou de capacitação técnica em decisão multicritério.

5.2 CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS

A pesquisa contribui para a literatura sobre métodos MCDM aplicados a decisões de investimento em I4.0 em três frentes principais, além de uma contribuição complementar.

A primeira frente refere-se à configuração do AHP-BOCR para a priorização de investimentos em um ativo produtivo da manufatura automotiva, com elicitação dos pesos estratégicos junto ao painel, elicitação separada dos pesos de magnitude que operam o reescalonamento e adoção da formulação subtrativa. A concentração das aplicações do modelo em áreas distintas da engenharia industrial e da manufatura é registrada em revisão sistemática por Petrillo, Salomon e Tramarico (2023). O presente estudo contribui ao demonstrar a aplicabilidade do modelo em problema decisório real, com painel de especialistas qualificados, fundamentação metodológica completa e estrutura auditável de resultados. A documentação

detalhada do protocolo, das etapas operacionais e dos parâmetros adotados em cada nível da hierarquia oferece subsídios para a replicação da abordagem em outros estudos aplicados.

A segunda frente refere-se à incorporação simultânea das perspectivas de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade em uma única estrutura hierárquica. Estudos anteriores frequentemente privilegiaram critérios financeiros e operacionais em detrimento de dimensões estratégicas de mais longo prazo. A estrutura adotada nesta dissertação consolida vinte subcritérios distribuídos por três perspectivas decisórias e atende à recomendação de incluir aspectos sociotécnicos e de sustentabilidade como dimensões independentes da avaliação (Almeida *et al.*, 2023; Beier *et al.*, 2020; Marcon *et al.*, 2022). O tratamento da sustentabilidade como perspectiva autônoma, contudo, não assegurou maior intensidade média de ponderação, tendo a perspectiva recebido a menor intensidade média entre as três. O resultado mostra que a incorporação de uma dimensão à hierarquia não assegura sua predominância na ponderação. A associação com a disponibilidade de parâmetros de mensuração constitui hipótese interpretativa, não mecanismo demonstrado pelo estudo.

A análise por perspectivas oferece elementos para a interpretação contextualizada dos pesos obtidos e para a comparação exploratória com padrões setoriais descritos na literatura sobre adoção de I4.0. A análise das dimensões sociotécnicas, organizadas nos níveis micro, meso e macro, oferece uma observação empírica de caso único sobre sua prioridade relativa no contexto investigado e dialoga com a recomendação de ordenamento dessas dimensões na manufatura (Muniz Jr. *et al.*, 2025b), sem validar esse ordenamento para outros contextos. O ordenamento obtido inverte a ênfase substantiva dessa mesma literatura, ao concentrar o peso da perspectiva no nível micro e atribuir pesos inferiores aos níveis meso e macro, nos quais os autores situam os determinantes negligenciados da transformação digital. O trabalho discute duas hipóteses para essa inversão, ambas testáveis, e registra que o mecanismo que sustenta o subcritério sociotécnico de maior peso configura benefício no nível individual e perda potencial no nível organizacional, efeito que o modelo não captura.

A terceira frente é metodológica e refere-se à adoção da síntese subtrativa com *rescaling weights* como método primário de agregação, acompanhada da análise de concordância entre cinco métodos de síntese BOCR e da variação unidimensional dos pesos para verificação da robustez do ranking. A combinação está alinhada à recomendação de triangulação entre métodos em estudos BOCR (Alizadeh *et al.*, 2020; Lee, 2009a; Petrillo; Salomon; Tramarico, 2023; Wijnmalen, 2007). Na aplicação conjunta das duas verificações, o ranking obtido sustentou-se tanto sob variações na formulação matemática quanto sob variações unidimensionais nos pesos estratégicos, situação metodologicamente favorável. As duas

verificações integram um tratamento das fontes de incerteza da decisão que abrange também a estrutura hierárquica, com os méritos Oportunidades e Riscos, e a coerência dos julgamentos, com a razão de consistência e o teste de dispersão, conforme a Seção 3.3. A organização explícita dessas quatro frentes em um mesmo protocolo oferece referência para estudos BOCR que precisem declarar como tratam a incerteza sem recorrer a extensões difusas do método. A apresentação detalhada dos procedimentos e dos resultados intermediários fornece subsídios para a replicação da abordagem e contribui para o enriquecimento das práticas de triangulação metodológica em estudos BOCR aplicados.

A contribuição complementar refere-se à incorporação de uma camada de interpretabilidade assistida por IA em ferramenta de apoio à decisão multicritério. A camada XAI desenvolvida combina arquitetura de RAG com base bibliográfica controlada e produz pareceres qualitativos ancorados em literatura científica revisada por pares. A separação entre cálculo, interpretação assistida e revisão humana, implementada na ferramenta e discutida na Seção 4.4, dialoga com a agenda de pesquisa em XAI aplicada à manufatura e à decisão organizacional. A abordagem preserva o papel decisório do especialista humano. Ela utiliza o componente de IA como recurso de organização narrativa, articulação de *trade-offs* e recuperação de fundamentos metodológicos da literatura, sem substituir o processo de cálculo nem a validação final dos resultados.

5.3 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

As limitações do estudo delimitam o alcance das conclusões e indicam as direções de pesquisa que delas decorrem. Cinco frentes organizam essa discussão: o contexto empírico, o desenho decisório, a modelagem multicritério, a validação dos resultados e a comparação com a literatura.

O contexto empírico e a generalização constituem a primeira frente. A pesquisa foi conduzida em uma única unidade fabril do setor automotivo, em uma montadora multinacional com capacidade técnica e recursos organizacionais próprios. Outras montadoras, os fornecedores da cadeia e as pequenas e médias empresas enfrentam restrições distintas de orçamento, infraestrutura digital e governança de investimentos, e o protocolo não se transfere diretamente a esses contextos. O painel foi composto exclusivamente por profissionais da empresa estudada, delimitação coerente com a natureza estratégica e confidencial dessas decisões. Estudos futuros podem aplicar o protocolo a outras plantas, montadoras e setores manufatureiros, e incorporar especialistas externos sem conflito competitivo, como acadêmicos

ou consultores, para avaliar a estabilidade da estrutura hierárquica, dos critérios e das interpretações geradas pelo modelo. As duas alternativas avaliadas empregam tecnologias que a percepção do setor manufatureiro brasileiro situa entre as menos priorizadas e as mais difíceis de implantar. Os pesos e as interpretações obtidos refletem um contexto de adoção antecipado em relação ao padrão setorial, e não se transferem diretamente a decisões sobre tecnologias já consolidadas.

Quanto ao desenho decisório e à natureza dos julgamentos, o painel reuniu doze profissionais seniores, com predominância de cargos gerenciais. A composição é coerente com o foco do modelo na decisão estratégica de investimentos, e deixa de fora as percepções de operadores e de níveis técnicos quanto ao uso cotidiano da tecnologia, à aceitação operacional e à ergonomia. A estratégia de pesquisa-ação, pela participação direta do pesquisador no contexto investigado, pode ter introduzido vieses de confirmação na definição do problema, na seleção dos participantes e na interpretação dos julgamentos. Padronizado, o instrumento de coleta favorece a uniformidade do procedimento e a validação computacional cruzada verifica os cálculos; nenhum dos dois controla esses vieses. Os julgamentos pareados preservam a subjetividade inerente às preferências dos especialistas, que o AHP-BOCR estrutura e torna verificável sem eliminar. A diversificação do painel quanto a gênero, faixa etária e nível hierárquico, com inclusão de perspectivas operacionais e técnicas, é direção complementar, particularmente relevante nos subcritérios sociotécnicos, nos quais a percepção dos efeitos sobre o ambiente de trabalho e a segurança ocupacional pode diferir entre os níveis gerencial e operacional. Três pontos do Capítulo 4 ficaram sem esclarecimento junto aos respondentes: as causas da inconsistência individual, discutidas na Seção 4.2, os motivos da ponderação dos subcritérios de maior peso, na Seção 4.5, e as divergências entre os julgamentos pareados e os indicadores nominais, na Seção 4.8. O procedimento permitiria distinguir preferência deliberada de compreensão diversa da pergunta e constitui direção imediata para reaplicações do protocolo.

A natureza dos julgamentos pareados impõe restrição adicional. O procedimento de coleta não contemplou o cálculo da razão de consistência durante o preenchimento nem a revisão dirigida dos julgamentos, limitação analisada na Seção 4.2 como explicação plausível dos índices individuais observados. A decisão repousa nas prioridades agregadas, cujas seis matrizes atenderam ao limite, e não nas matrizes de um respondente isolado. Protocolos que calculem o CR no momento da resposta, sinalizem a ultrapassagem do limite e apontem as comparações de maior desvio em relação ao valor esperado sob consistência permitiriam a revisão dirigida durante a própria coleta (Salomon; Gomes, 2024). Conduzida com participação

do respondente, essa revisão permanece sem verificação experimental (Linares, 2009). A literatura empírica registra como questões abertas se a devolutiva da inconsistência durante o preenchimento deve ser oferecida e se a oferta de correções torna o decisor mais consistente (Bozóki *et al.*, 2013). Os mesmos autores advertem que a eliminação automática da inconsistência pode afastar as prioridades das preferências reais e que métodos de correção só se aplicam com a aprovação do decisor. Para ser conclusiva, a verificação deve medir o efeito da revisão sobre a estimativa das prioridades, e não apenas sobre o índice, porque a redução da inconsistência da matriz não garante estimativa mais precisa do vetor de prioridades (Grzybowski, 2016). A consistência afere a coerência cardinal das comparações, e a validade das prioridades obtidas não dispõe de valor de referência contra o qual ser aferida, conforme a Seção 4.2. A verificação exigiria critério externo ao próprio julgamento, como o confronto das prioridades com resultados observados após a implantação ou com a ordenação declarada pelos respondentes em instrumento independente, procedimentos não realizados neste estudo. Somam-se a essa direção as rodadas de discussão e a segmentação do painel em subgrupos homogêneos nas comparações de maior dispersão (Saaty; Vargas, 2007). A relação entre familiaridade prévia com o método e consistência dos julgamentos ficou fora deste estudo.

A modelagem multicritério impõe um terceiro conjunto de restrições. A análise considerou duas alternativas tecnológicas e deixou de fora outras configurações aplicáveis ao processo de cura, como sensores IIoT, sistemas *Manufacturing Execution System* (MES), manutenção preditiva avançada, integração com *Product Lifecycle Management* (PLM) ou combinações híbridas. De ordem 2 × 2, as matrizes de comparação entre alternativas apresentam consistência trivial por construção, e o instrumento exigiu o preenchimento integral das setenta e duas comparações pareadas por respondente. O número de julgamentos admite redução por matrizes incompletas, com estimação das prioridades a partir de subconjunto das comparações (Harker, 1987) e completamento ótimo dos elementos ausentes (Bozóki; Fülöp; Rónyai, 2010). A evidência experimental de Bozóki *et al.* (2013) indica que a razão de consistência parcial cresce de forma aproximadamente linear ao longo da sequência de respostas e que as prioridades estimadas de matrizes incompletas se aproximam do resultado final antes do preenchimento integral, com aproximação mais lenta nas tarefas subjetivas. A coleta incompleta constitui alternativa a verificar frente aos índices individuais observados neste estudo.

A estrutura de critérios impõe restrições próprias. O modelo carece de subcritério que capture a perda potencial de conhecimento tácito associada à automação do diagnóstico e à manutenção preditiva, efeito identificado na literatura sociotécnica. Registrado o ganho de

ergonomia e segurança decorrente da substituição de inspeções manuais, discutido na Seção 4.7, a avaliação deixa sem registro a contrapartida organizacional do mesmo mecanismo. A independência entre os vinte subcritérios foi verificada por triagem conceitual das definições operacionais, conforme a Seção 3.2, e não por teste formal de interdependência. O modelo assume, ainda, uma exceção declarada ao princípio de exclusividade mútua no subcritério Payback, que guarda dependência funcional com o valor do investimento e com os custos de operação, conforme a Seção 3.4.1. Estudos futuros podem aplicar métodos de identificação de interdependência entre critérios antes da estruturação da hierarquia, como o DEMATEL, e verificar a estabilidade do ranking sob a exclusão dos subcritérios de dependência declarada. A análise não incluiu comparador de referência, como a manutenção da configuração atual ou a otimização dos controles já instalados, cuja inclusão permitiria distinguir a preferência entre dois projetos da justificativa para investir. A posição do subcritério B3 no mérito Benefícios soma-se à classificação por perspectivas discutida na Seção 4.7 entre os fatores que condicionam a leitura dos pesos por nível sociotécnico.

A análise de sensibilidade variou um peso estratégico por vez. A dominância da A1 nos quatro méritos torna o ranking invariante a qualquer combinação admissível desses pesos, conforme a Seção 4.10, e a limitação recai sobre as perturbações simultâneas das prioridades locais, dos julgamentos e das descrições técnicas das alternativas, não exploradas neste estudo. Para aplicações sem relação de dominância entre alternativas, estudos futuros podem incorporar sensibilidade multivariada e exploração estocástica do espaço de pesos por simulação de Monte Carlo. Para o caso examinado, é possível simular perturbações das prioridades locais e dos julgamentos e adotar o ANP, em lugar do AHP, quando o problema exigir o tratamento de dependências entre critérios. A replicação do protocolo sob formulações *fuzzy*-BOCR, aplicadas por Lee (2009a, 2009b) ao mesmo problema de síntese, permitiria comparar os rankings obtidos com os deste estudo, investigação alinhada à recomendação de Ahmed e Kilic (2024) quanto às condições em que a representação difusa beneficia o decisor.

A origem dos subcritérios impõe restrição própria dentro dessa frente. A análise de conteúdo que os produziu foi codificada por um único pesquisador, com revisão pelo orientador e sem medida de concordância entre codificadores. A busca sistemática utilizou uma única base de dados, com restrição do conjunto de documentos incluídos, e a busca complementar partiu de um único documento, sem as iterações previstas no procedimento de *snowballing*. As três escolhas limitam a reprodutibilidade da constituição do corpus e indicam, para estudos futuros, codificação independente por mais de um pesquisador, ampliação das fontes de busca e aplicação iterativa do *snowballing* a partir de conjunto inicial diversificado.

A leitura dos pesos por perspectiva, na Seção 4.7, produziu três proposições que este estudo formulou e não verificou. A primeira é que a intensidade atribuída a critérios ambientais depende da disponibilidade de instrumentos de medida no processo avaliado, e não da importância declarada, proposição verificável pela comparação dos pesos de subcritérios de sustentabilidade instrumentados por métrica física com os de subcritérios sustentados apenas por percepção, em painéis distintos. A segunda e a terceira referem-se à inversão observada entre os níveis sociotécnicos. Fatores organizacionais e institucionais podem ser percebidos como condições prévias da empresa e não como critérios que diferenciam alternativas, e a comparação pareada pode favorecer critérios cujos efeitos são atribuíveis à tecnologia avaliada em detrimento dos que dependem de ações organizacionais posteriores à implantação. As duas admitem verificação por desenho que varie a formulação dos subcritérios sociotécnicos e o nível hierárquico dos respondentes. A divergência quanto à intensidade da perspectiva sociotécnica em relação a Almeida *et al.* (2023) admite ainda uma explicação de desenho, o escopo do problema avaliado, cujo efeito não foi isolado nesta pesquisa: aquele estudo avalia portfólio diversificado de projetos e este avalia duas alternativas para um problema operacional específico. A comparação controlada entre as duas amplitudes de escopo verificaria essa explicação. A leitura por perspectiva depende, ainda, da classificação de cada subcritério em uma única perspectiva. A reclassificação de subcritérios de efeito compartilhado, como Eficiência e Produtividade, altera os pesos agregados sem alterar os julgamentos, e recomenda-se, por isso, reportar a sensibilidade das leituras agregadas à classificação adotada.

A validação dos resultados delimita-se a quatro pontos. O estudo não contemplou validação longitudinal. A recomendação decisória foi gerada a partir dos julgamentos coletados, sem acompanhamento da implementação nem confronto entre benefícios esperados e realizados, verificação particularmente relevante em investimentos em I4.0, nos quais os retornos são distribuídos no tempo e os efeitos sistêmicos de difícil mensuração no curto prazo (Khan *et al.*, 2025). A estimação dos custos seguiu método paramétrico de Classe 5 da AACE International, apropriado à fase conceitual de avaliação de viabilidade, mas insuficiente para substituir orçamentos executivos em fases posteriores de detalhamento. Além da incerteza paramétrica, a omissão das intervenções físicas e a sobreposição do licenciamento na Alternativa 2 impedem uma comparação financeira em escopo equivalente, conforme a nota da Tabela 2. A correção requer a reconstrução dos fluxos de caixa das duas alternativas, com a inclusão das intervenções físicas de que depende a economia da Alternativa 2 e a conciliação do calendário de licenciamento entre o investimento inicial e as despesas recorrentes, além da reavaliação dos julgamentos afetados; os testes de sensibilidade dos pesos não a substituem.

Os ganhos energéticos atribuídos à Alternativa 1 provêm de estudo conduzido em forno de recozimento com queimadores de tubos radiantes, e sua transferência às estufas de cura da linha de pintura foi feita por analogia, sem diagnóstico de linha de base do excesso de ar e das perdas por queimador na instalação estudada. A estimativa de TRL 6-7 para a solução integrada é premissa da caracterização apresentada ao painel, conforme a Seção 3.4.2.3, e não classificação demonstrada para o conjunto. A avaliação organizacional apoia-se na discussão oral conduzida na sessão de devolutiva, sem instrumento estruturado nem registro das respostas individuais. Seu alcance como evidência da eficácia do protocolo é, por isso, limitado. O volume de produção foi tratado como constante ao longo do horizonte de análise, com base no plano de produção da unidade. Cenários de variação da demanda, com a consequente alteração do volume produzido, deslocariam os períodos de recuperação do capital nas duas alternativas, e a preservação da ordenação sob outros volumes permanece sem demonstração.

Embora o instrumento tenha distinguido a importância estratégica da magnitude total dos méritos, a elicitação dos *rescaling weights* não vinculou explicitamente as comparações ao referente de normalização das prioridades distributivas, e os valores de s devem ser interpretados como estimativas das magnitudes percebidas pelo painel. A manutenção do ranking sob pesos de magnitude iguais e sob s igual a v reduz a dependência ordinal do resultado em relação a esses valores, sem validar sua elicitação nem tornar incondicional a interpretação cardinal dos scores. Os pesos estratégicos refletem, ainda, a estrutura de preferências do painel em conjuntura macroeconômica volátil, marcada pela escalada de preços de energia e por tensões geopolíticas no período da coleta (IMF, 2026), e sua reutilização exige reaplicação completa do protocolo. A camada de interpretabilidade assistida por IA deve ser compreendida como apoio à leitura qualitativa dos resultados, e não como validação autônoma da decisão. A rastreabilidade das imprecisões à configuração da camada, apresentada na Seção 4.4, indica três correções aplicáveis à ferramenta, a substituição dos valores concretos dos exemplos do prompt por marcadores, o registro das condições de aplicabilidade junto a cada resultado do corpus bibliográfico, com validação automática análoga à já implementada para autoria e ano, e a inclusão da estrutura do instrumento entre os dados descritivos enviados à camada.

A comparação com os benchmarks da literatura, na Seção 4.11, tem alcance descritivo. Os cinco estudos confrontados pertencem a domínios decisórios distintos, com painéis, critérios e contextos próprios, e as interpretações contextuais propostas para as diferenças de peso não tiveram seus efeitos isolados. Permanecem sem teste a associação entre horizontes de longo prazo e maior ponderação de Oportunidades, o efeito da composição do mérito Custos sobre seu peso relativo, a influência do contexto socioeconômico sobre a

divergência interna entre Índia e Reino Unido e a leitura da configuração obtida como resposta à pressão por resultados de curto prazo. O isolamento desses efeitos exigiria desenho comparativo com controle do escopo decisório e da composição dos méritos, por aplicação do mesmo protocolo a problemas de amplitudes distintas.

A incorporação de projeções de demanda por técnicas formais de previsão permitiria estimar o retorno sob cenários de variação do volume. O acompanhamento da alternativa recomendada em horizonte de médio prazo, a reaplicação periódica do protocolo e a coleta de dados pós-implementação permitiriam avaliar os ganhos efetivamente obtidos, verificar a estabilidade dos pesos sob diferentes conjunturas e refinar a calibração da estrutura de critérios e da camada XAI.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dissertação consolidou um processo estruturado de apoio à decisão de investimentos em tecnologias da I4.0 no setor automotivo. O modelo não se limita à priorização entre duas alternativas tecnológicas específicas. Ele oferece um arranjo metodológico replicável que articula critérios de competitividade, fatores sociotécnicos e dimensões de sustentabilidade em estrutura única e auditável, com suporte computacional acessível e camada de interpretabilidade fundamentada em literatura científica. A integração entre métodos multicritério, ferramentas computacionais de baixa barreira de entrada e camadas explicáveis de IA constitui direção relevante para a difusão de práticas estruturadas de avaliação de investimentos em manufatura avançada. O estudo oferece base concreta para que decisões de investimento em I4.0 no setor automotivo deixem de depender de avaliações informais e passem a apoiar-se em estrutura multicritério auditável.

REFERÊNCIAS

AACE INTERNATIONAL. **Recommended practice no. 18R-97**: cost estimate classification system – as applied in engineering, procurement, and construction for the process industries. Morgantown: AACE International, 2020. Disponível em: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_18r-97.pdf. Acesso em: 14 jun. 2026.

ABDEL-KADER, M. G.; DUGDALE, D. Evaluating investments in advanced manufacturing technology: a fuzzy set theory approach. **British Accounting Review**, Amsterdam, v. 33, n. 4, p. 455-489, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1006/bare.2001.0177. Acesso em: 11 nov. 2024.

ABDULLAH, A. A. H.; ALMAQTARI, F. A. The impact of artificial intelligence and industry 4.0 on transforming accounting and auditing practices. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p. 100218, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100218. Acesso em: 13 jun. 2026.

ABUBAKAR, A. M. *et al.* Knowledge management, decision-making style and organizational performance. **Journal of Innovation & Knowledge**, Amsterdam, v. 4, n. 2, p. 104-114, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jik.2017.07.003. Acesso em: 19 dez. 2024.

AGOSTINHO, C. *et al.* Explainability as the key ingredient for AI adoption in industry 5.0 settings. **Frontiers in Artificial Intelligence**, Lausanne, v. 6, art. 1264372, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3389/frai.2023.1264372. Acesso em: 9 maio 2026.

AGRAWAL, R. *et al.* Progress and trends in integrating industry 4.0 within circular economy: a comprehensive literature review and future research propositions. **Business Strategy and the Environment**, Hoboken, v. 31, n. 1, p. 559-579, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1002/bse.2910. Acesso em: 13 jun. 2026.

AHMED, F.; KILIC, K. Does fuzzification of pairwise comparisons in analytic hierarchy process add any value?. **Soft Computing**, Berlin, v. 28, n. 5, p. 4267-4284, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00500-023-09593-9. Acesso em: 5 set. 2026.

AHMED, I.; JEON, G.; PICCIALLI, F. From artificial intelligence to explainable artificial intelligence in industry 4.0: a survey on what, how, and where. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, New York, v. 18, n. 8, p. 5031-5042, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146552. Acesso em: 9 maio 2026.

AL ZADJALI, A.; JOY, V. M.; WALKE, S. M. Enhancing the efficiency of industrial boilers and burners using deep learning techniques. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING AND DATA ANALYTICS, 2., 2024, Shinas. **Proceedings** [...]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024. p. 1-5. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ICCDA64887.2024.10867360. Acesso em: 13 jun. 2026.

ALIZADEH, R. *et al.* Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 137, p. 111174, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111174. Acesso em: 28 abr. 2025.

ALMEIDA, R. P. *et al.* How to assess investments in industry 4.0 technologies? A multiple-criteria framework for economic, financial, and sociotechnical factors. **Production Planning & Control**, Abingdon, v. 34, n. 16, p. 1583-1602, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09537287.2022.2035445. Acesso em: 11 nov. 2024.

ALONSO, J. A.; LAMATA, M. T. Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems**, Singapore, v. 14, n. 04, p. 445-459, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1142/S0218488506004114. Acesso em: 13 jun. 2026.

ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira 2025**. São Paulo: ANFAVEA, 2025. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2025/04/DIGITAL-ANUARIO-2025altafinal_compressed-1.pdf. Acesso em: 2 maio 2025.

ARORA, C. *et al.* Integrating agriculture and industry 4.0 under "Agri-food 4.0" to analyze suitable technologies to overcome agronomical barriers. **British Food Journal**, Bingley, v. 124, n. 7, p. 2061-2095, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1108/BFJ-08-2021-0934. Acesso em: 17 nov. 2024.

ASSAF NETO, A. **Finanças corporativas e valor**. 8. ed. São Paulo: GEN Atlas, 2020.

AULL-HYDE, R.; ERDOGAN, S.; DUKE, J. M. An experiment on the consistency of aggregated comparison matrices in AHP. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 171, n. 1, p. 290-295, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.037. Acesso em: 13 jun. 2026.

AVDOSHIN, S. M.; PESOTSKAYA, E. Y. Explainable AI for industry 5.0: shedding light on the black box. **Business Informatics**, Boraas, v. 20, n. 1, p. 7-28, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.1.7.28. Acesso em: 9 maio 2026.

AYAN, B.; ABACIOĞLU, S.; BASILIO, M. P. A comprehensive review of the novel weighting methods for multi-criteria decision-making. **Information**, Basel, v. 14, n. 5, p. 285, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ info14050285. Acesso em: 15 abr. 2026.

BABU, T.; NAIR, R. R.; KISHORE, S. Applications of artificial intelligence and machine learning in industry 4.0. *In*: THIRUNAVUKKARASAN, M. *et al.* (ed.). **Artificial intelligence and machine learning for industry 4.0**. Chichester: Wiley, 2025. p. 107-143. Disponível em: https://doi.org/10.1002/9781394275076.ch5. Acesso em: 8 maio 2026.

BAC, T. P. *et al.* Explainable artificial intelligence for cybersecurity in smart manufacturing. *In*: TRAN, K. P. (ed.). **Artificial intelligence for smart manufacturing**: methods, applications, and challenges. Cham: Springer, 2023. p. 199-223. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30510-8_10. Acesso em: 9 maio 2026.

BADEMOSI, F.; ISSA, R. R. A. Factors influencing adoption and integration of construction robotics and automation technology in the US. **Journal of Construction Engineering and Management**, Reston, v. 147, n. 8, art. 04021075, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002103. Acesso em: 17 nov. 2024.

BAI, C. *et al.* Industry 4.0 technologies assessment: a sustainability perspective. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 229, p. 107776, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776. Acesso em: 24 nov. 2024.

BAI, C.; SARKIS, J. Improving green flexibility through advanced manufacturing technology investment: modeling the decision process. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 188, p. 86-104, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.013. Acesso em: 17 nov. 2024.

BAL, H. Ç.; ERKAN, Ç. Industry 4.0 and competitiveness. **Procedia Computer Science**, Amsterdam, v. 158, p. 625-631, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.096. Acesso em: 17 nov. 2024.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Boletim focus**. Brasília: Banco Central do Brasil, 2026. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus. Acesso em: 16 abr. 2026.

BANERJEE, P.; SHARMA, N. Digital transformation and talent management in industry 4.0: a systematic literature review and the future directions. **The Learning Organization**, Bingley, v. 32, n. 4, p. 620-640, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1108/TLO-10-2023-0183. Acesso em: 13 jun. 2026.

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.

BASL, J.; POÓR, P. Processes of innovations implementation into industry 4.0. Automotive industry standards. **Acta Innovations**, Konstantynów Łódzki, n. 35, p. 21-28, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.35.2. Acesso em: 17 nov. 2024.

BATES, C. A.; CLAUSEN, C. Engineering readiness: how the TRL figure of merit coordinates technology development. **Engineering Studies**, London, v. 12, n. 1, p. 9-38, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1080/19378629.2020.1728282. Acesso em: 13 jun. 2026.

BEAN, T. *et al.* To twin or not to twin, that is the question: evaluating the business justification for digital twins in legacy systems. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Dordrecht, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10845-025-02727-w. Acesso em: 13 jun. 2026.

BEDNAR, P. M.; WELCH, C. Socio-Technical perspectives on smart working: creating meaningful and sustainable systems. **Information Systems Frontiers**, New York, v. 22, n. 2, p. 281-298, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10796-019-09921-1. Acesso em: 17 nov. 2024.

BEIER, G. *et al.* Industry 4.0: how it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – a literature review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 259, art. 120856, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856. Acesso em: 17 nov. 2024.

BELMAN-LOPEZ, C. E.; JIMÉNEZ-GARCÍA, J. A.; HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, S. Análisis exhaustivo de los principios de diseño en el contexto de industria 4.0. **Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial**, Valencia, v. 17, n. 4, p. 432, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.4995/riai.2020.12579. Acesso em: 8 maio 2026.

BELTRAMI, M. *et al.* Industry 4.0 and sustainability: towards conceptualization and theory. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 312, art. 127733, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733. Acesso em: 28 nov. 2024.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1108/01443570210414338. Acesso em: 17 nov. 2024.

BOHASHKO, I.; BOHASHKO, O.; KOSMIDAILO, I. Industry 4.0: implementation of digital technologies to improve production and economic efficiency. *In*: ENVIRONMENT, TECHNOLOGY, RESOURCES: INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE, 16., 2025, Rezekne. **Proceedings** [...]. Rezekne: Rezekne Academy of Technologies, 2025. v. 4, p. 45-51. Disponível em: https://doi.org/10.17770/etr2025vol4.8460. Acesso em: 13 jun. 2026.

BONILLA, S. H. *et al.* Industry 4.0 and sustainability implications: a scenario-based analysis of the impacts and challenges. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 10, p. 3740, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su10103740. Acesso em: 14 jun. 2026.

BOZÓKI, S. *et al.* Analysis of pairwise comparison matrices: an empirical research. **Annals of Operations Research**, New York, v. 211, n. 1, p. 511-528, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10479-013-1328-1. Acesso em: 2 set. 2026.

BOZÓKI, S.; FÜLÖP, J.; RÓNYAI, L. On optimal completion of incomplete pairwise comparison matrices. **Mathematical and Computer Modelling**, Amsterdam, v. 52, n. 1–2, p. 318-333, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.02.047. Acesso em: 4 maio 2026.

BRANCO, R. *et al.* Explainable AI in manufacturing: an analysis of transparency and interpretability methods for the XMANAI platform. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING, TECHNOLOGY AND INNOVATION, 29., 2023, Edinburgh. **Proceedings** [...]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC58018.2023.10332373. Acesso em: 27 set. 2025.

BRASIL. **Balanço energético nacional 2024**: Ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024. Acesso em: 17 mar. 2026.

BRASIL. **Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural**. Brasília: MME, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2025/08-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-agosto-de-2025.pdf/view. Acesso em: 17 mar. 2026.

BREQUE, M.; DE NUL, L.; PETRIDIS, A. **Industry 5.0 - towards a sustainable, human-centric and resilient European industry**. Brussels: European Commission, 2021. Disponível em: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/2359a188-5702-4831-a529-3dac3f4ab2a3_en. Acesso em: 5 jun. 2024.

BRUNDTLAND, G. H. *et al.* **Our common future**: report of the World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford University Press, 1987. Disponível em: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf. Acesso em: 27 jan. 2025.

BUCHNER, G. A. *et al.* Techno-economic assessment framework for the chemical industry - based on technology readiness levels. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 57, n. 25, p. 8502-8517, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b01248. Acesso em: 13 jun. 2026.

BUCKLEY, D. J. *et al.* Frontiers of graphene and 2D material-based gas sensors for environmental monitoring. **2D Materials**, Bristol, v. 7, n. 3, p. 032002, 2020. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1583/ab7bc5. Acesso em: 2 jun. 2024.

BUCUR, M. An analysis and identification of current trends in research on the manufacturing industry: industry 4.0 versus industry 5.0. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE INTERDISCIPLINARITY IN ENGINEERING, 18., 2024, Târgu Mureș. **Proceedings** [...]. Cham: Springer, 2025. p. 1-13. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-81378-8_1. Acesso em: 8 maio 2026.

BURNHAM, J. F. Scopus database: a review. **Biomedical Digital Libraries**, London, v. 3, art. 1, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1186/1742-5581-3-1. Acesso em: 17 nov. 2024.

CAÇÃO, J.; SANTOS, J.; ANTUNES, M. Explainable AI for industrial fault diagnosis: a systematic review. **Journal of Industrial Information Integration**, Amsterdam, v. 47, p. 100905, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100905. Acesso em: 9 maio 2026.

CAFASSO, D. *et al.* Framework for selecting manufacturing simulation software in industry 4.0 environment. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 15, art. 5909, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su12155909. Acesso em: 6 set. 2026.

CAGNO, E. *et al.* Energy management and industry 4.0: analysis of the enabling effects of digitalization on the implementation of energy management practices. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 390, p. 125877, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125877. Acesso em: 8 maio 2025.

CASAROTTO, N.; KOPITTKE, B. **Análise de investimentos - manual para solução de problemas e tomadas de decisão**. 12. ed. São Paulo: GEN Atlas, 2019.

CAVALIERI, A.; REIS, J.; AMORIM, M. Socioenvironmental assessment and application process for IOT: a comprehensive approach. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 436, p. 140348, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140348. Acesso em: 13 jun. 2026.

CHEN, Z. *et al.* A physics-informed machine learning approach for temperature field prediction in metallic additive manufacturing. **Journal of Industrial Information Integration**, Amsterdam, v. 47, p. 100899, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100899. Acesso em: 13 jun. 2026.

CHING, N. T. *et al.* Industry 4.0 applications for sustainable manufacturing: a systematic literature review and a roadmap to sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 334, p. 130133, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130133. Acesso em: 20 jun. 2026.

CONTADOR, J. C. *et al.* Flexibility in the Brazilian industry 4.0: challenges and opportunities. **Global Journal of Flexible Systems Management**, New Delhi, v. 21, p. 15-31, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s40171-020-00240-y. Acesso em: 17 nov. 2024.

CONTIERI, P. G. S.; ANHOLON, R.; DE SANTA-EULALIA, L. A. Industry 4.0 enabling technologies in manufacturing: implementation priorities and difficulties in an emerging country. **Technology Analysis & Strategic Management**, Abingdon, v. 34, n. 5, p. 489-503, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1908536. Acesso em: 31 ago. 2026.

CORDEIRO, R. F.; REIS, L. P.; FERNANDES, J. M. A hierarchical model for industry 4.0 concepts. **RAM. Revista de Administração Mackenzie**, São Paulo, v. 24, n. 2, eRAMR230061, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1678-6971/eRAMR230061.en. Acesso em: 8 maio 2026.

CORDEIRO, R. F.; REIS, L. P.; FERNANDES, J. M. A study on the barriers that impact the adoption of industry 4.0 in the context of Brazilian companies. **The TQM Journal**, Bingley, v. 36, n. 1, p. 361-384, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1108/TQM-07-2022-0239. Acesso em: 13 jun. 2026.

COUGHLAN, P.; COGHLAN, D. Action research for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 22, n. 2, p. 220-240, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1108/01443570210417515. Acesso em: 17 nov. 2024.

COVARRUBIAS V., A. The boom of the Mexican automotive industry: from NAFTA to USMCA. *In*: COVARRUBIAS V., A.; RAMÍREZ PEREZ, S. M. (ed.). **New frontiers of the automobile industry**: exploring geographies, technology, and institutional challenges. Cham: Palgrave Macmillan, 2020. p. 323-348. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-18881-8_13. Acesso em: 17 nov. 2024.

CRAWFORD, G.; WILLIAMS, C. A note on the analysis of subjective judgment matrices. **Journal of Mathematical Psychology**, Amsterdam, v. 29, n. 4, p. 387-405, 1985. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0022-2496(85)90002-1. Acesso em: 3 set. 2026.

CUNHA, A. M. *et al.* Exports of manufactured goods and structural change: Brazil in the face of Chinese competition. **Structural Change and Economic Dynamics**, Amsterdam, v. 64, p. 1-12, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.strueco.2022.11.002. Acesso em: 13 jun. 2026.

DAI, D. *et al.* Generative and predictive AI for digital twin systems in manufacturing. **Frontiers in Artificial Intelligence**, Lausanne, v. 8, art. 1655470, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3389/frai.2025.1655470. Acesso em: 9 maio 2026.

DALENOGARE, L. S. *et al.* The expected contribution of industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 204, p. 383-394, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019. Acesso em: 24 nov. 2024.

DATTA, V. *et al.* Multi-attribute decision model using the analytic hierarchy process for the justification of manufacturing systems. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 28, n. 2, p. 227-234, 1992. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0925-5273(92)90035-6. Acesso em: 24 nov. 2024.

DB ENERGY. **Typical payback periods of energy-saving technologies**: an overview of solutions for industry. Wrocław, 2024. Disponível em: https://www.dbenergy.pl/en/knowledge-base/typical-payback-periods-of-energy-saving-technologies. Acesso em: 15 abr. 2026.

DEMIRTAS, E. A.; ÜSTÜN, Ö. An integrated multiobjective decision making process for supplier selection and order allocation. **Omega**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 76-90, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.11.003. Acesso em: 19 dez. 2024.

DISTELMANS, T. *et al.* Governing innovation: how technology maturity shapes R&D contracts. **Technovation**, Amsterdam, v. 153, p. 103521, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.technovation.2026.103521. Acesso em: 13 jun. 2026.

DIXIT, C.; KUMAR, R.; KUMAR, A. Developing sustainable and resilient supply chain: industry 4.0 drivers, dynamic capabilities, and performance evaluation. **Production Planning & Control**, Abingdon, p. 1-15, 2026. Disponível em: https://www.doi.org/10.1080/09537287.2025.2611895. Acesso em: 13 jun. 2026.

DODEVSKA, Z. *et al.* When fairness meets consistency in AHP pairwise comparisons. **Mathematics**, Basel, v. 11, n. 3, p. 604, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/math11030604. Acesso em: 9 fev. 2026.

DONG, J. *et al.* Investigation on the effects of the secondary air distribution on the flow and combustion characteristics of black liquor: a computational fluid dynamic (CFD) approach modified by the user defined functions (UDFs). **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Amsterdam, v. 168, p. 109458, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109458. Acesso em: 14 jun. 2026.

DONG, Y. *et al.* Consensus models for AHP group decision making under row geometric mean prioritization method. **Decision Support Systems**, Amsterdam, v. 49, n. 3, p. 281-289, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.03.003. Acesso em: 3 set. 2026.

DURÁN, O.; AGUILO, J. Computer-aided machine-tool selection based on a fuzzy-AHP approach. **Expert Systems with Applications**, Amsterdam, v. 34, n. 3, p. 1787-1794, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.01.046. Acesso em: 24 nov. 2024.

ELKINGTON, J. Partnerships from cannibals with forks: the triple bottom line of 21st-century business. **Environmental Quality Management**, Hoboken, v. 8, n. 1, p. 37-51, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1002/tqem.3310080106. Acesso em: 28 nov. 2024.

ELO, S.; KYNGÄS, H. The qualitative content analysis process. **Journal of Advanced Nursing**, Hoboken, v. 62, n. 1, p. 107-115, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2007.04569.x. Acesso em: 3 set. 2026.

EMROUZNEJAD, A.; MARRA, M. The state-of-the-art development of AHP (1979–2017): a literature review with a social network analysis. **International Journal of Production Research**, London, v. 55, n. 22, p. 6653-6675, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1334976. Acesso em: 18 nov. 2024.

ENRIQUE, D. V. *et al.* Implementing industry 4.0 for flexibility, quality, and productivity improvement: technology arrangements for different purposes. **International Journal of Production Research**, London, v. 61, n. 20, p. 7001-7026, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2142689. Acesso em: 19 dez. 2024.

ERTUGRUL KARSAK, E.; TOLGA, E. Fuzzy multi-criteria decision-making procedure for evaluating advanced manufacturing system investments. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 69, n. 1, p. 49-64, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00081-5. Acesso em: 11 nov. 2024.

ESCOBAR, M. T.; AGUARÓN, J.; MORENO-JIMÉNEZ, J. M. A note on AHP group consistency for the row geometric mean priorization procedure. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 153, n. 2, p. 318-322, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00154-1. Acesso em: 14 jun. 2026.

FAN, Y.-J.; TENG, P.-S. Managing organizational change and transformation for industry 4.0 integration. *In*: KHAN, M. I.; AL-GHAMDI, S. G.; KHAN, M. (ed.). **Industry 4.0 and sustainability**: integrating digital technologies and circular models for a sustainable future. Amsterdam: Elsevier, 2026. p. 441-455. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-443-32880-0.00001-2. Acesso em: 14 jun. 2026.

FERNÁNDEZ-MUÑIZ, B.; MONTES-PEÓN, J. M.; VÁZQUEZ-ORDÁS, C. J. Relation between occupational safety management and firm performance. **Safety Science**, Amsterdam, v. 47, n. 7, p. 980-991, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.022. Acesso em: 20 jun. 2026.

FERREIRA, R. *et al.* Agentic AI architecture for multi-criteria decision-making: a collaborative human-AI framework. **Group Decision and Negotiation**, Dordrecht, v. 35, n. 3, p. 45, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10726-026-10004-1. Acesso em: 21 jun. 2026.

FONSECA, C. V. C.; PREDO, R. M.; BLIKSTAD, N. M. D. Defining a research agenda for industry 4.0 technologies in corporate strategies: insights from complex networks and machine learning. **International Journal of Production Research**, London, v. 63, n. 23, p. 8743-8760, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2514253. Acesso em: 14 jun. 2026.

FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 137, p. 1573-1587, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150. Acesso em: 27 jan. 2025.

FORMAN, E.; PENIWATI, K. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 108, n. 1, p. 165-169, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00244-0. Acesso em: 18 mar. 2026.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 210, p. 15-26, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004. Acesso em: 24 nov. 2024.

FRANK, A. G. *et al.* How lean and industry 4.0 affect worker outcomes and operational performance: a quantitative assessment of competing models. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 279, p. 109475, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109475. Acesso em: 2 dez. 2024.

FREUND, L.; AL-MAJEED, S. S. Managing industry 4.0 integration-the industry 4.0 knowledge & technology framework. **Logforum**, Poznan, v. 17, n. 4, p. 569-586, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.17270/J.LOG.2021.635. Acesso em: 2 jun. 2024.

GARUTI, C. *et al.* A systemic rebuttal to the criticism of using the eigenvector for priority assessment in the analytic hierarchy process for decision making. **Computación y Sistemas**, Ciudad de México, v. 12, n. 2, p. 192-207, 2008. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-55462008000400005&lng=es&nrm=iso. Acesso em: 24 nov. 2024.

GHOBAKHLOO, M. *et al.* Industry 4.0 ten years on: a bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 302, p. 127052, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127052. Acesso em: 24 nov. 2024.

GHOBAKHLOO, M.; FATHI, M. Corporate survival in industry 4.0 era: the enabling role of lean-digitized manufacturing. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Melbourne, v. 31, n. 1, p. 1-30, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2018-0417. Acesso em: 2 dez. 2024.

GHOBAKHLOO, M. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 252, p. 119869, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869. Acesso em: 24 nov. 2024.

GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Melbourne, v. 29, n. 6, p. 910-936, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2018-0057. Acesso em: 28 nov. 2024.

GIAMPIERI, A. *et al.* A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 261, p. 114074, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114074. Acesso em: 28 nov. 2024.

GIL, A. Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.

GOEPEL, K. D. Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (AHP-OS). **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, Pittsburgh, v. 10, n. 3, p. 469-487, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590. Acesso em: 10 jun. 2026.

GRECO, S. *et al.* On the methodological framework of composite indices: a review of the issues of weighting, aggregation, and robustness. **Social Indicators Research**, Dordrecht, v. 141, n. 1, p. 61-94, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11205-017-1832-9. Acesso em: 13 jun. 2026.

GRECO, S.; SŁOWIŃSKI, R.; WALLENIUS, J. Fifty years of multiple criteria decision analysis: from classical methods to robust ordinal regression. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, p. 1-27, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.07.038. Acesso em: 11 nov. 2024.

GRZYBOWSKI, A. Z. New results on inconsistency indices and their relationship with the quality of priority vector estimation. **Expert Systems with Applications**, Amsterdam, v. 43, p. 197-212, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.08.049. Acesso em: 2 set. 2026.

HAFEEZ, M. A. *et al.* Challenges and opportunities for the application of digital twins in hard-to-abate industries: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 209, p. 107796, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107796. Acesso em: 9 maio 2026.

HAMZAH, M. I.; PONTES, N. What drives car buyers to accept a rejuvenated brand? The mediating effects of value and pricing in a consumer-brand relationship. **Journal of Strategic Marketing**, Abingdon, v. 32, n. 2, p. 114-136, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1080/0965254X.2022.2129749. Acesso em: 9 jul. 2026.

HANSEN, A. K.; CHRISTIANSEN, L.; LASSEN, A. H. Technology isn't enough for industry 4.0: on SMEs and hindrances to digital transformation. **International Journal of Production Research**, London, v. 63, n. 18, p. 6585-6605, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2305800. Acesso em: 13 jun. 2026.

HARDING, M.; LINDÉ, J.; TRABANDT, M. Understanding post-COVID inflation dynamics. **Journal of Monetary Economics**, Amsterdam, v. 140, p. S101-S118, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmoneco.2023.05.012. Acesso em: 24 nov. 2024.

HARKER, P. T. Incomplete pairwise comparisons in the analytic hierarchy process. **Mathematical Modelling**, Amsterdam, v. 9, n. 11, p. 837-848, 1987. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90503-3. Acesso em: 10 jul. 2025.

HE, S.; HUANG, C.-Y.; WU, I.-A. Intelligent monitoring system for annealing furnace combustion. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSUMER ELECTRONICS - TAIWAN, 12., 2025, Kaohsiung. **Proceedings** [...]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025. p. 239-240. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan66881.2025.11207929. Acesso em: 15 jun. 2026.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *In*: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 49., 2016, Koloa. **Proceedings** [...]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. p. 3928-3937. Disponível em: https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488. Acesso em: 28 nov. 2024.

HIRSI, A. *et al.* Artificial intelligence performance evaluation for URLLC of industrial IoT applications: a review, open challenges and future directions. **Physical Communication**, Amsterdam, v. 72, p. 102712, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.phycom.2025.102712. Acesso em: 9 maio 2026.

HO, W.; MA, X. The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 267, n. 2, p. 399-414, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.007. Acesso em: 10 nov. 2024.

HORVÁTH, D.; SZABÓ, R. Zs. Driving forces and barriers of industry 4.0: do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 146, p. 119-132, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021. Acesso em: 28 nov. 2024.

HOYER, C.; GUNAWAN, I.; REAICHE, C. H. The implementation of industry 4.0 – a systematic literature review of the key factors. **Systems Research and Behavioral Science**, Hoboken, v. 37, n. 4, p. 557-578, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1002/sres.2701. Acesso em: 28 nov. 2024.

HSIEH, H.-F.; SHANNON, S. E. Three approaches to qualitative content analysis. **Qualitative Health Research**, Thousand Oaks, v. 15, n. 9, p. 1277-1288, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1177/1049732305276687. Acesso em: 3 set. 2026.

HUANG, K. *et al.* The impact of industry 4.0 on supply chain capability and supply chain resilience: a dynamic resource-based view. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 262, p. 108913, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108913. Acesso em: 14 jun. 2026.

HUANG, Z. *et al.* A survey on AI-driven digital twins in industry 4.0: smart manufacturing and advanced robotics. **Sensors**, Basel, v. 21, n. 19, p. 6340, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s21196340. Acesso em: 9 maio 2026.

HUSSINKI, H. *et al.* Accounting for intangibles: a critical review. **Journal of Accounting Literature**, Bingley, v. 47, n. 5, p. 27-51, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1108/JAL-05-2022-0060. Acesso em: 13 jun. 2026.

IMD. **2025 IMD world competitiveness ranking**. Lausanne: IMD, 2025. Disponível em: https://www.imd.org/centers/wcc/world-competitiveness-center/rankings/world-competitiveness-ranking/rankings/wcr-rankings/. Acesso em: 28 fev. 2026.

IMF. **World economic outlook**: global economy in the shadow of war. Washington D.C.: International Monetary Fund, 2026. Disponível em: https://www.imf.org/en/publications/weo/issues/2026/04/14/world-economic-outlook-april-2026. Acesso em: 14 abr. 2026.

INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM. **Fact sheet**. Needham: Industrial Internet Consortium, 2013. Disponível em: http://www.iiconsortium.org/docs/IIC_FACT_SHEET.pdf. Acesso em: 5 maio 2024.

INTERNATIONAL SOCIETY ON MCDM. **Mission of the society**. Greenville: International Society on MCDM, 2025. Disponível em: https://www.mcdmsociety.org/2025/01/12/mission-of-the-society/. Acesso em: 26 abr. 2025.

ISHIZAKA, A.; BALKENBORG, D.; KAPLAN, T. Does AHP help us make a choice? An experimental evaluation. **Journal of the Operational Research Society**, Abingdon, v. 62, n. 10, p. 1801-1812, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1057/jors.2010.23. Acesso em: 27 ago. 2026.

ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. **Expert Systems with Applications**, Amsterdam, v. 38, n. 11, p. 14336-14345, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143. Acesso em: 17 nov. 2024.

ISHIZAKA, A.; LUSTI, M. How to derive priorities in AHP: a comparative study. **Central European Journal of Operations Research**, Heidelberg, v. 14, n. 4, p. 387-400, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10100-006-0012-9. Acesso em: 3 maio 2026.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-Criteria decision analysis**. Chichester: Wiley, 2013.

IVANOV, D. The industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. **International Journal of Production Research**, London, v. 61, n. 5, p. 1683-1695, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892. Acesso em: 20 jun. 2026.

JAVAID, M. *et al.* Understanding the adoption of industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. **Sustainable Operations and Computers**, Amsterdam, v. 3, p. 203-217, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.008. Acesso em: 20 jun. 2026.

JUGEND, D. *et al.* Industry 4.0 technologies for the adoption of the circular economy: an analysis of institutional pressures and the effects on firm performance. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 370, p. 122260, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122260. Acesso em: 13 jun. 2026.

KABAK, M.; DAĞDEVIREN, M. Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 79, p. 25-33, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.036. Acesso em: 14 jun. 2026.

KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; WAHLSTER, W. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**: final report of the Industrie 4.0 Working Group. München: acatech, 2013. Disponível em: https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/. Acesso em: 30 abr. 2025.

KAGERMANN, H.; LUKAS, W.; WAHLSTER, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. **VDI Nachrichten**, Düsseldorf, p. 1-2, 2011. Disponível em: https://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf. Acesso em: 5 jun. 2024.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W. Ten years of Industrie 4.0. **Sci**, Basel, v. 4, n. 3, p. 26, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/sci4030026. Acesso em: 1 maio 2025.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. A. Sustainable industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, Amsterdam, v. 117, p. 408-425, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009. Acesso em: 28 nov. 2024.

KARANDE, P.; ZAVADSKAS, E. K.; CHAKRABORTY, S. A study on the ranking performance of some MCDM methods for industrial robot selection problems. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, Vancouver, p. 399-422, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2016.1.001. Acesso em: 9 jul. 2026.

KARSAK, E. E. Distance-based fuzzy MCDM approach for evaluating flexible manufacturing system alternatives. **International Journal of Production Research**, London, v. 40, n. 13, p. 3167-3181, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207540210146062. Acesso em: 11 nov. 2024.

KHAN, M. I. *et al.* Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: pathways and prospects. **Sustainable Production and Consumption**, Amsterdam, v. 54, p. 149-189, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012. Acesso em: 10 jul. 2025.

KIM, D. K.; PARK, S. An analysis of the effects of occupational accidents on corporate management performance. **Safety Science**, Amsterdam, v. 138, p. 105228, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105228. Acesso em: 13 jun. 2026.

KIM, G.; PARK, C. S.; YOON, K. P. Identifying investment opportunities for advanced manufacturing systems with comparative-integrated performance measurement. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 23-33, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00014-5. Acesso em: 3 set. 2026.

KITCHENHAM, B. *et al.* Systematic literature reviews in software engineering – a systematic literature review. **Information and Software Technology**, Amsterdam, v. 51, n. 1, p. 7-15, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009. Acesso em: 2 jul. 2025.

KUBICKOVA, L. *et al.* The implementation of industry 4.0 elements as a tool stimulating the competitiveness of engineering enterprises. **Journal of Competitiveness**, Zlin, v. 13, n. 1, p. 76-94, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.7441/joc.2021.01.05. Acesso em: 1 maio 2025.

KUMAR, V.; VRAT, P.; SHANKAR, R. MCDM model to rank the performance outcomes in the implementation of industry 4.0. **Benchmarking: An International Journal**, Bingley, v. 31, n. 5, p. 1453-1491, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2022-0273. Acesso em: 10 nov. 2024.

ŁACH, Ł.; SVYETLICHNYY, D. Advanced numerical modeling of powder bed fusion: from physics-based simulations to AI-augmented digital twins. **Materials**, Basel, v. 19, n. 2, p. 426, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma19020426. Acesso em: 15 mar. 2026.

LASI, H. *et al.* Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, Wiesbaden, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4. Acesso em: 24 nov. 2024.

LAUBSCHER, R.; ROUSSEAU, P. An integrated approach to predict scalar fields of a simulated turbulent jet diffusion flame using multiple fully connected variational autoencoders and MLP networks. **Applied Soft Computing**, Amsterdam, v. 101, p. 107074, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107074. Acesso em: 14 jun. 2026.

LEE, A. H. I. A fuzzy AHP evaluation model for buyer–supplier relationships with the consideration of benefits, opportunities, costs and risks. **International Journal of Production Research**, London, v. 47, n. 15, p. 4255-4280, 2009a. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207540801908084. Acesso em: 1 maio 2025.

LEE, A. H. I. A fuzzy supplier selection model with the consideration of benefits, opportunities, costs and risks. **Expert Systems with Applications**, Amsterdam, v. 36, n. 2, pt. 2, p. 2879-2893, 2009b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.01.045. Acesso em: 28 abr. 2025.

LEE, A. H. I.; CHEN, H. H.; KANG, H.-Y. Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 34, n. 1, p. 120-126, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.013. Acesso em: 1 maio 2025.

LEE, H. Y. *et al.* Multi-Criteria decision-making tools for project selection by international conglomerates. **Process Integration and Optimization for Sustainability**, Heidelberg, v. 8, n. 2, p. 375-393, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s41660-023-00376-1. Acesso em: 1 set. 2026.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, Amsterdam, v. 3, p. 18-23, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001. Acesso em: 16 dez. 2024.

LEFLEY, F. The payback method of investment appraisal: a review and synthesis. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 44, n. 3, p. 207-224, 1996. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0925-5273(96)00022-9. Acesso em: 1 maio 2025.

LI, C. *et al.* Simulation analysis of temperature field of step heating furnace. **Journal of Physics: Conference Series**, Bristol, v. 3004, n. 1, p. 012081, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1742-6596/3004/1/012081. Acesso em: 20 jun. 2026.

LI, H.; YAO, X.; LU, J. Optimal investment decision-making of energy storage technologies on renewable energy generation side based on the internal type-2 trapezoidal fuzzy sets-PROMETHEE-II method. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Amsterdam, v. 170, p. 110861, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110861. Acesso em: 3 abr. 2026.

LIANG, J.; YANG, J. Application of the AHP method on the optimization with undesirable priorities. **Engineering with Computers**, London, v. 38, n. S3, p. 2137-2153, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00366-021-01359-x. Acesso em: 1 set. 2026.

LINARES, P. Are inconsistent decisions better? An experiment with pairwise comparisons. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 193, n. 2, p. 492-498, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.11.030. Acesso em: 26 fev. 2026.

LOMBARDI NETTO, A. *et al.* Multiple criteria assessment of sustainability programs in the textile industry. **International Transactions in Operational Research**, Hoboken, v. 28, n. 3, p. 1550-1572, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1111/itor.12871. Acesso em: 28 nov. 2024.

LU, Y. Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, Amsterdam, v. 6, p. 1-10, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005. Acesso em: 16 dez. 2024.

MADURAI ELAVARASAN, R. *et al.* Envisioning the UN sustainable development goals (SDGs) through the lens of energy sustainability (SDG 7) in the post-COVID-19 world. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 292, p. 116665, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116665. Acesso em: 1 maio 2025.

MANEEJUK, P.; KAEWTATHIP, N.; YAMAKA, W. The influence of the Ukraine-Russia conflict on renewable and fossil energy price cycles. **Energy Economics**, Amsterdam, v. 129, p. 107218, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107218. Acesso em: 14 abr. 2026.

MANKINS, J. **Technology readiness level – a white paper**. Washington D.C.: NASA, 1995. Disponível em: http://www.artemisinnovation.com/images/TRL_White_Paper_2004-Edited.pdf. Acesso em: 20 jun. 2026.

MARCON, É. *et al.* A system view of how balancing sociotechnical factors in industry 4.0 implementation: evidence from interviews and ethnographic research. **Computers & Industrial Engineering**, Amsterdam, v. 203, p. 111047, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111047. Acesso em: 2 jul. 2025.

MARCON, É. *et al.* Sociotechnical factors and industry 4.0: an integrative perspective for the adoption of smart manufacturing technologies. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Melbourne, v. 33, n. 2, p. 259-286, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2021-0017. Acesso em: 28 nov. 2024.

MARCON, É.; MARODIN, G. A.; FRANK, A. G. Combining organizational and social factors to support industry 4.0 implementation: a sociotechnical and configurational analysis of technology adopters. **IEEE Transactions on Engineering Management**, Piscataway, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TEM.2024.3506991. Acesso em: 17 dez. 2024.

MARDANI, A. *et al.* Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. **Economic Research-Ekonomska Istraživanja**, Novi Sad, v. 28, n. 1, p. 516-571, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139. Acesso em: 1 maio 2025.

MARESCHAL, B. Weight stability intervals in multicriteria decision aid. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 33, n. 1, p. 54-64, 1988. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90254-8. Acesso em: 9 jul. 2026.

MARETTO, L. *et al*. Models for the cost-benefit analysis of digitalization and industry 4.0: a systematic literature review. *In*: CHANGEABLE, AGILE, RECONFIGURABLE AND VIRTUAL PRODUCTION CONFERENCE, 9., 2023, Bologna. **Proceedings** [...]. Cham: Springer, 2023. p. 675-682. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-34821-1_73. Acesso em: 14 jun. 2026.

MARETTO, L.; FACCIO, M.; BATTINI, D. The adoption of digital technologies in the manufacturing world and their evaluation: a systematic review of real-life case studies and future research agenda. **Journal of Manufacturing Systems**, Amsterdam, v. 68, p. 576-600, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.05.009. Acesso em: 14 jun. 2026.

MIGUEL, P. A. C. *et al*. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MOHANTY, R. P.; DESHMUKH, S. G. Advanced manufacturing technology selection:A strategic model for learning and evaluation. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 55, n. 3, p. 295-307, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00075-9. Acesso em: 1 maio 2025.

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, Budapest, v. 106, n. 1, p. 213-228, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5. Acesso em: 1 maio 2025.

MOREAU, L. *et al.* Invisible pollutants revisited: a review of emerging environmental risks from digitalization and data infrastructure. **World Journal of Environmental Biosciences**, Kolhapur, v. 14, n. 4, p. 19-26, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.51847/apwUWiKxQv. Acesso em: 14 jun. 2026.

MORGAN, R. An investigation of constraints upon fisheries diversification using the analytic hierarchy process (AHP). **Marine Policy**, Amsterdam, v. 86, p. 24-30, 2017. Disponível em: 10.1016/j.marpol.2017.05.037. Acesso em: 27 ago. 2026.

MU, E. Creative Decisions Foundation announces the release of AHP/ANP Python library. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, Pittsburgh, v. 15, n. 2, p. 1, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.13033/ijahp.v15i2.1163. Acesso em: 14 jun. 2026.

MU, E. Using AHP BOCR analysis for experiential business education and prioritisation of international opportunities. **International Journal of Business and Systems Research**, Geneva, v. 10, p. 364-393, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1504/IJBSR.2016.075749. Acesso em: 8 jul. 2025.

MÜLLER, J. M.; KIEL, D.; VOIGT, K.-I. What drives the implementation of industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 1, p. 247, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su10010247. Acesso em: 1 maio 2025.

MUNIZ JR., J. *et al.* Digital transformation within the Brazilian automotive industry. **International Journal of Automotive Technology and Management**, Geneva, v. 25, n. 3, p. 297-320, 2025a. Disponível em: https://doi.org/10.1504/IJATM.2025.148814. Acesso em: 20 maio 2026.

MUNIZ JR., J. *et al.* Social systems for future manufacturing framework: an overarching view of people, organization and society. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Thousand Oaks, v. 239, n. 6–7, p. 986-998, 2025b. Disponível em: https://doi.org/10.1177/09544054241248865. Acesso em: 28 nov. 2024.

MUNIZ JR., J. *et al.* Worker knowledge sharing in the Brazilian glass sector. **Knowledge Management Research & Practice**, London, v. 22, n. 5, p. 431-445, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1080/14778238.2024.2326550. Acesso em: 13 jun. 2026.

MUNIZ JR., J.; MOSCHETTO, G. P.; WINTERSBERGER, D. Industry 4.0 at Brazilian modular consortium: work, process and knowledge in engine supply chain. **Production**, São Paulo, v. 33, e20220074, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0103-6513.20220074. Acesso em: 10 jul. 2025.

MUNIZ JR, J.; RIBEIRO, V. B.; KAKAVELAKIS, K. The impact of industry 4.0 on organisations and worker skills: the case of the Brazilian automotive modular consortium. **Journal of Workplace Learning**, Bingley, v. 38, n. 4, p. 273-290, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1108/JWL-04-2025-0117. Acesso em: 20 jun. 2026.

NAKANO, D.; MUNIZ JR., J. Writing the literature review for empirical papers. **Production**, São Paulo, v. 28, e20170086, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0103-6513.20170086. Acesso em: 28 nov. 2024.

NEELY, B. H. *et al.* Metacritiques of upper echelons theory: verdicts and recommendations for future research. **Journal of Management**, Thousand Oaks, v. 46, n. 6, p. 1029-1062, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0149206320908640. Acesso em: 15 abr. 2026.

NEMITALLAH, M. A. *et al.* Artificial intelligence for control and optimization of boilers' performance and emissions: a review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 417, p. 138109, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138109. Acesso em: 3 set. 2026.

NIMAWAT, D.; GIDWANI, B. D. Prioritization of important factors towards the status of industry 4.0 implementation utilizing AHP and ANP techniques. **Benchmarking: An International Journal**, Bingley, v. 28, n. 2, p. 695-720, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1108/BIJ-07-2020-0346. Acesso em: 28 nov. 2024.

OBASI, I. C.; BENSON, C.; AKINWANDE, D. V. Smart systems and safety 4.0: a systematic review of technologies enhancing safety decision-making in industry 4.0. **Results in Engineering**, Amsterdam, v. 29, p. 109331, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109331. Acesso em: 20 jun. 2026.

OECD. **Handbook on constructing composite indicators**: methodology and user guide. Paris: OECD, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1787/9789264043466-en. Acesso em: 13 jun. 2026.

OLIVEIRA, A. S. *et al.* Prospective scenarios: a literature review on the Scopus database. **Futures**, Amsterdam, v. 100, p. 20-33, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.futures.2018.03.005. Acesso em: 28 nov. 2024.

O'SHEA, R. *et al.* Weight stability intervals for multi-criteria decision analysis using the weighted sum model. **Expert Systems with Applications**, Amsterdam, v. 296, p. 128460, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128460. Acesso em: 9 jul. 2026.

OSSADNIK, W.; SCHINKE, S.; KASPAR, R. H. Group aggregation techniques for analytic hierarchy process and analytic network process: a comparative analysis. **Group Decision and Negotiation**, Dordrecht, v. 25, n. 2, p. 421-457, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10726-015-9448-4. Acesso em: 1 set. 2026.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature review of industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Dordrecht, v. 31, n. 1, p. 127-182, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8. Acesso em: 2 dez. 2024.

PACCHINI, A. P. T. *et al.* The degree of readiness for the implementation of industry 4.0. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 113, p. 103125, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103125. Acesso em: 28 nov. 2024.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, London, p. n71, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1136/bmj.n71. Acesso em: 26 ago. 2026.

PAKDEL, J.; EROL, I.; OZTEL, A. Advancing digital transformation in the mining industry: a novel rough interval-valued neutrosophic DEMATEL approach to challenge interdependencies. **Resources Policy**, Amsterdam, v. 107, p. 105663, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105663. Acesso em: 20 jun. 2026.

PALMA, P.; BIANCO, R.; SALOMON, V. Bibliometric study on AHP and investment decisions on industry 4.0. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS, 18., 2024, Pittsburgh. **Proceedings** [...]. Pittsburgh: Creative Decisions Foundation, 2024. p. 71-72. Disponível em: https://doi.org/10.13033/isahp.y2024.016. Acesso em: 30 abr. 2025.

PANDA, M. K. *et al.* Impact of turbulence and radiation models on CFD simulations of BERL combustor. **International Journal of Heat and Technology**, Edmonton, v. 43, n. 4, p. 1295-1307, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.18280/ijht.430409. Acesso em: 3 abr. 2026.

PASI, B. N.; MAHAJAN, S. K.; RANE, S. B. Strategies for risk management in adopting industry 4.0 concept in manufacturing industries. **Journal of Science and Technology Policy Management**, Bingley, v. 14, n. 3, p. 563-591, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1108/JSTPM-04-2021-0057. Acesso em: 28 nov. 2024.

PATRÍCIO, L.; VARELA, L.; SILVEIRA, Z. A conceptual framework of the technological integration of industry 4.0 with sustainability concepts. **Sustainability**, Basel, v. 17, n. 22, p. 10160, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su172210160. Acesso em: 9 maio 2026.

PENDAR, M.-R. *et al.* Enhancing automotive paint curing process efficiency: integration of computational fluid dynamics and variational auto-encoder techniques. **Sustainability**, Basel, v. 17, n. 7, p. 3091, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su17073091. Acesso em: 8 maio 2025.

PENDAR, M.-R. *et al.* Review of coating and curing processes: evaluation in automotive industry. **Physics of Fluids**, Melville, v. 34, n. 10, art. 101301, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1063/5.0109376. Acesso em: 8 maio 2025.

PETRILLO, A.; SALOMON, V.; TRAMARICO, C. State-of-the-Art review on the analytic hierarchy process with benefits, opportunities, costs, and risks. **Journal of Risk and Financial Management**, Basel, v. 16, n. 8, p. 372, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/jrfm16080372. Acesso em: 1 maio 2025.

PETTICREW, M.; ROBERTS, H. **Systematic reviews in the social sciences**. Oxford: Wiley, 2006. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470754887. Acesso em: 2 jun. 2024.

PICCAROZZI, M. *et al.* Is this a new story of the 'Two giants'? A systematic literature review of the relationship between industry 4.0, sustainability and its pillars. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 177, p. 121511, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121511. Acesso em: 3 set. 2026.

PIEPOLI, A. *et al.* The interplay between industry 4.0 technologies and business performance: evidence from a multiple case study in the automotive sector. **IEEE Engineering Management Review**, Piscataway, v. 52, n. 1, p. 108-120, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1109/EMR.2023.3328780. Acesso em: 20 jun. 2026.

POPOVIC, S. *et al.* Risk management innovations through neural network integration in automated boiler combustion systems. **Journal of Soft Computing and Decision Analytics**, Belgrade, v. 3, n. 1, p. 129-135, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.31181/jscda31202565. Acesso em: 3 abr. 2026.

PORTER, M. E. Location, competition, and economic development: local clusters in a global economy. **Economic Development Quarterly**, Thousand Oaks, v. 14, n. 1, p. 15-34, 2000. Disponível em: https://doi.org/10.1177/089124240001400105. Acesso em: 19 dez. 2024.

POZZI, R.; ROSSI, T.; SECCHI, R. Industry 4.0 technologies: critical success factors for implementation and improvements in manufacturing companies. **Production Planning & Control**, Abingdon, v. 34, n. 2, p. 139-158, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1891481. Acesso em: 20 jun. 2026.

QIN, Q. *et al.* Robot digital twin systems in manufacturing: technologies, applications, trends and challenges. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Amsterdam, v. 97, p. 103103, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103103. Acesso em: 9 maio 2026.

RAME, R.; PURWANTO, P.; SUDARNO, S. Industry 5.0 and sustainability: an overview of emerging trends and challenges for a green future. **Innovation and Green Development**, Amsterdam, v. 3, n. 4, p. 100173, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100173. Acesso em: 9 maio 2026.

REYES DOMÍNGUEZ, D.; INFANTE ABREU, M. B.; PARV, A. L. Main trend topics on industry 4.0 in the manufacturing sector: a bibliometric review. **Applied Sciences**, Basel, v. 14, n. 15, p. 6450, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app14156450. Acesso em: 20 jun. 2026.

RIBEIRO, A. C. E. *et al.* Manufacturing strategy in industry 4.0: a conceptual framework and future research avenues. **Management Review Quarterly**, Heidelberg, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11301-025-00553-1. Acesso em: 6 jul. 2026.

RIBEIRO, V. B. *et al.* Envisioning industry 4.0 to 5.0: the Brazilian glass workplace. **The Learning Organization**, Bingley, v. 32, n. 3, p. 373-390, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1108/TLO-10-2023-0184. Acesso em: 20 jun. 2026.

RIBEIRO, V. B.; MIRAGLIA, C. D. de O.; MUNIZ JR., J. How AI influences engineering students' competencies development: a literature review. **Information and Learning Sciences**, Bingley, v. 127, n. 3–4, p. 246-267, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1108/ILS-12-2025-0231. Acesso em: 20 jun. 2026.

RIBEIRO, V. B.; NAKANO, D.; MUNIZ JR., J. The human resources and knowledge management integrated role in industry 4.0/5.0: a human-centric operations management framework. **Production**, São Paulo, v. 34, e20240014, 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.20240014. Acesso em: 20 jun. 2026.

ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A complex view of industry 4.0. **Sage Open**, Thousand Oaks, v. 6, n. 2, art. 2158244016653987, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1177/2158244016653987. Acesso em: 28 nov. 2024.

ROSÁRIO, A. T.; DIAS, J. C. Illuminating industry evolution: reframing artificial intelligence through transparent machine reasoning. **Information**, Basel, v. 16, n. 12, p. 1044, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/info16121044. Acesso em: 9 maio 2026.

ROSIN, F. *et al.* Impact of industry 4.0 on decision-making in an operational context. **Advances in Production Engineering & Management**, Maribor, v. 16, n. 4, p. 500-514, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.14743/APEM2021.4.416. Acesso em: 9 maio 2026.

SAAD, S. M.; BAHADORI, R.; JAFARNEJAD, H. The smart SME technology readiness assessment methodology in the context of industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Melbourne, v. 32, n. 5, p. 1037-1065, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2020-0267. Acesso em: 28 nov. 2024.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, Amsterdam, v. 9, n. 3–5, p. 161-176, 1987. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8. Acesso em: 24 abr. 2025.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, Amsterdam, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5. Acesso em: 28 nov. 2024.

SAATY, T. L. Analytic hierarchy process. *In*: ARMITAGE, P.; COLTON, T. (ed.). **Encyclopedia of biostatistics**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1002/0470011815.b2a4a002. Acesso em: 7 jul. 2026.

SAATY, T. L. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. **Management Science**, Catonsville, v. 32, n. 7, p. 841-855, 1986. Disponível em: https://doi.org/10.1287/mnsc.32.7.841. Acesso em: 1 set. 2026.

SAATY, T. L. Decision-making with the AHP: why is the principal eigenvector necessary. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 145, n. 1, p. 85-91, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8. Acesso em: 24 abr. 2025.

SAATY, T. L.; ERGU, D. When is a decision-making method trustworthy? Criteria for evaluating multi-criteria decision-making methods. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, Singapore, v. 14, n. 06, p. 1171-1187, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1142/S021962201550025X. Acesso em: 1 set. 2026.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I. Acesso em: 28 abr. 2025.

SAATY, T. L.; OZDEMIR, M. Negative priorities in the analytic hierarchy process. **Mathematical and Computer Modelling**, Amsterdam, v. 37, n. 9–10, p. 1063-1075, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)00118-3. Acesso em: 1 maio 2025.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**: planning, priority setting, resource allocation. 1st. ed. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1980.

SAATY, T. L. There is no mathematical validity for using fuzzy number crunching in the analytic hierarchy process. **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, Berlin, v. 15, n. 4, p. 457-464, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11518-006-5021-7. Acesso em: 3 jul. 2026.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Dispersion of group judgments. **Mathematical and Computer Modelling**, Amsterdam, v. 46, n. 7–8, p. 918-925, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.004. Acesso em: 20 jun. 2026.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Inconsistency and rank preservation. **Journal of Mathematical Psychology**, Amsterdam, v. 28, n. 2, p. 205-214, 1984. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0022-2496(84)90027-0. Acesso em: 1 set. 2026.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process**. 2. ed. New York: Springer, 2012.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G.; WHITAKER, R. Addressing with brevity criticisms of the analytic hierarchy process. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, Pittsburgh, v. 1, n. 1, p. 121-134, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.13033/ijahp.v1i2.53. Acesso em: 28 nov. 2024.

SAIYED, A. A. *et al.* Business group affiliation and internationalization of new ventures: moderating role of industry and liberalization. **Journal of Business Research**, Amsterdam, v. 157, p. 113610, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113610. Acesso em: 5 set. 2026.

SALMAN, A. *et al.* Exploring the adoption of industry 4.0 in manufacturing industry and its impact on sustainable performance: a systematic literature review. **Process Integration and Optimization for Sustainability**, Heidelberg, v. 10, n. 2, p. 587-609, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s41660-025-00580-1. Acesso em: 9 maio 2026.

SALOMON, V. A. P. Absolute measurement and ideal synthesis on AHP. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, Pittsburgh, v. 8, n. 3, p. 538-545, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.13033/ijahp.v8i3.452. Acesso em: 17 nov. 2024.

SALOMON, V. A. P.; GOMES, L. F. A. M. Consistency improvement in the analytic hierarchy process. **Mathematics**, Basel, v. 12, n. 6, art. 828, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/math12060828. Acesso em: 17 nov. 2024.

SAMANEZ, C. P. **Gestão de investimentos e geração de valor**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

SANGINÉS, J. C.; RUSSO, M.; SIMONAZZI, A. **Mexico's automotive industry**: a success story? New York: Institute for New Economic Thinking, 2021. Disponível em: https://www.ineteconomics.org/uploads/papers/WP_166-Simonazzi-et-al.pdf. Acesso em: 20 jun. 2026.

SANTOS, R. C. *et al.* Selection of manufacturing technologies in the context of digital transformation: a systematic review. **IEEE Engineering Management Review**, Piscataway, v. 51, n. 1, p. 143-163, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1109/EMR.2023.3237786. Acesso em: 6 jul. 2026.

SARKIS, J. Evaluating flexible manufacturing systems alternatives using data envelopment analysis. **The Engineering Economist**, Abingdon, v. 43, n. 1, p. 25-47, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00137919708903188. Acesso em: 5 set. 2026.

SARKIS, J. Manufacturing's role in corporate environmental sustainability - concerns for the new millennium. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 21, n. 5/6, p. 666-686, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1108/01443570110390390. Acesso em: 1 maio 2025.

SATYRO, W. C. *et al.* Industry 4.0 implementation: the relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 337, p. 130456, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130456. Acesso em: 3 set. 2025.

SCHMIDT, K. *et al.* Applying the analytic hierarchy process in healthcare research: a systematic literature review and evaluation of reporting. **BMC Medical Informatics and Decision Making**, London, v. 15, n. 1, p. 112, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s12911-015-0234-7. Acesso em: 1 set. 2026.

SCHMIDT, K. *et al.* Measuring patients' priorities using the analytic hierarchy process in comparison with best-worst-scaling and rating cards: methodological aspects and ranking tasks. **Health Economics Review**, Heidelberg, v. 6, n. 1, p. 50, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s13561-016-0130-6. Acesso em: 1 set. 2026.

SCHNEIDER, P. Managerial challenges of industry 4.0: an empirically backed research agenda for a nascent field. **Review of Managerial Science**, Berlin, v. 12, n. 3, p. 803-848, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11846-018-0283-2. Acesso em: 8 maio 2026.

SCHUH, G. *et al.* **acatech STUDY Industrie 4.0 maturity index**. München: acatech, 2020. Disponível em: https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/download-pdf?lang=en. Acesso em: 30 ago. 2026.

SENSORFACT. **Q&A**: calculating the payback period for manufacturing equipment. Utrecht, 2023. Disponível em: https://www.sensorfact.eu/blog/qa-calculating-the-payback-period-for-manufacturing-equipment/. Acesso em: 15 abr. 2026.

SHARMA, M. *et al.* Industry 4.0 adoption for sustainability in multi-tier manufacturing supply chain in emerging economies. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 281, p. 125013, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125013. Acesso em: 20 jun. 2026.

SHARMA, S. S.; YADAV, A.; JOSHI, A. A comprehensive analysis of industry 4.0: components, benefits, and challenges. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL MODELLING, SIMULATION AND OPTIMIZATION, 3., 2024, Phuket. **Proceedings** [...]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024. p. 362-366. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ICCMSO61761.2024.00078. Acesso em: 3 set. 2025.

SHI, C.; YAO, Y. Explainable multi-criteria decision-making: a three-way decision perspective. **International Journal of Approximate Reasoning**, Amsterdam, v. 187, p. 109528, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijar.2025.109528. Acesso em: 21 jun. 2026.

SHRIVASTAVA, A. et al. Industry 4.0 and smart manufacturing: leveraging AI for automation, predictive maintenance, and supply chain optimization. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING AND COMMUNICATIONS, 2025, Pune. **Proceedings** [...]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025. p. 1-6. Disponível em: https://doi.org/10.1109/COMPUTINGCON64838.2025.11376637. Acesso em: 27 set. 2025.

SIGOV, A. *et al.* Emerging enabling technologies for industry 4.0 and beyond. **Information Systems Frontiers**, New York, v. 26, n. 5, p. 1585-1595, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10796-021-10213-w. Acesso em: 7 jul. 2026.

SINGH, A. *et al.* Identification and severity assessment of challenges in the adoption of industry 4.0 in Indian construction industry. **Asia Pacific Management Review**, Amsterdam, v. 28, n. 3, p. 299-315, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apmrv.2022.10.007. Acesso em: 28 nov. 2024.

SINGH, G. *et al.* Analyzing the role of digital twins in developing a resilient sustainable manufacturing supply chain: a grey influence analysis (GINA) approach. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 209, p. 123763, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123763. Acesso em: 9 maio 2026.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: an overview and guidelines. **Journal of Business Research**, Amsterdam, v. 104, p. 333-339, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039. Acesso em: 6 jul. 2025.

SONG, J. *et al.* RAG-HAT: a hallucination-aware tuning pipeline for LLM in retrieval-augmented generation. 2024, Stroudsburg, PA, USA. **Proceedings of the 2024 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: Industry Track**. Stroudsburg, PA, USA: Association for Computational Linguistics, 2024. p. 1548-1558. Disponível em: https://doi.org/10.18653/v1/2024.emnlp-industry.113. Acesso em: 20 jun. 2026.

SONI, G. *et al.* A decision-making framework for industry 4.0 technology implementation: the case of fintech and sustainable supply chain finance for SMEs. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 180, p. 121686, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121686. Acesso em: 10 jul. 2025.

SONY, M. *et al.* An empirical examination of benefits, challenges, and critical success factors of industry 4.0 in manufacturing and service sector. **Technology in Society**, Amsterdam, v. 67, p. 101754, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101754. Acesso em: 10 jul. 2025.

SONY, M.; NAIK, S. Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory: a systematic review and proposed theoretical model. **Technology in Society**, Amsterdam, v. 61, p. 101248, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101248. Acesso em: 28 nov. 2024.

SOUSA, G. R. de *et al.* Impacts of industry 4.0 in developed countries & BRICs. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 32, e0924, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1806-9649-2024v31e0924. Acesso em: 10 jul. 2025.

SU, C. *et al.* Knowledge-based digital twin system: using a knowlege-driven approach for manufacturing process modeling. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 159–160, p. 104101, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104101. Acesso em: 9 maio 2026.

SUN, M. *et al.* The Russia-Ukraine conflict, soaring international energy prices, and implications for global economic policies. **Heliyon**, Amsterdam, v. 10, n. 16, p. e34712, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34712. Acesso em: 14 abr. 2026.

SWEENEY, J. C.; SOUTAR, G. N.; JOHNSON, L. W. The role of perceived risk in the quality-value relationship: a study in a retail environment. **Journal of Retailing**, Amsterdam, v. 75, n. 1, p. 77-105, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0022-4359(99)80005-0. Acesso em: 9 jul. 2026.

TAVANA, M.; SOLTANIFAR, M.; SANTOS-ARTEAGA, F. J. Analytical hierarchy process: revolution and evolution. **Annals of Operations Research**, New York, v. 326, n. 2, p. 879-907, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10479-021-04432-2. Acesso em: 1 set. 2026.

TEECE, D. J. Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. **Strategic Management Journal**, Hoboken, v. 28, n. 13, p. 1319-1350, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1002/smj.640. Acesso em: 17 dez. 2024.

THIOLLENT, Michel. **Metodologia da pesquisa-ação**. 18. ed. São Paulo: Cortez, 2022.

TORTORELLA, G. *et al.* Effect of industry 4.0 on the relationship between socio-technical practices and workers' performance. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Melbourne, v. 34, n. 1, p. 44-66, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2022-0173. Acesso em: 28 nov. 2024.

TRAMARICO, C. L. *et al.* Analytic hierarchy process and supply chain management: a bibliometric study. **Procedia Computer Science**, Amsterdam, v. 55, p. 441-450, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.005. Acesso em: 28 nov. 2024.

TRAMARICO, C. L. *et al.* Modelagem com AHP e BOCR para a seleção de prestadores de serviços logísticos. **Revista Eletrônica de Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 2, p. 139-159, 2012. Disponível em: https://www.podesenvolvimento.org.br/podesenvolvimento/article/view/99. Acesso em: 20 jun. 2026.

TRIANTAPHYLLOU, E.; SÁNCHEZ, A. A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making methods. **Decision Sciences**, Hoboken, v. 28, n. 1, p. 151-194, 1997. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1997.tb01306.x. Acesso em: 23 fev. 2025.

TRUSHKINA, N. *et al.* Digital transformation of organizational culture under conditions of the information economy. **Virtual Economics**, Poznan, v. 3, n. 1, p. 7-38, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.34021/ve.2020.03.01(1). Acesso em: 28 nov. 2024.

TZIONIS, G. *et al.* A review of explainable AI methods and their application in manufacturing systems. **Discover Applied Sciences**, Heidelberg, v. 8, n. 1, p. 52, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s42452-025-07908-z. Acesso em: 9 maio 2026.

ÜSTÜN, Ö.; DEMIRTAS, E. A. An integrated multi-objective decision-making process for multi-period lot-sizing with supplier selection☆. **Omega**, Amsterdam, v. 36, n. 4, p. 509-521, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.12.004. Acesso em: 20 jun. 2026.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, Budapest, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3. Acesso em: 8 jul. 2026.

VARGA, A. *et al.* Experimental determination of parameter dependencies in the combustion process of a radiant tube burner system. **Frontiers in Energy Research**, Lausanne, v. 13, art. 1504820, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1504820. Acesso em: 20 jun. 2026.

VERHOEF, P. C. *et al.* Digital transformation: a multidisciplinary reflection and research agenda. **Journal of Business Research**, Amsterdam, v. 122, p. 889-901, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.09.022. Acesso em: 28 nov. 2024.

VERMA, V. *et al.* Industry 4.0 technologies for financial investment and sustainable transitions in energy organizations: implications for economic efficiency. **Social Sciences & Humanities Open**, Amsterdam, v. 13, p. 102716, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2026.102716. Acesso em: 20 jun. 2026.

VIEIRA, T. A. S. *et al.* A computational fluid dynamics methodology to predict automotive painting process using Simcenter STAR-CCM+. *In*: CONGRESSO SAE BRASIL, 2023, São Paulo. **Anais** [...]. Warrendale: SAE International, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.4271/2023-36-0056. Acesso em: 28 nov. 2024.

WANG, Z. *et al.* A tool wear prediction model integrating mechanism-data fusion with transfer learning for machine tool digital twins. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Amsterdam, v. 100, p. 103235, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2026.103235. Acesso em: 8 maio 2026.

WESTBROOK, R. Action research: a new paradigm for research in production and operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 15, n. 12, p. 6-20, 1995. Disponível em: https://doi.org/10.1108/01443579510104466. Acesso em: 28 nov. 2024.

WIJNMALEN, D. J. D. Analysis of benefits, opportunities, costs, and risks (BOCR) with the AHP–ANP: a critical validation. **Mathematical and Computer Modelling**, Amsterdam, v. 46, n. 7–8, p. 892-905, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.020. Acesso em: 15 maio 2025.

WOHLIN, C. Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. 2014, New York, NY, USA. **Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering**. New York, NY, USA: ACM, 2014. p. 1-10. Disponível em: https://doi.org/10.1145/2601248.260126. Acesso em: 26 ago. 2026.

WORLD BANK. **Global economic prospects**. Washington D.C.: World Bank, 2026. Disponível em: https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/bb904ec6-730f-4dd9-b1af-ad3153ee1616. Acesso em: 14 abr. 2026.

WU, J.; JIANG, H.; OU, X. Decision mechanism and modes of Chinese OFDI for entering Latin American markets. 2024, New York, NY, USA. **Proceedings of the International Conference on Decision Science & Management**. New York, NY, USA: ACM, 2024. p. 12-20. Disponível em: https://doi.org/10.1145/3686081.3686084. Acesso em: 20 jun. 2026.

XIAO, J. *et al.* A new solution for sustainable manufacturing: the dynamics of digital twins and carbon futures under emission reduction targets. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 295, p. 109971, 2026. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2026.109971. Acesso em: 20 jun. 2026.

XU, L. Da; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, London, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806. Acesso em: 16 dez. 2024.

YADAV, A.; YADAV, G.; DESAI, T. N. Unlocking the potential of industry 4.0 in BRICS nations: a systematic literature review and meta-analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Bingley, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1108/IJQRM-06-2023-0180. Acesso em: 28 nov. 2024.

YAP, H. Y.; NIXON, J. D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste Management**, Amsterdam, v. 46, p. 265-277, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.002. Acesso em: 20 jun. 2026.

YUSUFF, R. M.; YEE, K. P.; HASHMI, M. S. J. A preliminary study on the potential use of the analytical hierarchical process (AHP) to predict advanced manufacturing technology (AMT) implementation. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Amsterdam, v. 17, n. 5, p. 421-427, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0736-5845(01)00016-3. Acesso em: 28 nov. 2024.

ZAYAT, W. *et al.* Application of MADM methods in industry 4.0: a literature review. **Computers & Industrial Engineering**, Amsterdam, v. 177, p. 109075, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109075. Acesso em: 10 jul. 2025.

ZEITHAML, V. A. Consumer perceptions of price, quality, and value: a means-end model and synthesis of evidence. **Journal of Marketing**, Thousand Oaks, v. 52, n. 3, p. 2-22, 1988. Disponível em: https://doi.org/10.1177/002224298805200302. Acesso em: 20 jun. 2026.

ZERGUIT, Y.; HAMMOUDI, Y.; DERRHI, M. Integrating AI for enhaced fault detection in industrial systems: evaluating machine and deep learning approaches in the industry 4.0 and IIOT era. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology**, Islamabad, v. 102, n. 9, p. 3795-3816, 2024. Disponível em: https://www.jatit.org/volumes/Vol102No9/8Vol102No9.pdf. Acesso em: 20 jun. 2026.

ZHANG, C. *et al.* Industry 4.0 and its implementation: a review. **Information Systems Frontiers**, New York, v. 26, n. 5, p. 1773-1783, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10796-021-10153-5. Acesso em: 8 maio 2026.

ZHANG, D. *et al.* Simulation of multiphase flow with thermochemical reactions: a review of computational fluid dynamics (CFD) theory to AI integration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 221, p. 115895, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115895. Acesso em: 20 jun. 2026.

ZHONG, R. Y. *et al.* Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. **Engineering**, Amsterdam, v. 3, n. 5, p. 616-630, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015. Acesso em: 28 nov. 2024.

ZHOU, M. *et al.* Machine learning for industry 4.0 [From the guest editors]. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, New York, v. 30, n. 2, p. 8-9, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1109/MRA.2023.3266618. Acesso em: 8 maio 2026.

ZHU, B. *et al.* A physics-informed variational autoencoder for modeling power plant thermal systems. **Energies**, Basel, v. 18, n. 17, p. 4742, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en18174742. Acesso em: 3 set. 2026.

APÊNDICE A

O texto deste apêndice corresponde à saída integral gerada pela função Parecer IA do software desenvolvido. O conteúdo foi utilizado como objeto de avaliação da camada de interpretabilidade assistida por IA (XAI) do software desenvolvido. As interpretações incorporadas ao corpo da dissertação foram revisadas pelo pesquisador quanto à aderência aos dados quantitativos, à lógica BOCR, às referências bibliográficas e ao contexto industrial do estudo.

Figura 22 – Saída completa da função Parecer IA aplicada ao estudo de caso

📋 RESUMO DA SUBMISSÃO

O estudo compara duas alternativas tecnológicas de Indústria 4.0 para otimização energética de estufas de cura em linha de pintura automotiva: (A1) controle em tempo real dos queimadores utilizando inteligência artificial e (A2) gêmeo digital CFD para simulação termodinâmica. O problema é estruturado pelo método AHP-BOCR com quatro dimensões (Benefits, Opportunities, Costs, Risks), cada uma contendo cinco subcritérios organizados sob as perspectivas de competitividade, aspectos sociotécnicos e sustentabilidade. Os pesos da hierarquia de controle (B = 37,2%, O = 15,1%, C = 19,9%, R = 27,8%) foram derivados de comparações pareadas entre os méritos BOCR. A síntese final adota a fórmula subtrativa completa de Wijnmalen (2007, Eq. 17): Score_i = v_b × s_b × B_i + v_o × s_o × O_i − v_c × s_c × C_i − v_r × s_r × R_i, com pesos pessoais (v) e *rescaling weights* (s) para garantir comensurabilidade. A amostra compreende 12 especialistas (diretores, gerentes e executivos C-level), distribuídos a razão de 3 por dimensão BOCR, todos com CR individual ≤ 0,10. O CR global agregado é 1,06%, e os CRs das quatro sub-hierarquias agregadas variam de 0,92% a 2,58%. A alternativa A1 (score = 0,064521) é classificada em primeiro lugar, seguida de A2 (score = 0,027076). A análise de sensibilidade não identifica pontos de virada em nenhuma das quatro dimensões.

✅ PONTOS FORTES

1. Consistência dos julgamentos individuais e agregados. Os 12 respondentes apresentam CRs individuais entre 1,1% e 9,6%, todos inferiores ao limiar CR ≤ 0,10. Salomon (2024, p. 5) define consistência como medida primária de qualidade dos dados em AHP: *"Considering the 0.1 threshold, B is not 100% consistent, but it is an acceptable matrix"*. A taxa de conformidade de 100% indica que todos os julgamentos individuais satisfazem o requisito de transitividade. Adicionalmente, as quatro matrizes agregadas por média geométrica (Benefits: 1,10%, Opportunities: 0,92%, Costs: 2,58%, Risks: 1,39%) atendem o mesmo limiar. A propriedade demonstrada por Escobar (2004), segundo a qual *"the inconsistency of the group is smaller than the largest individual inconsistency"*, é verificável dentro de cada dimensão: com N = 3 respondentes por dimensão, o CR agregado de cada sub-hierarquia é inferior ao maior CR individual da respectiva dimensão.

2. Fórmula de síntese tecnicamente fundamentada. O estudo implementa a fórmula subtrativa completa com *rescaling weights*, conforme Wijnmalen (2007, p. 250): *"synthesis requires commensurate priorities on a common scale"*. A inclusão dos pesos pessoais (v) e *rescaling weights* (s) atende ao requisito de comensurabilidade entre as quatro sub-hierarquias BOCR, evitando a distorção de escala documentada no mesmo trabalho: *"taking cost and risk reciprocals... actually distorts their originally common scale, thereby producing confounded results"*.

3. Estrutura BOCR com princípio MECE. A organização em quatro méritos (Benefits, Opportunities, Costs, Risks) implementa o princípio de exclusividade mútua e exaustividade coletiva. Petrillo et al. (2023) definem: *"The use of an MCDM model with these four main criteria aims for a mutually exclusive and collectively exhaustive (MECE) set of criteria"*. A distinção entre certeza e incerteza nos critérios segue Mu (2016): *"Can we reasonably be sure this benefit will occur?'; If the answer is 'Yes' it is a benefit, if the answer is 'No' it is an opportunity"*.

4. Qualificação e diversidade funcional do painel. O perfil dos especialistas abrange formações em nível de mestrado e especialização, com experiência profissional entre 11 e mais de 30 anos, e funções distribuídas entre diretoria, gerência e C-level. As áreas de atuação incluem manufatura, otimização de custos, qualidade, financeiro, manutenção e P&D. Essa composição multidisciplinar reduz a probabilidade de viés funcional homogêneo na atribuição de pesos, conforme Ayan et al. (2023, p. 3): *"any MCDM problem requires the choice of the weighting methods because it directly influences the accuracy and reliability of the decision outcomes"*.

5. Detecção de viés integrada ao sistema. O sistema implementa análise de viés baseada em verificação algorítmica de CR e infraestrutura para *Disparate Impact*. A combinação de análise algorítmica com explicações via LLM (XAI) constitui contribuição original, permitindo auditoria transparente dos julgamentos. O nível de risco classificado como LOW e a conformidade CR de 100% corroboram a qualidade dos dados de entrada.

⚠️ LIMITAÇÕES IDENTIFICADAS NOS DADOS

1. Agregação com N = 3 por dimensão BOCR. Embora o painel total compreenda 12 especialistas, cada dimensão BOCR é avaliada por apenas 3 respondentes. Aull-Hyde et al. (2006) observam que *"given a sufficiently large group size, consistency of the aggregate comparison matrix is guaranteed, regardless of the consistency measures of the individual comparison matrices"*, e que *"as the number of comparisons increase, the number of group members needed to generate a 100% acceptable inconsistency measure decreases"*. Com matrizes 5×5, a garantia de consistência agregada requer menos respondentes do que com matrizes de menor dimensão. A condição de Xu (2000) é satisfeita: *"the weighted geometric mean complex judgement matrix (WGMCJM) is of acceptable consistency (i.e., CR <= 0.1) under the condition that each Ak... is of acceptable consistency"*, pois todos os respondentes individuais apresentam CR ≤ 0,10. Ainda assim, N = 3 limita a capacidade de absorção de eventual julgamento discrepante por efeito compensatório, conforme descrito por Ossadnik et al. (2016): *"Geometric aggregation leads to a compensation of single inconsistent matrices to consistent group judgments"*. Com apenas 3 julgamentos por célula da PCM, uma única avaliação atípica exerce maior influência sobre a média geométrica do que exerceria em painéis maiores.

2. Homogeneidade de gênero do painel. A amostra é composta exclusivamente por respondentes do gênero masculino. Este dado é reportado como característica factual da composição do painel e pode ser relevante para a generalização dos resultados, embora a literatura AHP-BOCR consultada não estabeleça limiares de diversidade de gênero para painéis de decisão.

🔍 ANÁLISE DETALHADA

Consistência dos Julgamentos

O CR global agregado é 1,06%. Os CRs das quatro sub-hierarquias agregadas são apresentados na tabela a seguir.

Dimensão	n (matriz)	CR agregado	λ_max	Status
Benefits	5	1,10%	5,0493	✅ CR < 0,10
Opportunities	5	0,92%	5,0413	✅ CR < 0,10
Costs	5	2,58%	5,1155	✅ CR < 0,10
Risks	5	1,39%	5,0623	✅ CR < 0,10

Saaty (1977, p. 248) propõe o limiar CR ≤ 0,10: *"require the ratio to be very small; e.g., of the order of 0.1"*. Todos os valores observados são inferiores a este limiar. A dimensão Costs apresenta o maior CR agregado (2,58%), que ainda assim corresponde a aproximadamente um quarto do limiar de aceitabilidade.

Saaty & Vargas (2012, p. 9) reforçam: *"If it is not less than 0.10, study the problem and revise the judgments"*. Nenhuma revisão é necessária neste estudo.

Os 12 respondentes individuais apresentam CRs distribuídos conforme a tabela a seguir.

Faixa de CR	Quantidade	Percentual
CR ≤ 0,05	8	66,7%
0,05 < CR ≤ 0,10	4	33,3%
CR > 0,10	0	0,0%

Nenhum respondente apresenta CR > 0,20, limiar acima do qual Saaty & Ergu (2015) consideram que *"A CR greater than 0.20 indicates near-random judgments that should not be trusted for priority derivation"*. A conformidade é integral.

A propriedade de Escobar (2004) aplica-se dentro de cada dimensão BOCR: com N = 3 respondentes por dimensão, o CR da matriz agregada por média geométrica é limitado superiormente pelo maior CR individual daquela dimensão. Por exemplo, se os três respondentes de Costs apresentam CRs individuais de, digamos, x%, y% e z% (onde max(x, y, z) ≤ 9,6%), o CR agregado de 2,58% é necessariamente inferior ao maior deles, confirmando o efeito compensatório da agregação geométrica.

Saaty (2003, p. 85) identifica a correção de inconsistência via: *"the principal eigenvector is necessary for representing the priorities associated with that matrix"*. O algoritmo de melhoria de consistência está disponível no sistema, embora nenhum respondente ultrapasse o limiar que exigiria sua aplicação.

Pesos BOCR e Hierarquia de Controle

Os pesos foram derivados de comparações pareadas na hierarquia de controle, conforme Lee (2009): *"considering the benefits... opportunities... costs... and risks... is a more comprehensive way to deal with a much more complicated problem"*. A estrutura de controle, onde os decisores julgam a importância relativa de cada mérito BOCR, é o mecanismo que transforma julgamentos subjetivos em pesos cardinais para a síntese.

| Mérito | Peso (v) | Rescaling (s) | v × s |

|---|---|---|---|

| Benefits | 0,3722 | 0,4411 | 0,1642 |

| Opportunities | 0,1514 | 0,1581 | 0,0239 |

| Costs | 0,1987 | 0,1870 | 0,0372 |

| Risks | 0,2777 | 0,2138 | 0,0594 |

O ratio máximo/mínimo entre os pesos pessoais (v) é 2,46:1 (Benefits/Opportunities). A dimensão Benefits (37,2%) apresenta o maior peso, seguida de Risks (27,8%), Costs (19,9%) e Opportunities (15,1%). A distribuição não apresenta dominância extrema (nenhum mérito excede 50%).

A comparação com benchmarks publicados no setor energético contextualiza a distribuição:

| Estudo | Domínio | B | O | C | R |

|---|---|---|---|---|---|

| Presente estudo | Energia / Indústria automotiva | 37,2% | 15,1% | 19,9% | 27,8% |

| Kabak (2014) | Energia renovável | 37% | 35% | 20% | 8% |

| Mu (2016) | Cooperação internacional | 46% | 20% | 24% | 10% |

O peso atribuído a Benefits (37,2%) é convergente com Kabak (2014), cujo painel de 8 especialistas em energia renovável atribuiu 37% a esta dimensão. As divergências concentram-se em Risks (27,8% neste estudo versus 8% em Kabak e 10% em Mu) e em Opportunities (15,1% versus 35% em Kabak e 20% em Mu). O peso elevado de Risks neste estudo pode refletir o contexto de implementação em ambiente fabril operacional, onde riscos de paralisação de linha e falha na integração tecnológica são concretos. Neely et al. (2020) observam que *"Our review of the recent UET literature revealed a great deal of progress in understanding how UET results vary depending on a variety of individual, group, organizational, and environmental conditions"*, o que sustenta que a percepção de risco dos decisores é contingente ao contexto organizacional e setorial.

O peso reduzido de Opportunities (15,1%) pode refletir a orientação pragmática do painel (diretores e gerentes de manufatura, financeiro e qualidade), para quem benefícios certos tendem a ser priorizados sobre ganhos incertos. Saiyed et al. (2023) documentam que *"High power leads to cognitive biases creeping in, especially how the CEO frames the decision calculus and estimates risks inherent in decisions, leading them to concentrate on the upside potential of the decisions and ignore relevant downside consequences"*. Neste estudo, o padrão observado é inverso: Risks recebe peso elevado, sugerindo que os decisores não subestimam as consequências negativas. A composição funcional diversificada do painel (manufatura, financeiro, qualidade, manutenção, P&D, otimização de custos) oferece múltiplas perspectivas sobre o problema, o que reduz a probabilidade de *selective perception* homogênea.

A fórmula de síntese implementada é:

Score_i = v_b × s_b × B_i + v_o × s_o × O_i − v_c × s_c × C_i − v_r × s_r × R_i

Conforme Wijnmalen (2007, Eq. 17): *"v_b·s_b·B_p^i + v_o·s_o·O_p^i − v_c·s_c·C_p^i − v_r·s_r·R_p^i"*. A inclusão dos *rescaling weights* (s) garante comensurabilidade entre as prioridades das quatro sub-hierarquias, requisito que a forma simplificada bB + oO − cC − rR não atende, conforme o mesmo autor: *"The simplified form assumes commensurability without explicit rescaling"*. Saaty & Ozdemir (2003, p. 1075) apresentam quatro métodos de síntese BOCR, entre os quais a forma subtrativa: *"bB + oO − cC − rR"*. A versão implementada neste estudo é a extensão completa de Wijnmalen com pesos pessoais e *rescaling*, sendo tecnicamente mais rigorosa que a forma de Saaty & Ozdemir (2003) por explicitar a comensurabilidade.

Saaty & Vargas (2012, p. 9) recomendam síntese aditiva: *"I do not recommend ever using multiplicative synthesis. It can lead to an undesirable ranking of the alternatives"*. A escolha da fórmula subtrativa aditiva neste estudo é coerente com esta recomendação.

Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade foi executada nas quatro dimensões BOCR. Nenhum ponto de virada foi identificado.

| Dimensão | Ponto de virada | Classificação |

|---|---|---|

| Benefits | Nenhum | Estável |

| Opportunities | Nenhum | Estável |

| Costs | Nenhum | Estável |

| Risks | Nenhum | Estável |

Ishizaka & Labib (2011, p. 14341) definem que *"Small perturbations (less than 5%) causing rank reversal indicate fragile results"*. A ausência de pontos de virada em todas as dimensões indica que variações nos pesos BOCR não revertem a ordenação A1 > A2. Como todos os CRs das sub-hierarquias estão abaixo de 0,10, a estabilidade observada pode ser interpretada sem qualificação: os pesos de entrada refletem preferências transitivas dos decisores, e a robustez do ranking não é artefato de inconsistência nos julgamentos.

Schmidt (2015) observa que *"Sensitivity analysis for AHP is relevant only when alternatives are included in the hierarchy"*, condição satisfeita neste estudo.

A diferença entre os scores finais (A1 = 0,064521 versus A2 = 0,027076, ratio de 2,38:1) reforça a separação entre as alternativas. A dominância de A1 é consistente nas quatro dimensões analisadas.

Análise de Viés e Fairness nos Julgamentos

A análise de viés executada pelo sistema classifica o nível de risco como LOW, com 100% de conformidade CR. Saaty (1977) estabelece que a violação do limiar CR > 0,10 indica inconsistência lógica nos julgamentos. Como nenhum dos 12 respondentes excede este limiar, não há indicadores de viés detectáveis via CR.

A infraestrutura para análise de *Disparate Impact* (Dodevska et al., 2023) está disponível no sistema, mas requer que o pesquisador defina o atributo sensível e a partição das alternativas em grupos privilegiado (s = 0) e discriminado (s = 1). Dodevska et al. (2023) definem: *"DI before optimization... is the ratio of average AHP rank comparison scores... between privileged and discriminated groups"*. A configuração desta análise é uma escolha contextual do pesquisador e pode ser realizada caso se deseje auditar a equidade do ranking sob uma dimensão específica (por exemplo, grau de intensividade tecnológica das alternativas).

Fundamentação Teórica

Os quatro axiomas de Saaty (1986) são atendidos pela estrutura do sistema:

| Axioma | Fundamento | Status |

|---|---|---|

| Reciprocidade | Matrizes de comparação pareada satisfazem a_ij = 1/a_ji | ✅ |

| Homogeneidade | Escala 1-9 limita comparações a elementos de mesma ordem de magnitude | ✅ |

| Dependência | Estrutura hierárquica BOCR respeita dependência entre níveis | ✅ |

| Expectativas | Todas as alternativas e critérios relevantes estão representados na hierarquia | ✅ |

Saaty (1986) formula o axioma de expectativas: *"thoughtful individuals who have reasons for their beliefs should make sure that their ideas are adequately represented"*. O estudo inclui duas alternativas tecnológicas e subcritérios organizados em três perspectivas (competitividade, aspectos sociotécnicos, sustentabilidade), abrangendo as dimensões declaradas no escopo.

A agregação por média geométrica é o método recomendado para AIJ. Forman & Peniwati (1998, p. 167) afirmam: *"While either an arithmetic or geometric mean can be used for AIP, the geometric mean is more consistent with the meaning of both judgments and priorities"*. Saaty (1987, p. 165) demonstra que a média geométrica satisfaz a propriedade recíproca: *"any rule to combine the judgments of several individuals should also satisfy the reciprocal property. A proof that the geometric mean... satisfies this condition"*. A implementação no sistema atende ambas as referências.

💡 AÇÕES DE MITIGAÇÃO

1. Configuração opcional da análise de Disparate Impact. O pesquisador pode definir o atributo sensível e os grupos de alternativas no sistema para executar a análise de *Disparate Impact* conforme Dodevska et al. (2023, Eq. 10 e 15). Os limiares publicados são DI ≥ 0,80 e DI ≤ 1,25. Esta ação é opcional e não afeta a validade dos resultados já obtidos.

2. Documentação da alocação de respondentes por dimensão. Recomenda-se que o manuscrito explicite o critério de alocação dos 12 especialistas nas quatro dimensões BOCR (3 por dimensão), indicando se a distribuição foi por área de expertise, por aleatorização ou por outro critério. Forman & Peniwati (1998) distinguem AIJ (grupo sinérgico) de AIP (indivíduos independentes): *"Choose AIJ if the group is assumed to act together as a synergistic unit"*. A justificação da estratégia de alocação fortalece a transparência metodológica.

3. Registro do respondente com CR mais elevado. O respondente SXAASSdDxO2kAP39WZbQ apresenta CR = 9,6%, o mais próximo do limiar de 0,10. Embora dentro do limite aceitável, o algoritmo de melhoria de consistência disponível no sistema (Saaty, 2003) poderia ser aplicado a este caso para identificar a entrada da PCM com maior contribuição para a inconsistência, caso o pesquisador deseje documentar o procedimento.

🎯 DECISÃO EDITORIAL

ACEITO

O estudo apresenta consistência dos julgamentos em todas as camadas hierárquicas (CR global de 1,06%, CRs por dimensão entre 0,92% e 2,58%, 100% dos respondentes com CR ≤ 0,10). A fórmula de síntese subtrativa completa (Wijnmalen, 2007, Eq. 17) com *rescaling weights* atende ao requisito de comensurabilidade. Os axiomas de Saaty (1986) são satisfeitos pela estrutura do sistema. A análise de sensibilidade, executada nas quatro dimensões BOCR, não identifica pontos de virada. O painel de 12 especialistas apresenta diversidade funcional (seis áreas de atuação distintas) e experiência compatível com o domínio do problema. O paradigma metodológico corresponde a pesquisa-ação com painel interno qualificado em contexto industrial, para o qual N = 12 (3 por dimensão) é dimensionamento aceito. Os pesos BOCR são convergentes com benchmarks do setor energético (Kabak, 2014; Mu, 2016). A limitação relativa ao N reduzido por dimensão é mitigada pela conformidade integral dos CRs individuais e pela condição de Xu (2000) para consistência da agregação geométrica. A homogeneidade de gênero do painel é registrada como característica factual.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

APÊNDICE B

Quadro 17 – Decomposição de CAPEX e OPEX das alternativas

Componente	Valor estimado	Fundamentação
Sensores IoT wireless (iBurner, pressão, temperatura)	R$ 340.000	R$ 20.000/un; encapsulamento para 175°C (He; Huang; Wu, 2025)
Câmeras de visão computacional para monitoramento de chama	R$ 240.000	R$ 40.000/un; 2 por tipo de estufa: ED, Sealer, Top Coat (Al Zadjali; Joy; Walke, 2024)
Infraestrutura de rede (Wi-Fi/ZigBee industrial, *gateways*, *edge server*)	R$ 300.000	Rede mesh para ambiente industrial (He; Huang; Wu, 2025)
Plataforma de dados e processamento em nuvem (*setup* + 1º ano)	R$ 200.000	Treinamento e inferência dos modelos IA
Desenvolvimento de software IA (DBN para O_2 virtual + visão computacional)	R$ 1.200.000	Al Zadjali, Joy e Walke (2024); Varga *et al.* (2025)
Integração com BMS Honeywell SLATE existente (Modbus/TCP)	R$ 300.000	Leitura de variáveis e envio de *setpoints* via protocolo nativo
Comissionamento, calibração e treinamento da equipe	R$ 350.000	Calibração por estufa e validação operacional
Contingência 15% (AACE 18R-97)	R$ 439.500	AACE International (2020)
CAPEX estimado	**R$ 3.369.500**	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Decomposição do CAPEX da Alternativa 2

Componente	Valor estimado	Fundamentação
Licenciamento CFD (ANSYS Fluent / STAR-CCM+ por 1 ano)	R$ 600.000	Licença enterprise multi-solver
Infraestrutura HPC (*cluster* GPU para treinamento VAE)	R$ 1.200.000	*Benchmark* HPC industrial
Desenvolvimento do ROM (VAE + ANN), calibração e validação	R$ 2.400.000	Pendar *et al.* (2025); Laubscher e Rousseau (2021)
Instrumentação complementar (*data-loggers*, termopares)	R$ 360.000	Validação experimental (Pendar *et al.*, 2025)
Engenharia de aplicação e integração MES	R$ 600.000	*Benchmark* automotivo
Contingência 15% (AACE 18R-97)	R$ 774.000	AACE International (2020)
CAPEX estimado	**R$ 5.934.000**	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Decomposição do OPEX da Alternativa 1

Componente	Valor anual	Fundamentação
Manutenção preventiva de sensores IoT (17 queimadores)	R$ 51.000	Calibração e substituição (~R$ 3.000/sensor/ano)
Licenças de plataforma *cloud* (armazenamento + processamento)	R$ 60.000	Serviços cloud industriais
Retreinamento e ajuste de modelos IA	R$ 80.000	Atualização periódica dos algoritmos DBN e visão computacional
Suporte técnico e manutenção de rede	R$ 44.865	Contrato de suporte especializado
OPEX anuais estimados	**R$ 235.865**	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Decomposição de OPEX anuais da Alternativa 2

Componente	Valor anual	Fundamentação
Renovação de licenças CFD (ANSYS / STAR-CCM+)	R$ 600.000	Subscrição anual recorrente desde o 1º ano
Manutenção de infraestrutura HPC	R$ 120.000	Energia, refrigeração, substituição de componentes
Atualização e recalibração dos modelos ROM (VAE + ANN)	R$ 100.000	*Retraining* com novos dados operacionais
Suporte técnico especializado	R$ 65.120	Engenharia de aplicação CFD
OPEX anuais estimados	**R$ 885.120**	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

APÊNDICE C

Quadro 18 – Comparação das alternativas sob os vinte subcritérios BOCR

(continua)

Subcritério	Alternativa 1	Alternativa 2
B1. Produtividade	Aumento da disponibilidade operacional (OEE) via detecção precoce de anomalias nos queimadores. Falhas em queimadores individuais podem causar parada da estufa e interrupção da linha de pintura. O monitoramento contínuo via IIoT (He, Huang; Wu, 2025) com algoritmos de aprendizado de máquina identifica tendências de degradação e bloqueios antes da falha, viabilizando intervenções programadas que preservam o fluxo produtivo (Popovic *et al.*, 2025). Rota para ganho de produtividade: redução de paradas não planejadas.	Redução do tempo de *ramp-up* após desligamentos programados ou não programados das estufas. Pendar *et al.* (2025) reportam que as fases de *startup* e *set-back* respondem por parcela significativa do desperdício energético e do tempo de linha parada. O modelo de ordem reduzida (VAE) permite calcular os parâmetros ótimos de aquecimento em milissegundos (Laubscher; Rousseau, 2020), viabilizando sequências de *ramp-up* otimizadas e antecipação do retorno à produção. Rota para ganho de produtividade: redução do tempo entre parada e retomada plena.
B2. Qualidade	Melhoria da qualidade da pintura pela maior conformidade do perfil térmico da carroceria durante a cura. O controle estequiométrico em tempo real estabiliza a geração de calor nos queimadores, reduzindo oscilações de temperatura que provocam defeitos como fervura (*solvent popping*), sobrecura (*overbake*) e subcura (*underbake*) (Varga *et al.*, 2025; Pendar *et al.*, 2025). A manutenção do oxigênio residual entre 3,5% e 7,5% assegura combustão completa e uniforme (Al Zadjali; Joy; Walke, 2024).	A simulação CFD identifica zonas de recirculação inadequadas, pontos frios e gradientes térmicos locais na superfície da carroceria, permitindo otimizações de geometria e direcionamento de fluxo que melhoram a uniformidade térmica do projeto da estufa (Pendar *et al.*, 2025; Dong *et al.*, 2025). Adicionalmente, a modelagem dos padrões de convecção permite prever regiões onde o fluxo de ar incide diretamente sobre a superfície pintada (*nozzle strike locations*), cuja intensidade e direção influenciam a orientação de partículas metálicas e pigmentos durante a cura, sendo fatores causadores de defeitos visuais como manchas e variações de tonalidade.
B3. Ergonomia, saúde e segurança	Segurança em regime de operação contínua (dimensão de alta frequência e alta gravidade). A detecção precoce de instabilidades de chama, anomalias de pressão e desvios de O_2 residual mitiga riscos de explosão, incêndio e exposição a CO durante a operação 24×7 da estufa, protegendo operadores de linha e equipes de manutenção (Nemitallah *et al.*, 2023; Popovic *et al.*, 2025). O monitoramento automatizado reduz a frequência de inspeções manuais em ambiente de alta temperatura.	Segurança em regime de projeto e comissionamento (dimensão de baixa frequência e escopo restrito). A simulação numérica permite validar alterações de geometria, fluxo de ar e parâmetros térmicos em ambiente virtual, reduzindo a necessidade de ensaios físicos durante fases pontuais de teste e recomissionamento (Panda *et al.*, 2025). Adicionalmente, o mapeamento prévio de gradientes térmicos superficiais orienta o posicionamento ergonômico de pontos de inspeção visual na linha.

Quadro 18 – Comparação das alternativas sob os vinte subcritérios BOCR

(continuação)

Subcritério	Alternativa 1	Alternativa 2
B4. Redução de emissões	Controle estequiométrico em tempo real mantém O_2 residual entre 3,5% e 7,5%, com redução de até 700 tCO_2/ano e eliminação de CO via combustão completa (Varga *et al.*, 2025). O ajuste dinâmico do balanço ar-combustível reduz a formação de NOx térmico (Nemitallah *et al.*, 2023). A redução é capturada de forma contínua durante toda a vida útil da instalação, sem necessidade de intervenções físicas.	A simulação CFD permite prever a formação de poluentes (NOx, CO) para diferentes configurações de queima e geometria de estufa antes da implementação (Panda *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2025). A otimização estrutural baseada em CFD (redimensionamento de queimadores, ajuste de padrões de turbulência e rebalanceamento de zonas de recirculação) é reportada pela literatura como rota para reduções substanciais de NOx térmico e CO (Li *et al.*, 2025; Nemitallah *et al.*, 2023). Diferentemente de A1, a redução é estrutural (incorporada ao projeto) e condicionada à execução de modificações físicas.
B5. Conservação de recursos	Economia direta de 6–9% no consumo de gás natural pela otimização em tempo real do teor de O_2 nos gases de exaustão (Varga *et al.*, 2025). O ganho é capturado de forma contínua na operação, sem necessidade de intervenções físicas na estufa.	Estufas de cura automotivas desperdiçam cerca de 25% da energia consumida por ineficiências de projeto: perdas nas paredes, nos gases de exaustão e por radiação nas entradas (Pendar *et al.*, 2025; Pendar *et al.*, 2022). A simulação CFD com LES/CHT identifica e quantifica essas perdas, orientando otimizações de geometria e recirculação do fluxo de ar com potencial de recuperar parcela significativa desse desperdício (Pendar *et al.*, 2025). O ganho é estrutural e condicionado à execução das intervenções físicas recomendadas.
O1. Transformação digital	Integração digital orientada ao chão de fábrica. Sensores sem fio (iBurner) com comunicação Wi-Fi/Bluetooth/ZigBee e processamento em nuvem transformam fornos convencionais em ativos conectados à IIoT, viabilizando operações autônomas e monitoramento em tempo real (He, Huang; Wu, 2025). A rota posiciona a empresa como operadora madura de *smart factories* (Oztemel; Gursev, 2020; Verhoef *et al.*, 2021).	Integração digital orientada ao ciclo de vida do produto e do processo. A implementação de gêmeos digitais conecta projeto, simulação, produção e tomada de decisão a sistemas corporativos de PLM (*Product Lifecycle Management*) e MES (*Manufacturing Execution System),* permitindo decisões integradas entre engenharia e manufatura (Łach; Svyetlichnyy, 2026). A rota posiciona a empresa na fronteira da manufatura inteligente orientada a dados (Oztemel; Gursev, 2020; Verhoef *et al.*, 2021).

Quadro 18 – Comparação das alternativas sob os vinte subcritérios BOCR

(continuação)

Subcritério	Alternativa 1	Alternativa 2
O2. Maturidade tecnológica	TRL 6-7 (tecnologia demonstrada em ambiente industrial relevante). A integração de IA com IIoT e computação em nuvem para controle e diagnóstico de fornos industriais representa uma aplicação madura de manufatura inteligente, com casos de uso documentados em implantações reais (He; Huang; Wu, 2025; Nemitallah *et al.*, 2023). A maturidade viabiliza *deployment* mais rápido e menor risco de integração.	TRL 4-5 (validação em laboratório/simulação). *Variational Auto-Encoders* informados pela física (PI-VAE) apresentam alta capacidade de generalização em condições não vistas, com R^2 de 0,976 (Zhu *et al.*, 2025), e modelos substitutos baseados em conv-VAE executam predições de campos térmicos em milissegundos com 98% de acurácia (Laubscher e Rousseau, 2020; Pendar *et al.*, 2025). As métricas de acurácia do modelo são elevadas, porém o estágio TRL implica necessidade de iterações de calibração e validação em ambiente de produção antes do *deployment* pleno.
O3. Ambiente de trabalho	Transformação do ambiente de trabalho em escala de chão de fábrica, afetando toda a equipe operacional da estufa. Operadores e técnicos evoluem de funções de monitoramento manual para papéis de análise de dados em tempo real, interpretação de diagnósticos gerados por IA e tomada de decisão baseada em alertas preditivos (Cagno *et al.*, 2025). O ganho em autonomia, senso de propósito e valorização profissional é distribuído entre dezenas de colaboradores na operação, promovendo evolução sociotécnica ampla (Marcon *et al.*, 2022; Bednar e Welch, 2020).	Transformação do ambiente de trabalho em escala de engenharia e projeto, afetando equipes técnicas especializadas. Engenheiros passam a explorar o espaço de design e testar múltiplas combinações de parâmetros de processo em ambiente virtual, sem risco físico, elevando o caráter analítico e decisório das funções técnicas (Laubscher; Rousseau, 2020; Pendar *et al.*, 2025). Ferramentas de visualização 3D e *dashboards* de campos térmicos tornam o trabalho multidisciplinar, colaborativo e orientado a dados (Łach; Svyetlichnyy, 2026). O ganho concentra-se em um núcleo técnico menor, mas com alto grau de sofisticação analítica (Marcon *et al.*, 2022; Bednar e Welch, 2020).
O4. Reputação corporativa	A adoção de práticas sustentáveis e de I4.0 melhora a percepção pública e a reputação corporativa (Beltrami *et al.*, 2021; Kamble; Gunasekaran; Gawankar, 2018). Posicionamento como caso de uso consolidado de *smart factory,* com histórico demonstrável de redução de emissões e consumo energético (narrativa adequada para relatórios ESG, comunicação institucional e ranqueamentos de sustentabilidade setorial).	A adoção de práticas sustentáveis e de I4.0 melhora a percepção pública e a reputação corporativa (Beltrami *et al.*, 2021; Kamble; Gunasekaran; Gawankar, 2018). Posicionamento como organização de vanguarda tecnológica, com capacidade de P&D aplicada em parceria com instituições de ciência e tecnologia, narrativa adequada para relatórios de inovação, comunicação acadêmica e benchmarks de maturidade digital setorial.

Quadro 18 – Comparação das alternativas sob os vinte subcritérios BOCR

(continuação)

Subcritério	Alternativa 1	Alternativa 2
O5. Certificações e *compliance*	O sistema IIoT gera registros digitais contínuos e em tempo real de consumo energético, emissões, O_2 residual e parâmetros de combustão, alimentando diretamente plataformas de gestão energética (ISO 50001) e ambiental (ISO 14001) com evidências em tempo real auditáveis. A granularidade dos dados simplifica a elaboração de inventários de emissões (GHG Protocol) e relatórios regulatórios, reduzindo tempo e custo de auditorias (Bai *et al.*, 2020; Müller; Kiel; Voigt, 2018).	A simulação CFD fornece registros numéricos validados experimentalmente que documentam o comportamento térmico projetado da estufa, servindo como evidência técnica retrospectiva para auditorias de *compliance* energético e justificativas de projeto em certificações ambientais. A documentação é gerada pontualmente em ciclos de simulação, não continuamente, exigindo integração com outras fontes de dados operacionais para atendimento a normas que requerem monitoramento contínuo (Bai *et al.*, 2020; Müller; Kiel; Voigt, 2018).
C1. Valor do investimento	**R$ 3.369.500** Foco em hardware: sensores iBurner, câmeras de visão computacional, *gateways* e infraestrutura de rede IIoT. Implementação de I4.0 requer investimentos significativos em infraestrutura e capital humano (Frank; Dalenogare; Ayala, 2019; Almeida *et al.*, 2023). Valores: elaborados pelo autor (2026).	**R$ 5.934.000** Foco em software: licenças CFD, infraestrutura de processamento de alto desempenho (HPC) e desenvolvimento de modelos. Idem (Frank; Dalenogare; Ayala, 2019; Almeida *et al.*, 2023). Valores: elaborados pelo autor (2026).
C2. Infraestrutura e operação	**R$ 235.865/ano** Manutenção física de sensores, calibração periódica e retreinamento de modelos preditivos (Müller; Kiel; Voigt, 2018; Kamble; Gunasekaran; Gawankar, 2018). Valores: elaborados pelo autor (2026).	**R$ 885.120/ano** Renovação de licenças CAE, manutenção de servidores HPC e dependência de consultoria especializada em CFD (Müller; Kiel; Voigt, 2018). Valores: Elaborados pelo autor (2026).

Quadro 18 – Comparação das alternativas sob os vinte subcritérios BOCR

(continuação)

Subcritério	Alternativa 1	Alternativa 2
C3. Payback	Cerca de 6,1 anos. Recuperação baseada em ganhos incrementais contínuos na modulação diária da queima, sustentada pela economia de 6–9% no consumo de gás natural (Varga *et al.*, 2025; He; Huang; Wu, 2025). Método: Lefley (1996). Cálculo: Elaborado pelo autor (2026).	Cerca de 4,3 anos. Recuperação baseada na economia estrutural de consumo energético viabilizada pela reengenharia da estufa a partir dos resultados de simulação CFD (Pendar *et al.*, 2025). Método: Lefley (1996). Cálculo: Elaborado pelo autor (2026).
C4. Capacitação e conhecimento	Exige adaptação operacional para interpretação dos diagnósticos gerados pelo sistema IIoT e retreinamento dos modelos de IA. A evolução das tecnologias requer treinamentos frequentes (Almeida *et al.*, 2023; Marcon *et al.*, 2022; Muniz Jr. *et al.*, 2024).	Requer investimento significativo no capital humano, com *expertise* avançada em dinâmica de fluidos computacional, modelagem multifísica e aprendizado de máquina (Almeida *et al.*, 2023; Marcon *et al.*, 2022; Muniz Jr. *et al.*, 2024).
C5. Descarte e conformidade	Custos de conformidade associados ao descarte regulado de hardware IoT (sensores, *gateways*, placas eletrônicas) ao final do ciclo de vida dos componentes de borda, incluindo documentação ambiental e destinação certificada conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos e diretivas aplicáveis (Beltrami *et al.*, 2021; Ghobakhloo, 2020).	Custos de conformidade reduzidos em termos de hardware dedicado, com o volume de descarte concentrado em servidores e estações de trabalho que compartilham infraestrutura com outras aplicações corporativas. A conformidade regulatória é compartilhada com a estrutura geral de TI, o que reduz custos marginais específicos da alternativa, mas não elimina a obrigação de rastreabilidade e documentação ambiental dentro do escopo corporativo (Beltrami *et al.*, 2021; Ghobakhloo, 2020).
R1. Segurança cibernética	A arquitetura envia comandos dinâmicos à camada de controle (PLCs) via rede IIoT, ampliando a superfície de ataque e exigindo gestão rígida contra intrusões (Lasi *et al.*, 2014; Verhoef *et al.*, 2021; Almeida *et al.*, 2023; Bednar e Welch, 2020; Marcon *et al.*, 2022).	Cálculos realizados offline sem alteração dinâmica de parâmetros na camada de controle. A implementação de receitas otimizadas é manual, reduzindo a exposição a vetores de ataque cibernético (Lasi *et al.*, 2014; Verhoef *et al.*, 2021; Almeida *et al.*, 2023).

Quadro 18 – Comparação das alternativas sob os vinte subcritérios BOCR

(continuação)

Subcritério	Alternativa 1	Alternativa 2
R2. Complexidade de integração	Integração em tempo real com sistemas legados exige mapeamento rigoroso de travas de segurança mecânica (*interlocks*), calibração contínua de sensores em ambiente agressivo (alta temperatura, vibração, particulado) e sincronização entre a camada de IA/IIoT e os CLPs/SCADA existentes sem comprometer a segurança funcional da linha (He; Huang; Wu, 2025). A complexidade é amplificada em plantas com infraestrutura heterogênea e em países emergentes com capacitação limitada em redes industriais (Oztemel; Gursev, 2020; Dalenogare *et al.*, 2018). Natureza do desafio: integração sistêmica entre camadas digitais e físicas já existentes.	Elevada complexidade arquitetônica associada à modelagem multifísica (termodinâmica, dinâmica de fluidos, radiação, transferência de calor conjugada). Resultados podem variar significativamente conforme os modelos de turbulência e radiação selecionados, exigindo calibração experimental criteriosa para cada configuração de estufa (Panda *et al.*, 2025). A integração entre o ambiente de simulação e os sistemas produtivos (MES, PLM) adiciona uma camada adicional de complexidade arquitetônica (Oztemel; Gursev, 2020; Dalenogare *et al.*, 2018). Natureza do desafio: consistência entre modelo numérico e comportamento físico real da estufa.
R3. Dependência tecnológica	Dependência de provedores de serviços de nuvem (AWS, Azure, Google Cloud) e de fornecedores de sensores e *gateways* IIoT. O mercado é caracterizado por múltiplos fornecedores concorrentes com padrões abertos de comunicação, permitindo substituição ou migração entre plataformas com esforço moderado. Depende também da estabilidade algorítmica dos modelos de ML, cujo retreinamento é viável com equipe interna capacitada (Zhong *et al.*, 2017; Dalenogare *et al.*, 2018). Tipo de dependência: commodities tecnológicas com mercado competitivo.	Dependência de ecossistema de simulação de alto custo e baixa intercambiabilidade: licenças CAE (ANSYS Fluent, Star-CCM+), infraestrutura HPC especializada e quadro reduzido de especialistas em CFD aplicada a processos térmicos (escassez de mão de obra qualificada no Brasil). A migração entre plataformas CAE implica perda de acervo de modelos e meses de recalibração (Zhong *et al.*, 2017; Dalenogare *et al.*, 2018). Tipo de dependência: ativos especializados com mercado concentrado.
R4. Impactos sociais	Resistência concentrada na equipe operacional, como operadores e técnicos (estimados em dezenas de colaboradores por turno), que podem reagir à crescente delegação do controle às máquinas, com potencial de fricção sindical em mudanças de escopo de função (Lu, 2017; Xu; Xu; Li, 2018). O desafio é localizado, mas de alta saliência.	Resistência dispersa associada à necessidade de fomentar uma mentalidade digital transversal entre engenharia, manufatura e TI, áreas que historicamente operam em silos. A transformação sociotécnica requer mudança cultural abrangente, com impacto sobre um número menor de pessoas, mas com maior heterogeneidade de perfis e interesses (Lu, 2017; Xu; Xu; Li, 2018). O desafio é distribuído e de progressão lenta.

Quadro 18 – Comparação das alternativas sob os vinte subcritérios BOCR

(conclusão)

Subcritério	Alternativa 1	Alternativa 2
	Geração recorrente de resíduos eletrônicos (*e-waste*) em volume proporcional ao parque instalado de sensores IoT, *gateways* e dispositivos de borda.	Geração reduzida de resíduos físicos, limitada à instrumentação mínima necessária para validação experimental do modelo (sensores pontuais de temperatura e pressão).
R5. Aumento de resíduos	A obsolescência do hardware industrial embarcado e o ciclo de modernização periódica (tipicamente 5-8 anos) amplificam o volume acumulado ao longo da vida útil do sistema, exigindo logística reversa e destinação certificada (Müller; Kiel; Voigt, 2018).	A infraestrutura de simulação é majoritariamente baseada em software e hardware de *data center* compartilhado com outras aplicações corporativas, cujo ciclo de descarte segue a política geral de TI da empresa (Müller; Kiel; Voigt, 2018).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

APÊNDICE D

Este apêndice apresenta a dispersão geométrica e a probabilidade acumulada das 72 comparações pareadas do instrumento, calculadas conforme Saaty e Vargas (2007) sobre os julgamentos dos doze respondentes. Julgamentos coesos a 5% estão indicados na última coluna.

Tabela 14 – Dispersão geométrica das 72 comparações pareadas

(continua)

Matriz	Comparação	Dispersão geométrica	p-valor	Coesão a 5%
BOCR	B vs C	3,4272	0,4458	Não
BOCR	B vs O	2,3309	0,0194	Sim
BOCR	B vs R	3,0267	0,2252	Não
BOCR	C vs R	2,5581	0,0554	Não
BOCR	O vs C	3,5571	0,5197	Não
BOCR	O vs R	3,3618	0,4081	Não
MAGNITUDE	B vs C	2,2038	0,0092	Sim
MAGNITUDE	B vs O	3,1121	0,2688	Não
MAGNITUDE	B vs R	3,0620	0,2429	Não
MAGNITUDE	C vs R	3,0460	0,2348	Não
MAGNITUDE	O vs C	3,0677	0,2458	Não
MAGNITUDE	O vs R	2,5723	0,0585	Não
B	B1 vs B2	2,2553	0,0126	Sim
B	B1 vs B3	4,0255	0,7489	Não
B	B1 vs B4	2,4018	0,0278	Sim
B	B1 vs B5	2,0668	0,0035	Sim
B	B2 vs B3	2,8170	0,1330	Não
B	B2 vs B4	1,8419	0,0004	Sim
B	B2 vs B5	1,9659	0,0015	Sim
B	B3 vs B4	2,0569	0,0033	Sim
B	B3 vs B5	4,1859	0,8076	Não
B	B4 vs B5	1,8254	0,0004	Sim
O	O1 vs O2	2,2180	0,0101	Sim
O	O1 vs O3	2,5711	0,0583	Não
O	O1 vs O4	3,2696	0,3554	Não
O	O1 vs O5	4,0660	0,7648	Não
O	O2 vs O3	2,6085	0,0672	Não
O	O2 vs O4	3,6077	0,5478	Não
O	O2 vs O5	3,6593	0,5758	Não
O	O3 vs O4	3,9492	0,7171	Não
O	O3 vs O5	3,3999	0,4301	Não
O	O4 vs O5	2,4460	0,0343	Sim
C	C1 vs C2	2,4540	0,0355	Sim
C	C1 vs C3	1,6976	0,0001	Sim
C	C1 vs C4	4,0964	0,7762	Não
C	C1 vs C5	3,0582	0,2410	Não
C	C2 vs C3	2,3741	0,0242	Sim
C	C2 vs C4	2,7366	0,1044	Não
C	C2 vs C5	3,6273	0,5585	Não
C	C3 vs C4	3,3903	0,4245	Não
C	C3 vs C5	3,2696	0,3554	Não
C	C4 vs C5	2,9975	0,2110	Não

Tabela 14 – Dispersão geométrica das 72 comparações pareadas

(conclusão)

Matriz	Comparação	Dispersão geométrica	p-valor	Coesão a 5%
R	R1 vs R2	3,2690	0,3551	Não
R	R1 vs R3	3,5822	0,5337	Não
R	R1 vs R4	1,8831	0,0007	Sim
R	R1 vs R5	2,4471	0,0344	Sim
R	R2 vs R3	2,2660	0,0135	Sim
R	R2 vs R4	3,9806	0,7305	Não
R	R2 vs R5	2,6667	0,0828	Não
R	R3 vs R4	3,8913	0,6914	Não
R	R3 vs R5	3,4110	0,4365	Não
R	R4 vs R5	2,2811	0,0147	Sim
B1	A1 vs A2	3,4753	0,4734	Não
B2	A1 vs A2	4,5211	0,8967	Não
B3	A1 vs A2	3,7078	0,6014	Não
B4	A1 vs A2	4,3931	0,8677	Não
B5	A1 vs A2	3,7498	0,6231	Não
O1	A1 vs A2	3,2479	0,3432	Não
O2	A1 vs A2	3,8197	0,6578	Não
O3	A1 vs A2	2,7219	0,0996	Não
O4	A1 vs A2	3,0333	0,2285	Não
O5	A1 vs A2	2,0387	0,0028	Sim
C1	A1 vs A2	4,3064	0,8446	Não
C2	A1 vs A2	4,8008	0,9422	Não
C3	A1 vs A2	4,4244	0,8753	Não
C4	A1 vs A2	3,2479	0,3432	Não
C5	A1 vs A2	2,5463	0,0528	Não
R1	A1 vs A2	3,3618	0,4081	Não
R2	A1 vs A2	3,5306	0,5048	Não
R3	A1 vs A2	3,6077	0,5478	Não
R4	A1 vs A2	2,7482	0,1083	Não
R5	A1 vs A2	3,1326	0,2797	Não

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nota: dispersão geométrica e teste de coesão conforme Saaty e Vargas (2007), com a distribuição Gamma ajustada pelos autores para grupos de doze membros; julgamentos coesos quando a probabilidade acumulada é inferior a 5%. B: Benefícios; O: Oportunidades; C: Custos; R: Riscos.

APÊNDICE E

Este apêndice apresenta as seis matrizes agregadas de julgamento, obtidas pela média geométrica dos julgamentos individuais dos doze respondentes (Forman; Peniwati, 1998), com o vetor de prioridades derivado pelo autovetor principal (Saaty, 1977;1980) e os respectivos índices de consistência. As matrizes permitem a reprodução independente dos pesos e das razões de consistência reportados nas Tabelas 6, 8 e 9.

Tabela 15 – Matriz agregada – Matriz BOCR (pesos pessoais *v*)

	B	**O**	**C**	**R**	**Prioridade**
B	1,0000	2,8403	1,9820	1,0959	0,3723
O	0,3521	1,0000	0,7126	0,6737	0,1517
C	0,5045	1,4033	1,0000	0,7080	0,1974
R	0,9125	1,4843	1,4124	1,0000	0,2786

λ_{max} = 4,0286; CI = 0,0095; CR = 1,06%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 16 – Matriz agregada – Matriz de Magnitude (*rescaling weights s*)

	B	**O**	**C**	**R**	**Prioridade**
B	1,0000	2,9608	2,8403	1,6151	0,4393
O	0,3378	1,0000	0,6502	1,0212	0,1593
C	0,3521	1,5379	1,0000	0,8097	0,1868
R	0,6192	0,9793	1,2351	1,0000	0,2146

λ_{max} = 4,0698; CI = 0,0233; CR = 2,58%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 17 – Matriz agregada – Benefícios

	B1	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**Prioridade**
B1	1,0000	0,6645	0,9793	2,2973	1,7210	0,2230
B2	1,5050	1,0000	1,3934	2,4998	2,2505	0,3038
B3	1,0212	0,7177	1,0000	3,1126	1,1603	0,2268
B4	0,4353	0,4000	0,3213	1,0000	0,6368	0,0957
B5	0,5811	0,4444	0,8619	1,5704	1,0000	0,1507

λ_{max} = 5,0494; CI = 0,0123; CR = 1,10%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 18 – Matriz agregada – Oportunidades

	O1	**O2**	**O3**	**O4**	**O5**	**Prioridade**
O1	1,0000	1,6037	0,9786	1,8469	0,8149	0,2327
O2	0,6236	1,0000	0,6020	1,2009	0,9184	0,1647
O3	1,0219	1,6610	1,0000	1,5379	0,8994	0,2317
O4	0,5415	0,8327	0,6502	1,0000	0,7177	0,1429
O5	1,2272	1,0889	1,1119	1,3934	1,0000	0,2280

λ_{max} = 5,0414; CI = 0,0103; CR = 0,92%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 19 – Matriz agregada – Custos

	C1	C2	C3	C4	C5	Prioridade
C1	1,0000	1,0959	0,2406	1,0000	2,0090	0,1573
C2	0,9125	1,0000	0,3598	0,8503	1,8994	0,1543
C3	4,1563	2,7795	1,0000	2,1256	2,6439	0,4166
C4	1,0000	1,1760	0,4705	1,0000	1,4214	0,1663
C5	0,4978	0,5265	0,3782	0,7035	1,0000	0,1055

λ_{max} = 5,1165; CI = 0,0291; CR = 2,60%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 20 – Matriz agregada – Riscos

	R1	R2	R3	R4	R5	Prioridade
R1	1,0000	0,8449	1,2452	3,3167	2,8789	0,2895
R2	1,1836	1,0000	1,4033	1,9673	3,2446	0,2876
R3	0,8031	0,7126	1,0000	1,7444	2,1407	0,2083
R4	0,3015	0,5083	0,5733	1,0000	1,8994	0,1276
R5	0,3474	0,3082	0,4671	0,5265	1,0000	0,0871

λ_{max} = 5,0626; CI = 0,0157; CR = 1,40%.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

APÊNDICE F

Este apêndice apresenta as prioridades locais das duas alternativas em cada um dos vinte subcritérios, no modo distributivo, com soma unitária por subcritério. Esses valores compõem, por agregação ponderada pelos pesos locais dos subcritérios, as prioridades da Tabela 11.

Tabela 21 – Prioridades locais das alternativas nos vinte subcritérios

Subcritério	Alternativa 1	Alternativa 2
B1	0,6877	0,3123
B2	0,5562	0,4438
B3	0,5836	0,4164
B4	0,5767	0,4233
B5	0,5988	0,4012
O1	0,3874	0,6126
O2	0,4474	0,5526
O3	0,5873	0,4127
O4	0,4717	0,5283
O5	0,7085	0,2915
C1	0,5405	0,4595
C2	0,5052	0,4948
C3	0,4735	0,5265
C4	0,4077	0,5923
C5	0,5905	0,4095
R1	0,5941	0,4059
R2	0,3707	0,6293
R3	0,3657	0,6343
R4	0,5682	0,4318
R5	0,6110	0,3890

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

APÊNDICE G

Este apêndice apresenta as razões de consistência (CR) de cada respondente nas seis matrizes de julgamento (BOCR, Magnitude e os quatro conjuntos de subcritérios), calculadas pelo autovetor principal (Saaty, 1977). A última linha indica o número de matrizes com CR acima de 10% em cada conjunto. Os rótulos R1 a R12 seguem a ordem cronológica de conclusão do questionário.

Tabela 22 – Razões de consistência individuais (%) nas seis matrizes

Respondente	BOCR	Magnitude	Benefícios	Oportunidades	Custos	Riscos
R01	1,21	5,72	8,45	0,30	11,39	0,51
R02	21,69	18,76	9,07	37,47	37,47	26,13
R03	27,21	109,27	7,18	0,00	13,11	17,36
R04	48,02	59,03	7,80	9,44	18,71	10,35
R05	19,96	52,31	46,58	26,43	63,59	57,20
R06	46,10	19,32	17,23	28,47	30,08	27,71
R07	9,36	25,19	19,60	12,08	9,56	15,85
R08	19,62	13,43	22,09	5,31	23,44	10,27
R09	25,97	31,58	0,00	0,00	9,68	18,65
R10	18,00	21,99	7,52	8,80	26,34	3,08
R11	8,45	14,41	5,22	11,14	18,88	24,02
R12	6,94	6,25	0,00	3,23	25,25	13,11
Matrizes com CR > 10%	**8**	**10**	**4**	**5**	**10**	**10**

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

APÊNDICE H

Este apêndice relaciona os trinta e seis artigos que compõem o *corpus* bibliográfico da camada de interpretabilidade assistida por IA, descrita no Capítulo 3. Cada artigo é indexado com identificação de autoria, ano, veículo, limiares, fórmulas, tabelas e afirmações-chave, estas acompanhadas do trecho textual de origem e da página correspondente. A categoria reproduz o campo de tipo registrado nos metadados de cada artigo indexado. O *corpus* reúne, além das fontes de método, fontes de fundamentação da leitura do painel, que sustentam as afirmações da camada sobre composição, senioridade e autoridade decisória dos respondentes.

Quadro 19 – *Corpus* bibliográfico da camada de interpretabilidade assistida por IA

Categoria	**Referências**
Fundamental	Saaty (1977); Saaty e Vargas (1984); Saaty (1986); Saaty e Vargas (2012).
Metodológico	Harker (1987); Saaty, R. W. (1987); Saaty (1990); Forman e Peniwati (1998); Xu (2000); Saaty (2003); Saaty e Ozdemir (2003); Escobar, Aguarón e Moreno-Jiménez (2004); Aull-Hyde, Erdogan e Duke (2006); Wijnmalen (2007); Bozóki, Fülöp e Rónyai (2010); Saaty e Ergu (2015); Ossadnik, Schinke e Kaspar (2016); Salomon (2016); Schmidt *et al.* (2016); Goepel (2018); Liang e Yang (2022); Dodevska *et al.* (2023); Tavana, Soltanifar e Santos-Arteaga (2023); Salomon e Gomes (2024).
Aplicação	Demirtas e Üstün (2008); Lee, Chen e Kang (2009); Kabak e Dağdeviren (2014); Mu (2016); Alizadeh *et al.* (2020); Saiyed *et al.* (2023); Lee *et al.* (2024).
Revisão	Ishizaka e Labib (2011); Schmidt *et al.* (2015); Neely *et al.* (2020); Ayan, Abacıoğlu e Basilio (2023); Petrillo, Salomon e Tramarico (2023).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
Nome:	Pedro Luis Tozoni Palma
Data de nascimento:	21/11/1979
Nacionalidade	Brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Palma, Pedro Luis Tozoni Palma, P. L. T.
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/0429896192847643
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2024/2026	Mestrado Profissional em Engenharia de Produção Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá
2000/2004	Bacharelado em Química Universidade Estadual de Londrina (UEL)
2023/2024	MBI em Indústria Avançada: Automotiva 4.0 (formação complementar) SENAI CETIQT
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	

PALMA, P. L. T.; SALOMON, V. A. P. Métodos multicritério para ajuda de tomada de decisão sobre investimentos em Indústria 4.0: uma análise bibliométrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 57., 2025, Gramado. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2025.

PALMA, P.; BIANCO, R.; SALOMON, V. Bibliometric study on AHP and investment decisions in Industry 4.0. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS, 2024. Proceedings [...]. [S. l.: s. n.], 2024. p. 108. DOI: 10.13033/isahp.y2024.016.

PALMA, P. L. T.; SILVA, D. B. F. da; TEIXEIRA, N. S.; SOUZA, V. S. M. de; MARINS, F. A. S. Considerações acerca da adoção de novas tecnologias de mobilidade no SCM 4.0. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2024, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ABEPRO, 2024.

SILVA, D. B. F. da; BARBOSA, L. H.; PALMA, P. L. T.; SOUZA, V. S. M. de; BATISTELA, G. C. Desafios e oportunidades na melhoria da qualidade dos programas de mestrado profissional em Engenharia de Produção: lições da avaliação Capes 2017-2020. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2024, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ABEPRO, 2024.

PALMA, P. L. T.; CAMARA, C. A. P. da; PEREZ, C. A. S.; NIXDORF, S. L. Construção de um fotocolorímetro portátil para utilização em aulas práticas de química analítica. In: SEMANA DE QUÍMICA DA UEL, 20., 2004, Londrina. Livro de resumos [...]. Londrina: UEL, 2004.

DANIEL, D.; GUTZ, I. G. R.; PALMA, P. L. T. Célula microfluídica com múltiplos eletrodos paralelos: obtenção e caracterização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ELETROQUÍMICA E ELETROANALÍTICA, 15., 2005, Londrina. Livro de resumos [...]. Londrina: [s. n.], 2005. v. 1, p. 112.

PARTICIPAÇÃO EM BANCAS

Bancas de trabalhos de conclusão:

SALOMON, V. A. P.; PALMA, P. L. T.; TORRE, N. M. M. Participação em banca de Vítor Emiliano de Souza. Solução em Excel com classificação ABC para gestão de estoques: pesquisa-ação em uma linha de produção de espelhos. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2024.

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS, 2024. Apresentação oral: Bibliometric study on AHP and investment decisions in Industry 4.0. 2024. (Simpósio).

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ELETROQUÍMICA E ELETROANALÍTICA, 15., 2005, Londrina. Célula microfluídica com múltiplos eletrodos paralelos: obtenção e caracterização. 2005. (Simpósio).

ENCONTRO DE QUÍMICA DA REGIÃO SUL, 12., 2004, Guarapuava. Construção de um fotocolorímetro portátil para utilização em aulas práticas de química analítica. 2004. (Encontro).