



# TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA AUMENTO DA SUSTENTABILIDADE NO PROCESSO DE MONTAGEM DE BICICLETAS

JOÃO PEDRO FERNANDES MARTINS

julho de 2025

**TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA  
AUMENTO DA SUSTENTABILIDADE NO PROCESSO  
DE MONTAGEM DE BICICLETAS**

**João Pedro Fernandes Martins**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em  
Gestão Industrial**

**Orientador: Doutora Marisa João Guerra Pereira**

**Co-orientador: Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira**

**Júri:**

Presidente: António Manuel Pereira da Silva Amaral, Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Vogais:**

Carlos Francisco Simões Gomes, Professor Associado da Universidade Federal Fluminense (Arguente)

Marisa João Guerra Pereira, Professora Adjunta do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Maria Teresa Ribeiro Pereira, Professora Coordenadora do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Porto, Junho 2025



# Agradecimentos

A conclusão desta dissertação representa uma etapa muito significativa na minha vida académica e pessoal. Por isso, não poderia deixar de expressar a minha profunda gratidão a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização desta dissertação.

Em primeiro lugar, um agradecimento muito especial aos meus pais, José Carlos Martins e Ana Fernandes Martins, pelo apoio incondicional, encorajamento constante e valores que sempre me transmitiram. São, sem dúvida, os grandes impulsionadores da pessoa que sou hoje.

À minha namorada, Beatriz Caetano, agradeço por ter sido um pilar fundamental ao longo deste percurso. A tua paciência, motivação e apoio constante foram essenciais nos momentos mais exigentes deste desafio.

Quero igualmente agradecer às minhas orientadoras, Doutora Marisa João Guerra Pereira e Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira, pela orientação rigorosa, pela disponibilidade permanente, pelas sugestões pertinentes e pelos conhecimentos transmitidos ao longo de toda a realização deste trabalho.

Um sincero agradecimento à empresa RTE por ter acolhido e apoiado a realização desta dissertação. Agradeço a confiança e os recursos disponibilizados, fundamentais para o desenvolvimento deste estudo. Dentro da organização, deixo uma palavra especial de agradecimento ao Eng.º Jorge Salgado, Eng.ª Susana Andrade, Eng.ª Marlene Saxe, Eng.º Henrique Valente, Márcio Santos e Gualter Aleixo, pelo tempo, colaboração e contributos valiosos ao longo deste percurso.

Aos meus amigos, que sempre estiveram presentes com palavras de apoio e incentivo, o meu muito obrigado por partilharem comigo cada conquista e cada momento deste desafio.

Por fim, deixo um agradecimento sentido a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho. A todos, o meu mais sincero obrigado.



# Resumo

A presente dissertação tem como objetivo propor e avaliar estratégias sustentáveis para melhorar o desempenho da linha de montagem de bicicletas da empresa RTE. O trabalho assenta na aplicação de uma metodologia de análise de decisão multicritério, que permite comparar alternativas de investimento sob diversas perspetivas de sustentabilidade. A investigação inicia-se com uma revisão bibliográfica que enquadra os conceitos de sustentabilidade no contexto industrial, os fundamentos da metodologia multicritério e a sua integração com práticas sustentáveis. Em seguida, são identificadas três alternativas estratégicas: a instalação de um sistema de produção de energia renovável, a digitalização da linha de montagem e a substituição de ferramentas pneumáticas por ferramentas elétricas. Estas alternativas são avaliadas segundo seis critérios representativos das dimensões económica, ambiental, social, de inovação, de qualidade e de produtividade. Para suportar esta avaliação foi utilizada uma metodologia híbrida que combina o método AHP com o método PROMETHEE. A determinação dos pesos relativos dos critérios foi realizada através do método AHP, com base em entrevistas à administração da empresa. Os valores obtidos foram integrados no método PROMETHEE para calcular os fluxos de preferência e realizar a ordenação das alternativas. Os resultados demonstraram que a substituição de ferramentas pneumáticas por ferramentas elétricas foi a alternativa mais vantajosa, com um fluxo líquido de 0,63. A digitalização da linha obteve um valor de 0,25 e a instalação de um sistema de produção de energia renovável um valor de -0,89. O estudo demonstra o potencial da abordagem multicritério na tomada de decisão industrial e propõe recomendações para a sua aplicação prática e evolução futura.

**Palavras-chave:** MCDA, Sustentabilidade, Processos industriais, AHP, PROMETHEE



# Abstract

This dissertation aims to propose and evaluate sustainable strategies to improve the performance of the bicycle assembly line at the company RTE. The work is based on the application of a multi-criteria decision analysis (MCDA) methodology, which allows comparing investment alternatives from various sustainability perspectives. The research begins with a literature review that frames the concepts of sustainability in the industrial context, the fundamentals of multi-criteria methodology, and its integration with sustainable practices. Three strategic alternatives are then identified: the installation of a renewable energy production system, the digitalization of the assembly line, and the replacement of pneumatic tools with electric tools. These alternatives are evaluated according to six criteria representing the economic, environmental, social, innovation, quality, and productivity dimensions. To support this evaluation, a hybrid methodology combining the AHP and PROMETHEE methods was used. The determination of the relative weights of the criteria was carried out using the AHP method, based on structured interviews with the company's management. The obtained weights were integrated into the PROMETHEE method to calculate the preference flows and rank the alternatives. The results showed that replacing pneumatic tools with electric tools was the most advantageous alternative, with a net flow of 0.63. Digitalization of the assembly line scored 0.25, and the installation of a renewable energy system scored -0.89. The study demonstrates the potential of the multi-criteria approach in industrial decision-making and proposes recommendations for its practical application and future development.

**KEYWORDS:** MCDA, Sustainability, Industrial processes, AHP , PROMETHEE



# Índice

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Acrónimos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura.....	2
1.5. Apresentação da empresa do caso de estudo.....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Sustentabilidade em Processos Industriais.....	6
2.1.1. Conceitos Fundamentais da Sustentabilidade.....	7
2.1.2. Indicadores de Sustentabilidade.....	8
2.1.3. Desafios para a Sustentabilidade em Processos Industriais.....	10
2.1.4. Práticas e Tecnologias para Melhorar a Sustentabilidade.....	13
2.2. Apoio à Decisão Multicritério - MCDA.....	15
2.2.1. Etapas da MCDA.....	15
2.2.2. Principais Métodos de MCDA.....	17
2.2.3. Comparação entre os Principais Métodos de MCDA.....	18
2.2.4. Métodos Híbridos em MCDA.....	20
2.2.5. Estado da Arte da MCDA.....	23
2.3. Integração da MCDA na Sustentabilidade.....	24
2.3.1. Seleção de Critérios de Sustentabilidade em MCDA.....	25
2.3.2. Desafios e Limitações na Integração.....	26
3. Métodos e Aplicação.....	29
3.1. AHP - <i>Analytic Hierarchy Process</i> .....	29
3.2. PROMETHEE - <i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i> .....	31
3.2.1. PROMETHEE I – Ordenação parcial.....	37
3.2.2. PROMETHEE II – Ordenação Completa.....	38
3.3. Desenvolvimento da Ferramenta de Tomada de Decisão AHP - PROMETHEE.....	39
3.4. Análise do Caso de Estudo.....	42
3.5. Alternativas Equacionadas.....	43
3.6. Definição de critérios.....	43
3.7. Apreciação das Alternativas.....	46

3.7.1. Investimento em Fontes de Energia Renovável que Permita Abastecer as Necessidades Totais da Linha de Montagem .....	46
3.7.2. Investimento na Digitalização do Processo Produtivo da Montagem .....	49
3.7.3. Investimento na Substituição de Ferramentas Pneumáticas para Elétricas.....	53
4. Resultados e Discussão .....	59
4.1. Apresentação de resultados.....	59
4.1.1. Dados de Entrada .....	59
4.1.2. Matriz de Preferência de Critérios.....	61
4.1.3. Matriz de Preferências Alternativas.....	62
4.1.4. <i>PROMETHE I</i> .....	65
4.2. Discussão de resultados .....	66
4.3. Análise de Sensibilidade .....	67
5. Conclusão .....	73
5.1. Conclusões finais .....	73
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	74
Referências.....	77
Declaração de Integridade .....	83
Apêndice A – Análise Bibliométrica VOSviewer .....	85
Apêndice B – Investimento na Transição de Ferramentas Pneumáticas para Elétricas .....	89
Apêndice C – Análises de Capabilidade de Ferramentas Elétricas e Pneumáticas .....	91
Apêndice D – Ferramenta MCDA Excel .....	95
Anexo A .....	97

# Lista de Figuras

Figura 1 RTE, SA Unidade Fabril em Portugal .....	4
Figura 2- As três dimensões da sustentabilidade (Adaptado de Dyllick & Hockerts, 2002) .....	6
Figura 3 A estrutura hierárquica da Global Reporting Initiative (GRI), (Adaptado do (Labuschagne et al., 2005) .....	9
Figura 4 Procedimento de avaliação do método híbrido Fuzzy AHP e Fuzzy TOPSIS (Adaptado de Torfi & et al.,2010) .....	21
Figura 5 Árvore Hierárquica .....	30
Figura 6 Matriz de avaliação, (adaptado J.-P. Brans & Mareschal, 2005).....	33
Figura 7 Funções de Preferência .....	35
Figura 8 Ferramenta PROMETHEE - Matriz de entrada de dados.....	39
Figura 9 Ferramenta PROMETHEE - Matriz de preferência de critérios .....	40
Figura 10 Ferramenta PROMETHEE - Funções de preferência .....	40
Figura 11 Ferramenta PROMETHEE - Matriz de índice de preferência agregado.....	41
Figura 12 Ferramenta PROMETHEE - Matriz dos fluxos de preferência .....	41
Figura 13 Ferramenta PROMETHEE - Fluxo de preferência líquido .....	41
Figura 14 Ferramenta PROMETHEE - Gráfico de resultados PROMETHEE II .....	42
Figura 15 Tempo de paragem em 2024 devido a ferramentas.....	57
Figura 16 Árvore hierárquica .....	60
Figura 17 Resultados do PROMETHEE II.....	66
Figura 18 Impacto da variação do critério - Impacto Económico .....	67
Figura 19 Impacto da variação do critério - Impacto Ambiental .....	68
Figura 20 Impacto da variação do critério - Impacto Social.....	69
Figura 21 Impacto da variação do critério - Inovação.....	69
Figura 22 Impacto da variação do critério - Qualidade.....	70
Figura 23 Impacto da variação do critério - Produtividade .....	70
Figura 24 Análise Bibliométrica das Fontes Bibliográficas .....	85
Figura 25 Análise Bibliométrica das Palavras Chaves .....	86
Figura 26 Análise Bibliométrica dos Artigos.....	87
Figura 27 Investimento na substituição de ferramentas pneumáticas para elétricas.....	90
Figura 28 Análise de capacidade de uma ferramenta elétrica (FEIN ASM 18-12PC).....	92
Figura 29 Análise de capacidade de uma ferramenta pneumática (LUM22HRX10) .....	93
Figura 30 Ligação para a ferramenta MCDA Excel .....	95
Figura 31 Simulação de desempenho da energia fotovoltaica na localização da empresa .....	97



# Lista de Tabelas

Tabela 1 Principais práticas da economia circular, (Geissdoerfer et al., 2017) .....	13
Tabela 2 Eficiência energética e tecnologias para as energias renováveis, (Energy Agency, 2021) .....	14
Tabela 3 Exemplos de materiais e processos ecológicos, (Kant & Kant, 2011; Mohanty et al., 2002) .....	14
Tabela 4 Comparação entre os principais métodos de MCDA .....	19
Tabela 5 Exemplos de métodos híbridos comuns e respectivas aplicações.....	22
Tabela 6 Descrição de trabalhos relacionados com MCDA e sustentabilidade .....	23
Tabela 7 A escala de Saaty para comparação par-a-par, (Turcksin et al., 2011) .....	30
Tabela 8 Valores referência do Índice de Consistência Aleatória (adaptado de Podvezko, 2009) .....	31
Tabela 9 Escala de avaliação para o critério de Impacto Social.....	44
Tabela 10 Escala de avaliação para o critério de Inovação .....	45
Tabela 11 Escala de avaliação para o critério de Qualidade .....	45
Tabela 12 Consumo mensal de eletricidade em 2024 .....	46
Tabela 13 Investimento na digitalização do processo produtivo .....	50
Tabela 14 Categorização e quantificação de parâmetros relativos a erros de operador e standards incorretos .....	52
Tabela 15 Consumos do sistema do ar comprimido .....	53
Tabela 16 Dados de entrada .....	60
Tabela 17 Matriz de preferência de critérios.....	61
Tabela 18 Matriz preferência: A1 vs A2 .....	62
Tabela 19 Matriz preferência: A1 vs A3 .....	63
Tabela 20 Matriz preferência: A2 vs A1 .....	63
Tabela 21 Matriz preferência: A2 vs A3 .....	64
Tabela 22 Matriz preferência: A3 vs A1 .....	64
Tabela 23 Matriz preferência: A3 vs A2 .....	64
Tabela 24 Resultados do PROMETHEE I.....	65



# Acrónimos

## Lista de Acrónimos

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CRITIC	<i>Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation</i>
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Translating Reality</i>
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GRI	Global Reporting Initiative
IA	Inteligência Artificial
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MCDA	Apoio à Decisão Multicritério
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>
ROI	Retorno do Investimento
SDGs	<i>Sustainable Development Goals</i>
SGAS	Sistemas de Gestão Ambiental Sustentável
TBL	<i>Triple Bottom Line</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
VIKOR	<i>Multi-Criteria Optimization and Compromise Solution</i>
IC	Índice de Consistência
RC	Rácio de Consistência
IR	Índice de Consistência Aleatória



# 1. Introdução

Neste primeiro capítulo do trabalho é realizada a contextualização do tema em discussão, destacando a relevância no estado atual da engenharia. De seguida, são apresentados os objetivos específicos a atingir ao longo do relatório e a metodologia utilizada para a investigação. Além disso, é apresentada a estrutura da dissertação, que orienta a análise sistemática do tema e permite uma compreensão clara das várias etapas da dissertação. Por fim, é realizada uma breve caracterização da empresa, onde será aplicado o caso de estudo que servirá de base à análise desenvolvida nesta dissertação.

## 1.1. Contextualização

Neste panorama de crescentes desafios ambientais, económicos e sociais é realmente necessário e estratégico a integração da sustentabilidade nos processos industriais. Desta forma, o desenvolvimento de modelos de apoio à decisão para ajudar a definir e implementar processos sustentáveis surge como uma ferramenta para as indústrias que visam otimizar os seus processos, mantendo uma gestão equilibrada entre a eficiência operacional e a responsabilidade social e ambiental.

Devido ao aumento das expectativas das partes interessadas e pressão das entidades regulatórias para o desenvolvimento de operações mais amigas do ambiente e eficientes, as empresas enfrentam desafios e decisões complexas no que diz respeito a adoção de práticas que atendem a essas exigências que por sua vez, também melhorem a inovação e competitividade. De forma a cumprir as normas e a alcançar um desenvolvimento industrial sustentável é fundamental que as indústrias sejam capazes de incorporar e ponderar critérios de sustentabilidade nas tomadas de decisão.

A presente dissertação visa abordar os principais conceitos teóricos da sustentabilidade e da metodologia apoio à decisão multicritério (MCDA), através de uma revisão da literatura baseada em artigos científicos, livros e relatórios com conteúdo relevante sobre os temas. Esta dissertação pretende contribuir para um melhor entendimento e aplicação da MCDA como uma ferramenta eficaz na tomada de decisão e definição de práticas sustentáveis a serem integradas nos processos industriais.

## **1.2. Objetivos**

Esta dissertação tem como propósito o desenvolvimento de um modelo de MCDA para ajudar na seleção de alternativas que promovam a sustentabilidade em processos industriais. Tendo em conta a crescente preocupação com as questões ambientais, esta investigação tem como objetivo identificar quais os critérios mais relevantes que influenciam a sustentabilidade, tendo em consideração aspetos económicos, sociais e ambientais.

Além disso, o modelo será aplicado a um caso de estudo específico para provar a sua eficácia e utilidade prática. Deste modo, pretende-se criar uma ferramenta que facilite na tomada de decisões em cenários complexos, ajudando assim as indústrias a adotarem soluções mais sustentáveis.

## **1.3. Metodologia**

A metodologia adotada neste relatório é dividida em várias etapas, com o objetivo de fundamentar e validar o modelo multicritério proposto. Inicialmente será feita uma revisão da literatura focada na sustentabilidade e na sua relação com os processos industriais. Nesta fase vão ser abordados os conceitos fundamentais da sustentabilidade, bem como as práticas industriais que promovem um desenvolvimento mais responsável e eficiente.

De seguida, vai ser analisada a metodologia MCDA e as suas diversas abordagens e aplicações. Este passo é essencial para perceber como esta metodologia pode ser integrada no contexto da sustentabilidade, de forma a permitir uma avaliação mais holística das alternativas disponíveis.

A revisão de literatura teve como suporte uma análise bibliométrica através do software *VOSviewer* que permitiu orientar de forma objetiva a pesquisa da literatura, perceber a relação entre artigos, autores, palavras ou outros elementos relevantes, conforme ilustrado no Apêndice A

Por fim, o modelo MCDA será desenvolvido com base em critérios identificados na revisão da literatura e validado através de um caso de estudo prático. Esta validação vai permitir aplicar o modelo num contexto real e avaliar a sua eficácia em processos industriais. O objetivo ao longo de todo o processo é garantir que o modelo cumpre com os requisitos académicos e é aplicável no atual panorama industrial.

## **1.4. Estrutura**

A estrutura desta dissertação foi concebida de forma a proporcionar uma abordagem clara e sistemática do tema em análise, facilitando a compreensão do respetivo conteúdo. O trabalho está dividido em cinco partes principais.

Na primeira parte, é realizado o enquadramento do tema da dissertação, são definidos os objetivos a alcançar, é apresentada a metodologia de investigação utilizada neste relatório e a respetiva estrutura.

A segunda parte do relatório corresponde à revisão da literatura, dividida em três secções principais. A primeira, dedicada à sustentabilidade em processos industriais, aborda os conceitos fundamentais de sustentabilidade, os seus indicadores, os desafios enfrentados neste segmento e as práticas e tecnologias voltadas para a sua melhoria. A segunda secção explora a MCDA, abordando os fundamentos desta metodologia, as etapas principais, os métodos mais relevantes e os aplicados na abordagem híbrida ao MCDA. Por fim, a terceira secção analisa a integração entre o MCDA e a sustentabilidade, explorando os critérios utilizados, os desafios enfrentados e as limitações dessa abordagem.

A terceira parte refere-se ao caso de estudo em análise, onde são identificadas estratégias para melhorar a sustentabilidade do processo produtivo. São também definidos os critérios de avaliação e é realizado o enquadramento detalhado de cada alternativa com base nos pilares económico, ambiental e social.

A quarta parte apresenta os resultados e a discussão da aplicação do método híbrido *Analytic Hierarchy Process (AHP) - Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)*, incluindo a definição dos dados de entrada, a matriz de preferências, a ordenação das alternativas segundo os métodos PROMETHEE I e II e a análise de sensibilidade.

Por fim, a quinta parte inclui as conclusões finais do trabalho, onde são sintetizados os principais contributos da dissertação, identificadas as suas limitações e sugeridas direções para trabalhos futuros.

## **1.5. Apresentação da empresa do caso de estudo**

A RTE, S.A. é uma empresa portuguesa especializada no fabrico e montagem de bicicletas, sediada em Vila Nova de Gaia. Fundada em 1983, a empresa possui mais de quatro décadas de experiência e é reconhecida nacional e internacionalmente pela sua excelência técnica, inovação tecnológica e pela qualidade dos seus produtos.

Atualmente, a RTE possui duas unidades fabris estrategicamente localizadas: uma em Portugal e outra na Polónia, empregando no total mais de 800 colaboradores. A capacidade produtiva da empresa ultrapassa 1 milhão de bicicletas por ano, destacando-se como um dos maiores fabricantes europeus neste setor.

A empresa tem vindo a apostar fortemente na sustentabilidade, promovendo práticas ambientalmente responsáveis através da otimização dos seus processos produtivos, gestão eficiente dos recursos e implementação de medidas que minimizam o impacto ambiental das suas operações. Esta postura é demonstrada através da incorporação de tecnologias avançadas nas linhas de montagem e de um esforço constante na redução dos desperdícios e do consumo energético.

## Introdução



*Figura 1 RTE, SA Unidade Fabril em Portugal*

## 2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo consiste na revisão da literatura e abrange os conceitos e os métodos necessários para compreender esta pesquisa. A revisão é dividida em três temas principais: a sustentabilidade em processos industriais, MCDA e integração da MCDA com a sustentabilidade. Cada uma destas temáticas são discutidas em detalhe, de forma a definir uma base teórica e a contextualizar o enquadramento metodológico da investigação.

A secção Sustentabilidade em Processos Industriais aborda os conceitos fundamentais da sustentabilidade e a sua aplicação em contexto real no meio industrial. Mais concretamente, este ponto começa com a análise de quais são os princípios e definições fundamentais da sustentabilidade. De seguida, é feita uma descrição dos indicadores de sustentabilidade que servem como ferramentas a ser utilizadas no processo de avaliação do nível de sustentabilidade dos processos industriais. Para além disso, são discutidos os desafios mais críticos encontrados na implementação de práticas sustentáveis em processos industriais. Por fim, são analisadas quais as práticas e tecnologias utilizadas para ajudar a tornar os processos industriais mais sustentáveis, como o foco nas estratégias inovadoras que facilitam a transição para tornar os processos mais sustentáveis.

A secção sobre a MCDA, descreve métodos para análise e seleção de inúmeras alternativas com base em diversos critérios. Esta parte descreve as etapas da MCDA e fornece uma visão geral dos passos metodológicos necessários para a sua aplicação. Depois, são descritos os principais métodos MCDA e realizada uma comparação entre eles. Esta etapa é concluída com uma breve análise dos métodos MCDA híbridos, que combinam diferentes técnicas para enfrentar a complexidade dos processos de tomada de decisão.

Por fim, a secção sobre a integração da MCDA na sustentabilidade baseia-se na relação entre a análise multicritério e o incentivo a práticas sustentáveis. São analisados os fundamentos da integração da MCDA com a sustentabilidade, seguindo-se a seleção dos critérios e a discussão dos parâmetros fundamentais para fazer uma avaliação da sustentabilidade. Para além disso, esta fase aborda os desafios e limitações que surgem na integração da MCDA com as questões de sustentabilidade.

Com esta estrutura é possível ter uma visão geral dos tópicos abordados, onde é relacionado a teoria da sustentabilidade com as metodologias de decisão multicritério na sua aplicação prática nos processos industriais.

## 2.1. Sustentabilidade em Processos Industriais

A sustentabilidade tornou-se um fator estratégico nas operações industriais impulsionada tanto pelas pressões do mercado para práticas mais responsáveis, como por requisitos regulamentares. Neste contexto, tem como objetivo equilibrar os três pilares fundamentais, ambiental, económico e social (Figura 2), assegurando assim a satisfação das necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias exigências, (Dyllick & Hockerts, 2002).

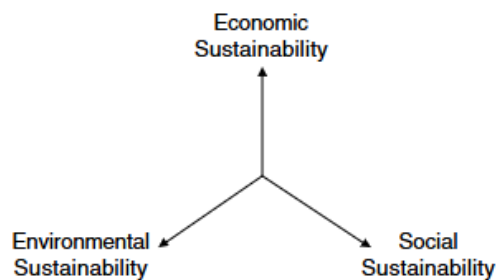


Figura 2- As três dimensões da sustentabilidade (Adaptado de Dyllick & Hockerts, 2002)

O sector industrial desempenha um papel significativo na economia global, mas é também responsável por uma parte considerável do consumo de recursos naturais e das emissões poluentes, (UNEP, 2019). Por consequência, é importante que as empresas adotem abordagens integradas para reduzir os impactos negativos ao longo do ciclo de vida dos seus produtos e processos. Tecnologias inovadoras, como a utilização de fontes de energia renováveis, técnicas de reciclagem e métodos avançados de tratamento de resíduos, são frequentemente aplicadas para melhorar a sustentabilidade dos processos industriais, (Garza-Reyes, 2015).

Para além dos aspetos ambientais, a sustentabilidade industrial implica também a implementação de práticas que assegurem a viabilidade económica das operações e tenham em conta os impactos sociais, como a segurança no local de trabalho e os benefícios para as comunidades locais, (Y. Wang & Yang, 2021). Para tal, os indicadores de sustentabilidade são ferramentas essenciais que ajudam a medir o desempenho face aos objetivos estratégicos e permitem a avaliação do progresso ao longo do tempo. Estes indicadores podem abranger uma vasta gama de aspetos, desde a utilização eficiente de materiais até à redução das emissões e à melhoria das condições de trabalho, (Singh *et al.*, 2012).

Ao mesmo tempo, os desafios da implementação de práticas sustentáveis nos processos industriais são consideráveis. Barreiras económicas, como os custos de investimento inicial em tecnologias mais limpas, e obstáculos organizacionais, como a resistência à mudança, podem dificultar a adoção de práticas sustentáveis, (Klewitz & Hansen, 2014). Por conseguinte, é essencial que as empresas desenvolvam estratégias integradas e multidimensionais para ultrapassar estes desafios e garantir que as suas operações estão alinhadas com os princípios da sustentabilidade.

### 2.1.1. Conceitos Fundamentais da Sustentabilidade

A sustentabilidade surgiu como um enquadramento fundamental para enfrentar os desafios colocados pela degradação ambiental, a desigualdade social e a instabilidade económica. O conceito de sustentabilidade é multidimensional e tem evoluído ao longo do tempo, refletindo a crescente consciencialização na interligação dos sistemas ecológicos, económicos e sociais, (Oliveira Neto *et al.*, 2018).

Historicamente, a sustentabilidade ganhou ênfase nas décadas de 1980 e 1990, culminando em várias iniciativas globais destinadas a promover o desenvolvimento sustentável, (Oliveira Neto *et al.*, 2018). O Relatório Brundtland de 1987 definiu o desenvolvimento sustentável como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades”, (World Commission on Environment and Development, 1987). Esta definição sublinha a necessidade de integrar a saúde ambiental, a viabilidade económica e a equidade social, especialmente em contextos industriais em que o consumo de recursos e a produção de resíduos podem ter impactos profundos, (World Commission on Environment and Development, 1987).

Os três pilares da sustentabilidade - económico, ambiental e social - constituem um quadro fundamental para compreender a forma como estas dimensões interagem nos processos industriais:

- **Pilar Económico:** O aspeto económico centra-se na utilização eficiente dos recursos, na relação custo-eficácia e na rentabilidade a longo prazo, incentivando as indústrias a adotar práticas que melhorem o seu desempenho financeiro, minimizando o impacto ambiental, (Epstein *et al.*, 2017);
- **Pilar Ambiental:** O pilar ambiental enfatiza a necessidade de proteger os recursos naturais e os ecossistemas, defendendo práticas que reduzam a poluição, conservem a energia e promovam a biodiversidade, (Geissdoerfer *et al.*, 2017);
- **Pilar Social:** Por último, a dimensão social aborda questões relacionadas com os direitos humanos, as práticas laborais, o envolvimento da comunidade e o bem-estar geral da sociedade, destacando a importância de um tratamento justo e equitativo para todas as partes interessadas envolvidas nas operações industriais, (Epstein *et al.*, 2017).

A compreensão destes três pilares e das suas inter-relações é crucial para o desenvolvimento de estratégias de sustentabilidade abrangentes nos processos industriais. Por exemplo, as iniciativas destinadas a reduzir os resíduos não só beneficiam o ambiente, como também podem conduzir a poupanças de custos e a melhores relações com a comunidade. À medida que as indústrias se esforçam por alcançar a sustentabilidade, devem reconhecer que alcançar o equilíbrio entre estes pilares é essencial para o sucesso e a resiliência a longo prazo, (Oliveira Neto *et al.*, 2018).

### 2.1.2. Indicadores de Sustentabilidade

Para avaliar o desempenho ambiental, económico e social dos processos industriais, são utilizados os indicadores de sustentabilidade que fornecem dados quantificáveis que orientam a tomada de decisão, identificam áreas críticas para melhoria e alinham operações industriais com os princípios de sustentabilidade. Estes indicadores permitem às indústrias avaliar o seu progresso em direção aos objetivos de sustentabilidade, fornecendo referências claras em vários domínios, (Singh *et al.*, 2012).

Os indicadores de sustentabilidade são normalmente categorizados em três dimensões principais: ambiental, económica e social. Cada dimensão aborda aspetos específicos da sustentabilidade e é essencial para se obter uma compreensão holística do impacto de uma operação industrial.

- **Indicadores Ambientais:**

Os indicadores ambientais são fundamentais para avaliar o impacto das atividades industriais nos ecossistemas e recursos naturais. Estes indicadores abrangem vários aspetos, como a utilização de energia, a gestão de resíduos, o consumo de água e as emissões de gases com efeito de estufa (GEE). O conceito de produção sustentável realça processos não poluentes, a conservação de recursos e ambientes saudáveis para as comunidades e os trabalhadores. As métricas ambientais, como a utilização de água por unidade de produção ou as emissões de GEE, oferecem uma visão prática do desempenho ecológico das indústrias, promovendo melhorias no sentido da sustentabilidade. A integração destes indicadores em quadros operacionais permite às organizações medir eficazmente o seu impacto e alinhar as suas estratégias com objetivos ambientais mais amplos, (Veleva & Ellenbecker, 2001).

- **Indicadores Económicos:**

Os indicadores económicos são fundamentais para avaliar o desempenho financeiro e a eficiência das operações industriais, especialmente no contexto do crescimento sustentável. Estes indicadores são por exemplo custos operacionais, o retorno do investimento (ROI), a produtividade e o valor económico agregado. Os indicadores económicos desempenham um papel fundamental no equilíbrio entre a rentabilidade e as considerações ambientais e sociais, garantindo a resiliência a longo prazo das atividades industriais, (Azapagic & Perdan, 2000).

Os indicadores económicos também se estendem ao investimento em capital humano, abrangendo a saúde, a segurança e a formação dos recursos humanos. Estes fatores não só melhoram a produtividade organizacional, como também contribuem para benefícios sociais mais amplos, reforçando a dimensão social da sustentabilidade. As indústrias que integram estes indicadores nos seus processos de tomada de decisão podem alinhar eficazmente o desempenho financeiro com as prioridades do desenvolvimento sustentável, (Azapagic & Perdan, 2000).

- **Indicadores Sociais:**

Os indicadores sociais medem o impacto das atividades industriais no bem-estar e no desenvolvimento da sociedade. Uma avaliação abrangente tem em conta fatores internos e externos. A nível interno, indicadores como a estabilidade do emprego, as práticas de saúde e segurança e o desenvolvimento dos trabalhadores avaliam a forma como as indústrias dão prioridade ao bem-estar dos seus colaboradores. Por exemplo, a garantia da equidade de género e racial, bem como a oferta de programas de formação, refletem o empenho de uma empresa na inclusão e nas oportunidades de progressão na carreira, (Labuschagne *et al.*, 2005).

A nível externo, os indicadores sociais centram-se na comunidade e no impacto social mais abrangente. São fundamentais indicadores como o envolvimento das partes interessadas, o capital comunitário e as contribuições para a estabilidade económica regional. Estes indicadores avaliam a forma como as indústrias interagem com as comunidades locais, incluindo os esforços para melhorar as infraestruturas, criar oportunidades de emprego e promover a confiança através de uma comunicação transparente. Estes esforços não só reforçam as relações sociais, como também contribuem para a resiliência das empresas a longo prazo, (Labuschagne *et al.*, 2005).

A integração de indicadores ambientais, económicos e sociais em estruturas definidas garante o alinhamento com os objetivos de sustentabilidade. Estruturas como a *Global Reporting Initiative* (GRI) (Figura 3), a ISO 14031 e os *Sustainable Development Goals* (SDGs) (*Sustainable Development Goals | United Nations Development Programme, 2024*) fornecem métricas e metodologias padronizadas para avaliar a sustentabilidade. A GRI, por exemplo, enfatiza a comunicação consistente dos impactos, enquanto a ISO 14031 se concentra na avaliação do desempenho ambiental. Estes quadros promovem a comparabilidade e a responsabilização, permitindo que as indústrias racionalizem as avaliações de sustentabilidade e alinhem as suas atividades com as prioridades globais, (Veleva & Ellenbecker, 2001).

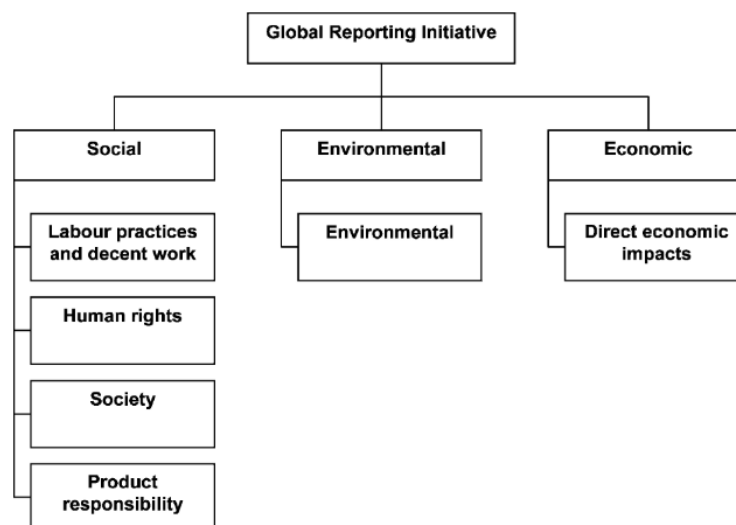


Figura 3 A estrutura hierárquica da Global Reporting Initiative (GRI), (Adaptado do (Labuschagne *et al.*, 2005)

Os indicadores de sustentabilidade são vitais para avaliar as dimensões ambientais, económicas e sociais das operações industriais. Ao fornecerem dados mensuráveis, estes indicadores permitem às indústrias adotar práticas sustentáveis, aumentar a transparência e equilibrar objetivos concorrentes. À medida que evoluem as tecnologias emergentes, como a Inteligência Artificial (IA) e *Big Data*, os indicadores de sustentabilidade estão preparados para se tornarem ferramentas ainda mais eficazes para promover o desenvolvimento sustentável. Por exemplo, a IA e o *Big Data* podem processar grandes quantidades de informação, permitindo avaliações de sustentabilidade mais precisas e atempadas, o que facilita a tomada de decisões informadas e o planeamento estratégico para atingir os objetivos de sustentabilidade, (Tripathi *et al.*, 2024).

### **2.1.3. Desafios para a Sustentabilidade em Processos Industriais**

Alcançar a sustentabilidade nos processos industriais é um desafio complexo que abrange dimensões ambientais, económicas, sociais, tecnológicas e regulamentares. A correta implementação das estratégias de sustentabilidade requer frequentemente um equilíbrio entre as partes interessadas, o cumprimento da regulamentação e as restrições económicas. Garantir a eficiência dos recursos, a gestão de resíduos e a redução de emissões são algumas das complexidades que as indústrias têm de enfrentar enquanto mantêm a rentabilidade e a competitividade. Este ato de equilíbrio torna-se ainda mais difícil numa economia globalizada, em que as normas, as expectativas e as oportunidades variam de região para região, (Epstein *et al.*, 2017).

Para compreender estes desafios, é essencial explorar as dificuldades específicas enfrentadas pelas indústrias em cada dimensão da sustentabilidade. Desde a degradação ambiental até à garantia da viabilidade económica e da equidade social, as indústrias enfrentam exigências interligadas e frequentemente contraditórias. As barreiras tecnológicas e operacionais complicam ainda mais a transição, enquanto os quadros regulamentares acrescentam uma camada adicional de complexidade, (Epstein *et al.*, 2017). As secções seguintes descrevem estes desafios com mais pormenor, realçando o complexo equilíbrio necessário para fazer avançar as práticas sustentáveis.

- **Desafios Ambientais**

Os processos industriais contribuem significativamente para a degradação ambiental, através de atividades como as emissões de CO<sub>2</sub> e de GEE, a desflorestação, a contaminação da água e a perda de biodiversidade. Estes impactos resultam da utilização ineficiente de recursos, da dependência de combustíveis fósseis e de práticas inadequadas de gestão de resíduos. Apesar dos avanços nas tecnologias mais limpas, as indústrias enfrentam barreiras consideráveis, nomeadamente os elevados custos de implementação e a falta de mão de obra qualificada para operar estes sistemas. Além disso, o cumprimento de regulamentos ambientais cada vez mais rigorosos e a manutenção da capacidade de produção constituem um desafio persistente. Isto é particularmente evidente na indústria mineira, onde as práticas de extração de recursos exacerbam a perturbação ecológica e as alterações climáticas, (Marimuthu *et al.*, 2021).

- **Desafios Económicos:**

A sustentabilidade económica dos processos industriais exige um equilíbrio delicado entre a gestão de custos, a eficiência operacional e o investimento a longo prazo em práticas sustentáveis. A transição para tecnologias mais ecológicas, embora vital para reduzir a pegada ambiental, implica frequentemente custos iniciais significativos, que podem ser extremamente onerosos, especialmente para as pequenas e médias empresas. Além disso, a disponibilidade oscilante de recursos e a volatilidade do mercado acrescentam camadas de complexidade, tornando a manutenção da rentabilidade um desafio permanente. A análise do custo do ciclo de vida e outros quadros de tomada de decisões económicas ajudam as indústrias a avaliar os compromissos financeiros e a dar prioridade aos investimentos em tecnologias mais limpas. No entanto, desafios como a escassez de conhecimentos especializados e o capital inicial necessário para a implementação impedem uma adoção generalizada. A integração de práticas ecológicas e *Lean* destaca a importância de reduzir os resíduos e otimizar a utilização dos recursos como vias para a sustentabilidade económica, (Elemure *et al.*, 2023).

- **Desafios Sociais:**

A sustentabilidade social nos processos industriais enfrenta desafios tanto a nível interno, como a garantia de salários justos, a segurança no local de trabalho e o desenvolvimento de competências, como a nível externo, incluindo a promoção da confiança com as comunidades locais e a resolução de impactos sociais, como a deslocação e a preservação cultural. As indústrias enfrentam frequentemente o desafio de alinhar as iniciativas de responsabilidade social das empresas com objetivos de sustentabilidade mais amplos, o que limita a sua eficácia a longo prazo. Além disso, a avaliação dos resultados dos esforços sociais, como a confiança da comunidade e o bem-estar da força de trabalho, é complexa e nem sempre quantificável. Para ultrapassar estes desafios, é necessário um envolvimento transparente das partes interessadas, a adesão a normas sociais internacionais e a integração de considerações sociais nas principais estratégias empresariais para criar um valor social e operacional duradouro, (Labuschagne *et al.*, 2005).

- **Desafios Tecnológicos e Operacionais:**

As indústrias enfrentam desafios importantes na adoção de tecnologias sustentáveis, devido a uma combinação de custos de implementação elevados, acesso limitado a sistemas tecnológicos avançados e conhecimentos insuficientes para os operar eficazmente. A transição para práticas sustentáveis, como a economia circular, os métodos de produção energeticamente eficientes e a integração das energias renováveis, exige não só investimentos tecnológicos significativos, mas também uma reestruturação dos atuais processos operacionais. Estas transições implicam frequentemente riscos no que diz respeito à escalabilidade e fiabilidade dos novos sistemas, o que contribui para a sua adoção ser ainda mais desencorajada. Além disso, a avaliação eficaz da sustentabilidade depende de sistemas robustos de recolha de

dados e monitorização, tecnologicamente exigentes e com elevado consumo de recursos, o que os torna particularmente inacessíveis para as pequenas e médias empresas. A complexidade da gestão dos indicadores de sustentabilidade em todas as cadeias de abastecimento acrescenta um outro nível de dificuldade. Para enfrentar estes desafios, são necessários investimentos estratégicos em educação, inovação e apoio financeiro, de modo a permitir que as indústrias alinhem os seus processos operacionais com os objetivos de sustentabilidade a longo prazo, (Korhonen *et al.*, 2018).

- **Desafios Regulamentares e Políticos:**

As indústrias enfrentam desafios consideráveis para se adaptarem aos requisitos regulamentares e políticos destinados a promover a sustentabilidade, especialmente devido às inconsistências entre as normas locais, nacionais e internacionais. Estas variações criam complexidades de conformidade significativas e custos adicionais, especialmente para as empresas multinacionais que operam em vários países. A falta de políticas globais harmonizadas prejudica os esforços de racionalização das iniciativas de sustentabilidade e acrescenta incerteza ao planeamento estratégico a longo prazo. Por exemplo, a flexibilidade das políticas climáticas, como o comércio de emissões e os programas de redução voluntária, oferece opções às indústrias, mas também exige uma gestão e adaptação aos contextos locais muito específicas. Além disso, os quadros regulamentares lutam frequentemente para equilibrar a flexibilidade com a aplicabilidade, deixando as empresas a navegar por requisitos contraditórios ou sobrepostos. Para os setores com utilização intensiva de energia, uma regulamentação mais rigorosa pode impor custos excessivos, dificultando ainda mais a transição para práticas sustentáveis. Incentivos como subsídios para tecnologias de energia renovável ou benefícios fiscais para operações amigas do ambiente são fundamentais para superar estas barreiras. Ao fornecer orientações mais claras e ao promover um ambiente regulamentar coerente, as indústrias podem estar mais bem equipadas para cumprir os objetivos de sustentabilidade, mantendo a competitividade, (Kolk & Pinkse, 2005).

Combinar o planeamento estratégico, os avanços tecnológicos e uma cultura de colaboração vai ajudar a enfrentar os complexos desafios encontrados na combinação da sustentabilidade nos processos industriais. Dado que as indústrias pretendem equilibrar as prioridades ambientais, económicas e sociais, a adoção de estruturas organizacionais como os Sistemas de Gestão Ambiental Sustentável (SGAS) pode ajudar significativamente neste processo. O SGAS é um sistema que integra critérios ambientais, sociais e económicos no processo de tomada de decisões, utilizando ferramentas como a MCDA que permite às empresas identificar, classificar e implementar as soluções mais eficazes, adaptadas a objetivos e restrições específicos de sustentabilidade. A integração destas ferramentas não só assegura a conformidade regulamentar, como também alinha as práticas operacionais com objetivos de sustentabilidade mais amplos, promovendo a resiliência e a competitividade a longo prazo, (Khalili & Duecker, 2013).

#### 2.1.4. Práticas e Tecnologias para Melhorar a Sustentabilidade

A procura de sustentabilidade nos processos industriais levou à adoção de práticas e tecnologias inovadoras destinadas a reduzir o impacto ambiental, otimizar a utilização de recursos e reforçar a responsabilidade social. Estas abordagens abordam as dimensões ambientais, económicas e sociais da sustentabilidade, contribuindo simultaneamente para a resiliência e competitividade a longo prazo das indústrias. Desde os princípios da economia circular até aos sistemas de monitorização avançados, as indústrias estão cada vez mais a alinhar as suas operações com os objetivos de sustentabilidade, através de estratégias integradas e colaboração, (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

- **Economia Circular**

A estrutura da economia circular realça a eficiência dos recursos e a minimização dos resíduos. Práticas como a reciclagem em circuito fechado e a remanufatura são fundamentais para reduzir o consumo de recursos e a degradação ambiental. A implementação da simbiose industrial, em que os resíduos ou subprodutos de um processo são utilizados como matérias-primas para outro, reduz significativamente a produção de resíduos e promove a otimização dos recursos, (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

*Tabela 1 Principais práticas da economia circular, (Geissdoerfer et al., 2017)*

Prática	Conceito	Benefícios
<b>Reciclagem em Circuito Fechado</b>	Reutilização de materiais num ciclo de produção.	Redução de resíduos, poupança de custos.
<b>Remanufatura</b>	Reconstrução de produtos usados para que fiquem como novos.	Prolongamento da vida útil do produto
<b>Simbiose Industrial</b>	Partilha de recursos entre setores.	Seleção de fornecedores e gestão de recursos.

- **Eficiência Energética e Tecnologias nas Energias Renováveis**

As tecnologias de eficiência energética, como os sistemas avançados de recuperação de calor, os motores energeticamente eficientes e as redes inteligentes, ajudam as indústrias a reduzir o consumo de energia sem afetar a produtividade. Além disso, as fontes de energia renováveis, como a energia solar, a eólica e a biomassa, reduzem as emissões de gases com efeito de estufa. Por exemplo, os sistemas de dessalinização alimentados a energia solar e a produção de energia a partir da biomassa são cada vez mais adotados para substituir os processos tradicionais que consomem muita energia, (Energy Agency, 2021).

Tabela 2 Eficiência energética e tecnologias para as energias renováveis, (Energy Agency, 2021)

Prática	Conceito	Benefícios
<b>Sistemas Avançados de Recuperação de Calor</b>	Capta o calor residual para reutilização.	Reduz perdas de energia.
<b>Motores Energeticamente Eficientes</b>	Minimiza o consumo de energia na produção.	Custos de energia reduzidos.
<b>Dessalinização por energia solar</b>	Utilização de energia solar para a purificação da água.	Reduz a dependência dos combustíveis fósseis.

- **Materiais e Processos Ecológicos**

A utilização de materiais e processos amigos do ambiente é vital para o avanço de práticas industriais sustentáveis. Os biocompósitos, uma inovação notável, combinam fibras naturais, como o linho, juta e o cânhamo, com biopolímeros renováveis, como o plástico de amido e os plásticos à base de soja. Estes materiais não só apresentam propriedades mecânicas comparáveis às dos compósitos tradicionais, como também reduzem a dependência de produtos derivados do petróleo e aumentam a biodegradabilidade. Por exemplo, os biocompósitos reforçados com fibras naturais estão a ser cada vez mais utilizados nas indústrias automóvel e da construção, substituindo os compósitos reforçados com vidro, (Mohanty *et al.*, 2002). Além disso, os avanços em processos de produção mais limpos, como a integração de tecnologias de tingimento sem água e métodos de fabrico sem solventes, reduzem significativamente a utilização de água e de produtos químicos, contribuindo para uma menor pegada ambiental, (Kant & Kant, 2011).

Tabela 3 Exemplos de materiais e processos ecológicos, (Kant & Kant, 2011; Mohanty *et al.*, 2002)

Materiais / Processos	Aplicação	Benefícios
<b>Bio-compósitos (fibras naturais + polímeros renováveis)</b>	Automotivo e construção.	Reduz a dependência de produtos derivados do petróleo e melhora a biodegradabilidade.
<b>Plásticos biodegradáveis</b>	Embalagens	Minimiza resíduos de longo prazo
<b>Tecnologias de tingimento sem água</b>	Indústria têxtil	Conserva recursos hídricos
<b>Métodos de fabricação sem solventes</b>	Indústria química	Reduz a poluição química

A adoção destas práticas e tecnologias inovadoras reflete um empenho crescente das indústrias em integrar a sustentabilidade nas suas operações. O investimento contínuo em investigação e desenvolvimento, combinado com esforços de colaboração entre as partes interessadas, garante que estas soluções se tornem parte integrante da concretização dos objetivos de sustentabilidade.

## 2.2. Apoio à Decisão Multicritério - MCDA

A MCDA é um quadro metodológico concebido para abordar cenários complexos de tomada de decisão que envolvem múltiplos critérios. O seu principal objetivo é ajudar os decisores a avaliar e priorizar alternativas quando várias dimensões devem ser consideradas simultaneamente, conduzindo a escolhas bem fundamentadas e informadas, (Khalili & Duecker, 2013). Esta abordagem é especialmente valiosa em situações em que as decisões não podem ser avaliadas através de uma única perspetiva, uma vez que permite uma análise mais abrangente ao considerar critérios quantitativos e qualitativos, (Dodgson *et al.*, 2009).

Os métodos MCDA mais utilizados incorporam um sistema de ponderação que descreve a importância relativa de cada critério quando comparado com outros, (Paradowski *et al.*, 2021). O MCDA foi concebido para lidar com critérios qualitativos e quantitativos, o que o torna versátil para uma vasta gama de aplicações, (Dodgson *et al.*, 2009). Além disso, a análise de risco baseada em MCDA permite a identificação de critérios relacionados às vulnerabilidades do sistema. Essa abordagem sintetiza as informações para facilitar a comparação, a priorização ou a seleção de estratégias alternativas de mitigação, (Keisler & Linkov, 2021).

As metodologias MCDA desempenham um papel fundamental na tomada de decisões complexas, nomeadamente quando os critérios são contraditórios ou difíceis de quantificar, (Khalili & Duecker, 2013). Por exemplo, nas indústrias que se esforçam por adotar práticas sustentáveis, o MCDA fornece um quadro para integrar aspetos ambientais, económicos e sociais na tomada de decisões, e assim facilita escolhas equilibradas e conscientes, (Ouria *et al.*, 2023). A importância do MCDA reside na sua capacidade de sistematizar o processo de tomada de decisão, garantir que diversas perspetivas sejam consideradas, reduzir a dependência de julgamentos isolados e aumentar a transparência e a eficácia das escolhas feitas, (Dodgson *et al.*, 2009).

### 2.2.1. Etapas da MCDA

A metodologia MCDA envolve uma sequência de passos fundamentais que estruturam e orientam o processo de análise e escolha entre alternativas, particularmente em contextos complexos como os cuidados de saúde. De acordo com o trabalho de Thokala *et al.* (2016), estas etapas visam assegurar uma avaliação exaustiva e transparente que tenha em conta múltiplos fatores relevantes para a tomada de decisão.

1. **Definição do Problema de Decisão:** Esta etapa inicial consiste em clarificar os objetivos, o tipo de decisão a tomar, as alternativas disponíveis e as partes interessadas envolvidas. Nesta fase, é essencial estabelecer o resultado desejado, fornecer uma base

sólida para as etapas subsequentes e alinhar todas as partes em torno de um entendimento comum do problema;

2. **Seleção e Estruturação dos Critérios:** Nesta fase, são identificados e estruturados os critérios de avaliação das alternativas. A seleção dos critérios deve ter o cuidado de englobar todos os aspetos relevantes para a decisão, incluindo elementos quantitativos e qualitativos que possam influenciar o resultado;
3. **Medir o Desempenho das Alternativas:** Esta etapa envolve a recolha de dados sobre o desempenho de cada alternativa em relação aos critérios estabelecidos, que são depois resumidos numa matriz de desempenho. Esta matriz fornece uma visão comparativa clara das alternativas, com destaque para os seus pontos fortes e fracos em cada critério;
4. **Pontuação das Alternativas:** A fim de refletir as preferências das partes interessadas, são atribuídas pontuações para indicar a perceção de cada alternativa em relação a cada critério. Estas pontuações são essenciais para traduzir as preferências subjetivas em valores que possam ser analisados objetivamente;
5. **Ponderação dos Critérios:** Nesta fase, são estabelecidas as preferências das partes interessadas entre os vários critérios, com atribuição de pesos que refletem a sua importância relativa. A ponderação é crucial para garantir que o processo de decisão considere o impacto relativo de cada critério, orientando a escolha final com base nos valores e prioridades dos decisores;
6. **Cálculo das Pontuações Agregadas:** Com as pontuações e os pesos definidos, é calculado um “valor total” para cada alternativa. Este valor agregado integra as pontuações dos critérios e os respetivos pesos, o que permite classificar as alternativas de acordo com a sua adequação ao problema em causa;
7. **Tratamento da Incerteza:** Como as decisões geralmente envolvem incertezas, esta fase permite análises de sensibilidade e robustez para avaliar como as alterações nos pesos ou pontuações podem afetar o resultado. A análise da incerteza contribui para uma melhor compreensão da robustez das escolhas efetuadas e ajuda a identificar potenciais riscos associados a decisões menos estáveis;
8. **Análise dos Resultados:** A fase final envolve a interpretação e a comunicação dos resultados da MCDA, incluindo uma análise de incerteza, para apoiar a tomada de decisões. Esta fase é crucial para garantir que os decisores tenham uma compreensão abrangente dos dados e possam justificar as suas escolhas com base numa análise estruturada e transparente.

Estas etapas estruturadas da metodologia MCDA proporcionam um processo rigoroso e sistemático que facilita a tomada de decisões em cenários complexos e multidimensionais, garantindo que as múltiplas perspetivas são consideradas de forma equilibrada e transparente, (Thokala *et al.*, 2016).

### 2.2.2. Principais Métodos de MCDA

A MCDA engloba uma série de metodologias que ajudam os decisores a avaliar e escolher entre alternativas complexas com critérios múltiplos e muitas vezes contraditórios, (Khalili & Duecker, 2013). Cada método oferece uma abordagem única para estruturar, ponderar e classificar essas alternativas, que permite aplicações personalizadas em diversos domínios, como a gestão ambiental, os cuidados de saúde, a logística e o desenvolvimento sustentável, (Velasquez & Hester, 2013). Entre os métodos MCDA mais frequentemente utilizados estão o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), o *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), o *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE), o *Elimination and Choice Translating Reality* (ELECTRE) e o *Multi-Criteria Optimization and Compromise Solution* (VIKOR), (Velasquez & Thomas Hester, 2013). Cada um destes métodos tem pontos fortes adequados a diferentes tipos de cenários de tomada de decisão.

- **AHP**

Desenvolvido por Thomas Saaty na década de 1970, o AHP é um método popular que estrutura os problemas de decisão numa hierarquia de critérios e subcritérios, permitindo aos decisores efetuar comparações par-a-par entre critérios. Estas comparações baseiam-se numa escala de importância relativa, o que permite ao AHP incorporar dados quantitativos e qualitativos. Devido à sua flexibilidade e capacidade de decompor problemas complexos, o AHP é amplamente aplicado em áreas como a seleção de fornecedores, a avaliação de riscos e o planeamento urbano. Esta abordagem fornece um quadro sistemático para a classificação de alternativas, assegurando que a importância relativa de cada critério é considerada, (Ozdemir & Saaty, 2006; Subramanian & Ramanathan, 2012).

- **TOPSIS**

Introduzido por Hwang e Yoon em 1981, este método baseia-se na ideia de que a melhor alternativa deve ter a menor distância possível de uma solução ideal (o melhor valor em todos os critérios) e a maior distância possível da solução ideal negativa (o pior valor em todos os critérios). Este método é muito adequado para aplicações que requeiram a identificação de uma alternativa que se aproxime o mais possível das condições ideais, como a priorização de projetos ou a seleção de investimentos. A simplicidade computacional do TOPSIS e os resultados claros da classificação, fazem deste um método popular em contextos industriais e de gestão, (Pandey *et al.*, 2023; Y. J. Wang & Lee, 2007).

- **PROMETHEE**

O PROMETHEE, desenvolvido por Brans em 1982, baseia-se em comparações par-a-par e utiliza funções de preferência para captar a intensidade da preferência entre alternativas. A flexibilidade do método permite a sua aplicação em diversos contextos de tomada de decisão, particularmente na gestão ambiental e no planeamento urbano, em que os decisores têm de avaliar critérios complexos e frequentemente contraditórios. O PROMETHEE inclui variantes, como o PROMETHEE I e II, que permitem

classificações parciais e completas das alternativas, o que facilita a definição de prioridades em cenários complexos, (Macharis *et al.*, 2004; Matos *et al.*, 2024).

- **ELECTRE**

O método ELECTRE, desenvolvido por Bernard Roy na década de 1960, faz parte de uma família de métodos de sobre classificação concebidos para resolver problemas complexos de tomada de decisão com critérios múltiplos e frequentemente contraditórios. Este método baseia-se no conceito de *outranking*, onde as alternativas são comparadas em relação ao seu desempenho nos vários critérios, estabelecendo assim uma hierarquia de preferências. O ELECTRE evoluiu para várias versões, nomeadamente o ELECTRE I, II, III e IV, cada uma adequada a diferentes tipos de problemas de decisão. A sua robustez no tratamento da incerteza e de critérios contraditórios torna-o particularmente valioso em domínios como o planeamento de infraestruturas e a gestão ambiental. Ao permitir classificações parciais ou completas de alternativas, o ELECTRE proporciona aos responsáveis pela tomada de decisão a flexibilidade necessária para avaliar e hierarquizar opções de forma eficaz em cenários complexos, (Govindan & Jepsen, 2016; Taherdoost & Madanchian, 2023).

- **VIKOR**

O método VIKOR, desenvolvido por Serafim Opricovic em 1998, é uma metodologia MCDA baseada em compromissos que tem por objetivo identificar uma solução que se aproxime o mais possível de um compromisso ideal" entre critérios em conflito. Esta abordagem é particularmente valiosa em cenários em que os decisores procuram equilibrar critérios concorrentes, tornando-a adequada para aplicações como a resolução de conflitos e a formulação de políticas públicas. A capacidade do VIKOR para integrar e equilibrar vários interesses torna-o uma ferramenta eficaz para alcançar consensos em processos de decisão complexos, (Gupta *et al.*, 2023; Opricovic & Tzeng, 2004).

### **2.2.3. Comparação entre os Principais Métodos de MCDA**

A MCDA oferece um conjunto diversificado de metodologias, cada uma com características específicas que as tornam adequadas a diferentes contextos de tomada de decisão. Os métodos amplamente utilizados, como o AHP, TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE e VIKOR, apresentam vantagens, limitações e requisitos metodológicos únicos que influenciam a sua aplicação. Por conseguinte, uma comparação sistemática entre estes métodos é essencial para compreender as suas diferenças e identificar a abordagem mais adequada para um problema de decisão específico, (Zavadskas *et al.*, 2014).

Estes métodos diferem na sua capacidade de lidar com critérios qualitativos e quantitativos, requisitos de entrada (por exemplo, critérios de ponderação ou definição de funções de preferência) e complexidade computacional. Além disso, o contexto em que são aplicados influencia a escolha do método, sendo que fatores como a sensibilidade à incerteza ou a facilidade de interpretação dos resultados são frequentemente decisivos, (Velasquez & Thomas

Hester, 2013). Na Tabela 4 é apresentado um quadro comparativo que destaca as principais características, vantagens, limitações e aplicações típicas desses métodos.

Tabela 4 Comparação entre os principais métodos de MCDA

<b>Método</b>	<b>Principais Características</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>	<b>Aplicações Comuns</b>
<b>AHP</b>	Hierarquia de critérios; comparações par-a-par; ponderação com base na escala de importância relativa, (Ozdemir & Saaty, 2006).	Simplicidade; lida com critérios qualitativos e quantitativos; boa visualização estrutural, (Ozdemir & Saaty, 2006).	Sensível a inconsistências nas comparações; aumento de complexidade com muitos critérios, (Ozdemir & Saaty, 2006).	Planeamento urbano, gestão de projetos, (Ozdemir & Saaty, 2006).
<b>TOPSIS</b>	Baseado na proximidade da solução (Y. J. Wang & Lee, 2007) solução negativa, (Y. J. Wang & Lee, 2007).	Simplicidade computacional; resultados claros; útil para alternativas finitas, (Y. J. Wang & Lee, 2007).	Não considera preferências subjetivas explícitas; sensível à normalização, (Y. J. Wang & Lee, 2007).	Avaliação de projetos, seleção de fornecedores, (Y. J. Wang & Lee, 2007)
<b>PROMETHEE</b>	Utiliza funções de preferência para comparar alternativas; permite análise de preferências parciais, (Macharis <i>et al.</i> , 2004).	Flexível; permite análise detalhada das preferências; adequado para decisões com critérios em conflito, (Macharis <i>et al.</i> , 2004).	Requer definição de funções de preferência; complexidade aumenta com muitos critérios, (Macharis <i>et al.</i> , 2004).	Gestão ambiental, localização de instalações, (Macharis <i>et al.</i> , 2004).
<b>ELECTRE</b>	Baseado em <i>outranking</i> ; avalia a capacidade de uma alternativa superar outra em múltiplos critérios, (Govindan & Jepsen, 2016).	Robusto em cenários de incerteza; lida bem com conflitos entre critérios, (Govindan & Jepsen, 2016).	Difícil de interpretar para não (Govindan & Jepsen, 2016) itos parâmetros, (Govindan & Jepsen, 2016).	Planeamento estratégico, avaliação de viabilidade, (Govindan & Jepsen, 2016).

<b>VIKOR</b>	Método de compromisso; identifica a solução mais próxima de um compromisso ideal entre critérios conflitantes, (Opricovic & Tzeng, 2004).	Adequado para negociações e consenso; útil em decisões onde o equilíbrio é prioritário, (Opricovic & Tzeng, 2004).	Pode ser menos intuitivo; não aborda incerteza diretamente, (Opricovic & Tzeng, 2004).	Gestão de conflitos, políticas públicas, (Opricovic & Tzeng, 2004).
--------------	---	--	--	---

A escolha de um método MCDA adequado depende das características específicas do problema de decisão, da familiaridade dos decisores com as metodologias e da complexidade do cenário. Por exemplo, o AHP é frequentemente preferido pela sua simplicidade em problemas com um número limitado de critérios, enquanto métodos mais robustos como o PROMETHEE e o ELECTRE são adequados para cenários complexos com incerteza significativa, (Zavadskas *et al.*, 2014).

Esta análise comparativa fornece uma base para decisões informadas relativamente à aplicação de métodos MCDA, salientando que, em certos casos, pode ser necessária a integração ou adaptação de métodos para obter resultados ótimos.

#### 2.2.4. Métodos Híbridos em MCDA

Os métodos híbridos MCDA surgiram como uma solução robusta para resolver problemas complexos de tomada de decisão em diversos domínios, como a sustentabilidade, a gestão de recursos e o planeamento urbano. Ao combinarem diferentes técnicas de MCDA, os métodos híbridos potenciam os pontos fortes de cada abordagem, atenuando simultaneamente as suas limitações individuais. Esta integração proporciona um quadro mais abrangente para a tomada de decisões, ao permitir o tratamento de desafios multidimensionais que envolvem critérios contraditórios, incertezas e diversos conjuntos de dados, (Kumar *et al.*, 2021).

A principal fundamentação para a utilização de métodos híbridos reside na sua flexibilidade e capacidade de adaptação. A integração do AHP e do ELECTRE representa uma abordagem híbrida eficaz para lidar com cenários complexos de tomada de decisão, particularmente no contexto de operações sustentáveis. O AHP é utilizado para determinar os pesos dos critérios através de comparações entre pares, fornecendo uma estrutura hierárquica para a tomada de decisões. Estes pesos são depois aplicados no quadro ELECTRE, que se destaca na classificação e superação de alternativas, com base nos índices de concordância e discordância. Esta abordagem híbrida combina eficazmente os pontos fortes da atribuição sistemática de pesos do AHP e o tratamento robusto de critérios conflitantes do ELECTRE, tornando-a particularmente útil em avaliações relacionadas com a sustentabilidade, onde a precisão e a adaptabilidade são críticas, (Kumar *et al.*, 2021).



Figura 4 Procedimento de avaliação do método híbrido Fuzzy AHP e Fuzzy TOPSIS (Adaptado de Torfi & *et al.*, 2010)

Uma outra abordagem híbrida amplamente adotada envolve a integração do Fuzzy AHP com o Fuzzy TOPSIS. Esta combinação melhora a tomada de decisões em ambientes caracterizados pela incerteza e imprecisão. O Fuzzy AHP é utilizado para determinar os pesos relativos dos critérios de avaliação com base na opinião de peritos representada por números difusos, enquanto o Fuzzy TOPSIS classifica as alternativas considerando a sua proximidade de uma solução ideal positiva e a distância de uma solução ideal negativa. O processo de avaliação deste método híbrido é apresentado na Figura 4, que ilustra o quadro de três etapas que envolve a identificação dos critérios de seleção, a construção de uma hierarquia para a ponderação dos critérios utilizando o Fuzzy AHP e a classificação final utilizando o Fuzzy TOPSIS. Esta metodologia híbrida foi aplicada com sucesso a diversos cenários, incluindo a seleção de fornecedores, a avaliação de telemóveis e o planeamento da disposição das instalações, proporcionando soluções robustas e adaptáveis a problemas complexos de tomada de decisão, (Torfi *et al.*, 2010).

Os métodos híbridos também beneficiaram da integração de técnicas MCDA tradicionais com *Machine Learning* e outras tecnologias avançadas. Uma abordagem notável é o modelo híbrido proposto, que combina métodos MCDA, como o AHP, com algoritmos de *Machine Learning*

orientados para dados, com vista a abordar a complexidade da tomada de decisões. A componente de *Machine Learning* funciona como um mecanismo de redução da complexidade, ao selecionar ou dar prioridade aos critérios ou alternativas mais relevantes em grandes conjuntos de dados. A seguir, são aplicadas técnicas MCDA para a classificação e a tomada de decisões, garantindo a transparência e a sua compreensão. Por exemplo, são utilizadas árvores de decisão para calcular a importância das características, que é depois utilizada para gerar pesos de critérios para o AHP. Estas abordagens são particularmente eficazes na seleção de fornecedores, pois a integração destes métodos proporciona um melhor desempenho em comparação com as técnicas tradicionais de IA. O modelo híbrido tem demonstrado o seu valor em setores como o petróleo, o gás e a indústria aeroespacial, onde a escalabilidade e a transparência das decisões são fundamentais, (Abdulla & Baryannis, 2024).

Tabela 5 Exemplos de métodos híbridos comuns e respetivas aplicações

Método Híbrido	Principais Características	Aplicações Comuns	Referência
<b>AHP-ELECTRE</b>	Combina a ponderação hierárquica do AHP com a abordagem de <i>outranking</i> do ELECTRE.	Análise dos obstáculos à sustentabilidade nas cadeias de abastecimento	(Kumar <i>et al.</i> , 2021)
<b>Fuzzy AHP + Fuzzy TOPSIS</b>	Recorre à lógica Fuzzy para lidar com a imprecisão dos pesos e classifica as alternativas com base em medidas de distância.	Seleção de fornecedores	(Torfi <i>et al.</i> , 2010).
<b>MCDA + Machine Learning</b>	Integra os métodos MCDA com algoritmos de <i>Machine Learning</i> para melhorar a análise de dados e os conhecimentos preditivos.	Seleção de fornecedores e gestão de recursos.	(Abdulla & Baryannis, 2024).

Estes exemplos realçam a diversidade dos métodos híbridos e a sua capacidade de enfrentar desafios em diversos contextos de tomada de decisão. Cada método híbrido oferece vantagens únicas, adaptadas a tipos específicos de problemas, e fornece aos responsáveis pela tomada de decisão ferramentas versáteis para lidar com cenários complexos e multidimensionais.

A integração de métodos MCDA complementares melhorou significativamente o processo de tomada de decisão, oferecendo flexibilidade, solidez e capacidade de adaptação. Os exemplos apresentados na Tabela 5 demonstram a vasta gama de aplicações dos métodos híbridos, sublinhando a sua relevância na abordagem dos desafios contemporâneos em termos de

sustentabilidade, gestão industrial e desenvolvimento urbano. À medida que as abordagens híbridas continuam a evoluir, é provável que se tornem ainda mais importantes para a resolução dos problemas complexos do mundo moderno.

### 2.2.5. Estado da Arte da MCDA

Nos últimos anos, a metodologia MCDA tem registado avanços significativos, particularmente em aplicações destinadas a melhorar a sustentabilidade dos processos industriais. Os artigos destacados na Tabela 6 representam contribuições fundamentais para o domínio, selecionados pelas suas abordagens inovadoras, metodologias abrangentes e pelo seu impacto nos aspetos práticos e teóricos da MCDA. Estes artigos não só abordam desafios complexos de tomada de decisão, como também são pioneiros na integração com padrões tecnológicos e ambientais da atualidade, o que os torna especialmente pertinentes em comparação com outras contribuições que podem centrar-se em aspetos mais isolados ou teóricos da MCDA.

*Tabela 6 Descrição de trabalhos relacionados com MCDA e sustentabilidade*

<b>Autor</b>	<b>Descrição de Trabalho</b>
Ozdemir & Saaty, 2006	Este estudo explorou o impacto da incorporação do desconhecido nos processos de tomada de decisão, recorrendo ao método AHP. A investigação salientou a importância de considerar as variáveis não quantificáveis e as incertezas nos modelos de decisão, o que é crucial para abordar as complexidades e incertezas inerentes às decisões industriais sustentáveis. Esta abordagem melhora a tomada de decisões ao integrar um método estruturado para ponderar e dar prioridade a diversos fatores, incluindo os que são normalmente difíceis de quantificar.
Khalili & Duecker, 2013	Este artigo introduziu uma estrutura para SGAS, utilizando a abordagem MCDA, mais concretamente através da aplicação do método ELECTRE III. O quadro foi concebido para otimizar a gestão ambiental com base em múltiplos critérios económicos, ambientais e sociais. O estudo destacou a capacidade da estrutura SGAS em adaptar-se às necessidades específicas da indústria, facilitando a gestão eficaz dos impactos ambientais em contextos industriais. Além disso, o estudo detalhou a forma como esta abordagem sistemática ajuda as organizações a alinhar os seus planos estratégicos, comerciais e de produção com os objetivos de desenvolvimento sustentável.
Paradowski <i>et al.</i> , 2021	Esta investigação forneceu uma análise abrangente dos métodos objetivos de ponderação de critérios em sistemas de apoio à decisão, com foco na semelhança entre diferentes métodos de ponderação. O estudo demonstrou as várias abordagens e a sua eficácia em refletir a importância dos critérios com base em dados objetivos. Os métodos considerados incluem o desvio padrão, a entropia e o método <i>Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation</i> (CRITIC), entre outros. O estudo sublinhou a necessidade de selecionar o método de ponderação mais adequado para garantir a precisão e a relevância do processo de tomada de decisões em aplicações MCDA.

Thokala <i>et al.</i> , 2016	Descreve a aplicação da MCDA na tomada de decisões no domínio dos cuidados de saúde, nomeadamente a sua utilidade na avaliação das tecnologias de saúde e na afetação de recursos. O estudo descreve as várias etapas da MCDA, nomeadamente a definição do problema, a seleção dos critérios, a pontuação e a ponderação das alternativas e a agregação das pontuações numa decisão final. Este modelo ajuda a tomar decisões estruturadas e transparentes neste domínio, em que é necessário equilibrar múltiplos critérios contraditórios.
Kumar <i>et al.</i> , 2021	Este artigo aborda o desafio de integrar práticas sustentáveis com tecnologias da Indústria 4.0 nas cadeias de abastecimento. Os autores analisam as barreiras que as empresas enfrentam quando tentam implementar operações sustentáveis e eficientes, nomeadamente lacunas ao nível das competências, adaptação tecnológica e restrições financeiras. O estudo utiliza métodos MCDA, nomeadamente AHP e ELECTRE, para avaliar e priorizar essas barreiras, oferecendo orientações estratégicas para as superar. O estudo realça a necessidade de um enquadramento robusto que possa acompanhar a rápida evolução tecnológica e a crescente procura de operações sustentáveis nos mercados globais.
Abdulla & Baryannis, 2024	Este artigo propõe um novo quadro híbrido de MCDA e <i>Machine Learning</i> para a seleção de fornecedores, com foco na explicabilidade e interpretabilidade. Combina técnicas de IA baseadas em dados interpretáveis com métodos MCDA tradicionais para simplificar o processo de seleção de fornecedores, garantindo simultaneamente a transparência e a explicabilidade das decisões. O quadro é validado com base em estudos de casos reais nas indústrias do petróleo, do gás e aeroespacial, demonstrando a sua eficácia na melhoria dos processos de tomada de decisão, tirando partido tanto dos dados históricos como das técnicas MCDA.

Estes artigos salientam a importância da MCDA na promoção de práticas industriais mais sustentáveis, oferecendo informações relevantes sobre a forma como os critérios de sustentabilidade podem ser efetivamente integrados e ponderados nos modelos de decisão. Salientam também a importância de adaptar os métodos MCDA às especificidades dos processos industriais, de modo a melhorar o desempenho ambiental e económico.

### 2.3. Integração da MCDA na Sustentabilidade

Para enfrentar os desafios complexos e multidimensionais à tomada de decisões sustentáveis, é utilizada uma abordagem estratégica de integração da MCDA com a sustentabilidade. A MCDA combina métodos analíticos e participativos para avaliar alternativas com base em critérios diversos através de um quadro sistemático, estes critérios englobam aspetos ambientais, económicos e sociais. Esta integração é essencial para alinhar os objetivos empresariais com as metas de sustentabilidade, permitindo decisões mais informadas e equilibradas, (Cinelli *et al.*, 2014).

No contexto da sustentabilidade, a MCDA é amplamente aplicada para dar prioridade a ações, selecionar alternativas e avaliar o impacto de políticas ou tecnologias. Por exemplo, em processos industriais, têm sido utilizados métodos como o AHP e o ELECTRE para avaliar alternativas em termos de eficiência energética, utilização de recursos naturais e impacto

ambiental. Além disso, a MCDA permite a incorporação de perspectivas de várias partes interessadas, como gestores, governos e comunidades, garantindo uma abordagem mais inclusiva e transparente, (Kumar *et al.*, 2021).

Através da combinação da MCDA com ferramentas específicas de sustentabilidade, consegue-se otimizar ainda mais a qualidade do processo de tomada de decisão. Ferramentas como a avaliação do ciclo de vida e a pegada ecológica fornecem dados quantitativos sobre o desempenho ambiental das alternativas, já no caso da MCDA, esta facilita a análise e o equilíbrio de critérios contraditórios. Esta integração tem-se revelado eficaz na definição de estratégias para economias circulares e transições para fontes de energia renováveis, (Campos-Guzmán *et al.*, 2019).

No entanto, a integração da MCDA e da sustentabilidade também enfrenta desafios significativos, tais como a definição de critérios adequados, a abordagem de incertezas nos dados e o envolvimento de partes interessadas com diferentes pontos de vista e prioridades. Estas limitações salientam a necessidade de metodologias híbridas que combinem ferramentas qualitativas e quantitativas para obter resultados mais robustos e fidedignos, (Kumar *et al.*, 2021).

A aplicação da MCDA na sustentabilidade vai para além da simples análise de alternativas. Esta metodologia ajuda a estabelecer metas, a definir políticas e a monitorizar o progresso em direção a objetivos sustentáveis. Esta abordagem reforça o papel da MCDA como um facilitador estratégico na transição para processos e operações mais sustentáveis, promovendo a inovação e a resiliência em cenários industriais dinâmicos.

### **2.3.1. Seleção de Critérios de Sustentabilidade em MCDA**

A seleção e a ponderação dos critérios de sustentabilidade na MCDA são fundamentais para garantir a solidez e a importância dos processos de tomada de decisão. A sustentabilidade engloba as dimensões ambiental, económica e social, cada uma com critérios diversos e, muitas vezes, contraditórios que devem ser cuidadosamente identificados e estruturados. O processo de definição destes critérios exige uma compreensão abrangente do contexto e dos objetivos específicos do cenário de tomada de decisões, bem como o envolvimento das partes interessadas para garantir a inclusão e a transparência, (Singh *et al.*, 2012).

Alguns dos indicadores utilizados nos critérios ambientais são os GEE, a eficiência dos recursos e a conservação da biodiversidade, demonstrando assim a necessidade de minimizar o impacto ecológico. Os critérios económicos podem incluir os custos operacionais, ROI e os custos do ciclo de vida, com foco na viabilidade financeira e na resiliência a longo prazo. Por outro lado, o bem-estar da força de trabalho, o envolvimento da comunidade e a equidade são alguns dos critérios sociais utilizados como indicadores. Estas categorias devem ser adaptadas ao contexto da decisão para garantir que estão alinhadas com as prioridades organizacionais e as expectativas das partes interessadas, (Singh *et al.*, 2012).

O processo de seleção é também apoiado pela utilização de modelos estruturados, como o *Triple Bottom Line* (TBL) e os SDGs. Estes modelos fornecem um ponto de partida para a

identificação de critérios relevantes, garantindo o alinhamento com os objetivos globais de sustentabilidade, (Hacking & Guthrie, 2008). Por exemplo, os SDGs oferecem um conjunto abrangente de objetivos que podem ser adaptados aos objetivos específicos de uma organização ou projeto, o que facilita a integração de critérios de sustentabilidade na MCDA, (*Sustainable Development Goals | United Nations Development Programme, 2024*).

O envolvimento das partes interessadas é outra componente crítica do processo de seleção de critérios. A participação de vários intervenientes, como decisores políticos, especialistas da indústria e comunidades locais, garante que os critérios selecionados reflitam uma vasta gama de perspetivas e prioridades, (Cinelli *et al.*, 2014). Podem ser utilizados métodos como inquéritos, workshops e entrevistas para recolher os contributos das partes interessadas, fornecendo informações valiosas sobre a importância relativa dos diferentes critérios. Esta abordagem participativa não só reforça a legitimidade do processo de tomada de decisão, como também promove a adesão e o apoio das partes interessadas às decisões finais, (Cinelli *et al.*, 2014).

### **2.3.2. Desafios e Limitações na Integração**

A integração da MCDA nas práticas de sustentabilidade apresenta vários desafios e limitações que podem afetar a eficácia dos processos de tomada de decisão. A complexidade da sustentabilidade é dos principais desafios e abrange uma vasta gama de fatores ambientais, sociais e económicos. A MCDA deve acomodar esta complexidade sem simplificar em excesso as questões críticas, o que requer uma modelação sofisticada e uma compreensão aprofundada das interações entre os vários critérios de sustentabilidade, (Khalili & Duecker, 2013).

Um desafio significativo na integração da MCDA com as práticas de sustentabilidade é a natureza subjetiva envolvida na seleção e ponderação dos critérios, que pode conduzir a distorções no processo de tomada de decisões. As diferentes partes interessadas podem ter prioridades contraditórias, o que dificulta a obtenção de um consenso sobre a importância de critérios de sustentabilidade específicos. Esta subjetividade pode afetar a objetividade e a transparência do processo MCDA, comprometendo potencialmente a aceitação e a legitimidade das decisões tomadas. De acordo com Katharina Kowalski no artigo *Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis*, “a aplicação de um método de MCDA, como o AHP ou o MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), é vantajosa quando a base de dados formada por opiniões ou referências é difícil de quantificar. No entanto, a aplicação de escalões subjetivos a números quantitativos necessários para a comparação entre pares pode resultar em perdas de precisão com este método”, (Kowalski *et al.*, 2009).

A disponibilidade e a qualidade dos dados também representam desafios consideráveis. As decisões em matérias de sustentabilidade exigem frequentemente dados pormenorizados em vários domínios e as lacunas ou inconsistências dos dados podem ter um impacto significativo na fiabilidade dos resultados da MCDA. Além disso, a natureza dinâmica da informação sobre sustentabilidade significa que os modelos têm de ser atualizados regularmente para refletir novos dados e a evolução dos valores das partes interessadas, (Veleva & Ellenbecker, 2001).

Além disso, a integração da MCDA em iniciativas de sustentabilidade pode ser limitada por restrições práticas, como a disponibilidade de recursos, tempo e conhecimentos técnicos. A implementação de modelos MCDA sofisticados requer recursos significativos, o que pode não ser exequível para todas as organizações, (Linkov *et al.*, 2006).

Por último, existe frequentemente uma lacuna entre a robustez teórica das metodologias MCDA e a sua aplicação prática. Traduzir os resultados complexos da MCDA em estratégias exequíveis pode ser um desafio, especialmente em organizações que não têm experiência com sistemas avançados de apoio à decisão. Este facto pode limitar o impacto prático da MCDA nas práticas de sustentabilidade, salvo se acompanhado de formação e apoio adequado aos decisores, (Linkov *et al.*, 2006).

## Revisão Bibliográfica

## 3. Métodos e Aplicação

Neste capítulo são apresentados os métodos aplicados para a análise e avaliação das estratégias destinadas a aumentar a sustentabilidade no processo de montagem de bicicletas na empresa RTE, S.A.. O capítulo começa com uma descrição detalhada dos métodos multicritério AHP e PROMETHEE, utilizados de forma integrada como abordagem híbrida de apoio à decisão neste estudo. A seguir, é realizada a caracterização do caso de estudo, identificando as suas particularidades e os desafios operacionais envolvidos. Posteriormente, são apresentadas as alternativas estratégicas equacionadas para melhorar a sustentabilidade e são definidos os critérios de avaliação, de modo a assegurar que as várias dimensões sejam devidamente consideradas no processo de decisão. Por fim, cada alternativa é avaliada individualmente com base nos critérios definidos, permitindo a construção de uma base de comparação sólida para a análise multicritério.

### 3.1. AHP - *Analytic Hierarchy Process*

O método AHP, desenvolvido por Thomas Saaty em 1970, é uma das abordagens multicritério mais amplamente utilizadas para resolver problemas complexos de decisão que envolvem múltiplos critérios. O AHP permite estruturar hierarquicamente os elementos de decisão (objetivos, critérios e alternativas), quantificar as preferências dos decisores por meio de comparações par a par e calcular os pesos relativos de cada critério com base em julgamentos subjetivos fundamentados, (Ishizaka & Labib, 2011; Oliveira *et al.*, 2018).

O primeiro passo do AHP consiste em decompor o problema de decisão numa hierarquia de subproblemas, organizando os fatores relevantes numa estrutura hierárquica que vai desde o objetivo global, passando pelos critérios e subcritérios, até às alternativas. Desta forma deve ser criada, de acordo com a Figura 5, uma árvore hierárquica, com três níveis: o objetivo, os critérios e as alternativas, (Alexopoulos *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2018).

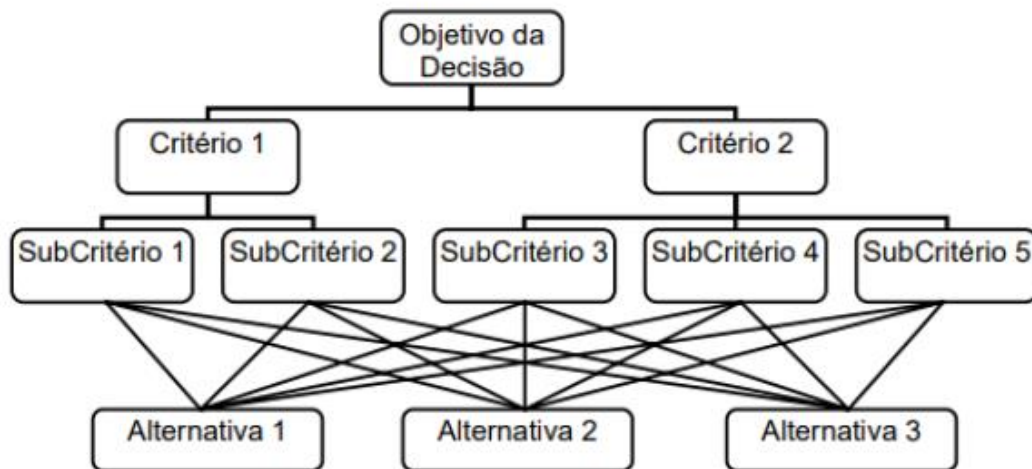


Figura 5 Árvore Hierárquica

Na próxima fase, são realizadas comparações par-a-par entre os critérios e as alternativas, através da construção de matrizes quadradas. Numa primeira fase, realiza-se a comparação aos pares dos critérios. Em seguida, numa segunda etapa, efetuam-se comparações par-a-par entre as alternativas, tendo em conta cada critério individualmente. O princípio de preenchimento da matriz é relativamente simples, uma vez que cada decisor deve indicar o grau de importância de um critério em relação a outro. Para esse fim, Saaty propôs uma escala de cinco níveis de avaliação designada por Escala Fundamental de Saaty (Turcksin *et al.*, 2011).

Tabela 7 A escala de Saaty para comparação par-a-par, (Turcksin *et al.*, 2011)

Importância	Definição
1	Igual importância
3	Importância moderada
5	Grande importância
7	Importância elevada
9	Dominância completa
2,4,6,8	Valore Intermediários
1/2, 1/3,...,1/9	Recíprocos

De seguida, as comparações par a par são organizadas numa matriz quadrada de ordem  $n$ , onde  $n$  é o número de critérios ou alternativas. O elemento  $a_{ij}$  (Equação (1)) representa a importância do critério  $i$  em relação ao critério  $j$ . A matriz  $A$  deve satisfazer as seguintes propriedades:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (1)$$

$$a_{ii} = 1 \quad (2)$$

A normalização da matriz é realizada dividindo cada elemento da coluna pelo total da coluna correspondente, e os pesos (ou vetor de prioridade) são obtidos através da média dos valores normalizados de cada linha, (Alexopoulos *et al.*, 2022).

A etapa seguinte consiste na determinação do índice médio de consistência, representado por  $\lambda_{max}$ . Para isso, multiplica-se cada coluna da matriz A pelo vetor de prioridades, originando uma nova matriz, designada por Z. Posteriormente, calcula-se o quociente entre a soma dos elementos de cada linha da matriz Z e o valor correspondente do vetor de prioridades. A média desses quocientes resulta no valor de  $\lambda_{max}$ , (Alexopoulos *et al.*, 2022).

Para verificar a consistência lógica dos pareceres dos decisores, é calculado o Índice de Consistência (IC) e o Rácio de Consistência (RC), (Alexopoulos *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2018). O IC é dado pela Equação(3):

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)} \quad (3)$$

Em que  $n$ , corresponde ao número total de critérios definidos.

O RC (Equação (4)) é então obtido pela relação entre o IC e o Índice de Consistência Aleatória (IR), um valor tabelado em função de  $n$  (Alexopoulos *et al.*, 2022; Podvezko, 2009):

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (4)$$

O IR é obtido através da Tabela 8:

Tabela 8 Valores referência do Índice de Consistência Aleatória (adaptado de Podvezko, 2009)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,42	1,45	1,49	1,51

Um RC inferior a 10% é considerado aceitável, indicando consistência na tomada de decisão. Quando este valor é ultrapassado, é recomendada a revisão das comparações par a par, (Alexopoulos *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2018; Podvezko, 2009).

### 3.2. PROMETHEE - Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation

O método PROMETHEE é uma metodologia de MCDA amplamente utilizada, concebida para auxiliar na tomada de decisões que envolvem múltiplos critérios, em que nem sempre é possível definir uma solução ótima para todos os critérios simultaneamente. Originalmente desenvolvido por Jean-Pierre Brans em 1982, o PROMETHEE foi criado para ajudar a avaliar várias alternativas com base em múltiplos critérios, fornecendo uma abordagem estruturada para a comparação e classificação (J.-P. Brans & Mareschal, 2005).

De acordo com J.-P. Brans & Mareschal, para construir um método MCDA, devem ser considerados os seguintes requisitos fundamentais:

- **Requisito 1:** A consideração da amplitude dos desvios entre as avaliações das alternativas dentro de cada critério é fundamental. A amplitude dos desvios é definida na Equação (5):

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (5)$$

- **Requisito 2:** Como as avaliações  $g_j(a)$  de cada critério são expressas nas suas unidades próprias, os efeitos de escala devem ser completamente eliminados. Não é aceitável obter conclusões com base nas escalas em que as avaliações são expressas.
- **Requisito 3:** No caso das comparações entre pares, um método multicritério adequado deve fornecer as seguintes informações:
  - a é preferível a b;
  - a e b são indiferentes;
  - a e b são incomparáveis.
- **Requisito 4:** Os diferentes métodos MCDA exigem diferentes tipos de dados e procedimentos computacionais, pelo que os seus resultados podem variar. Por conseguinte, é fundamental que as ferramentas de apoio à decisão sejam transparentes e facilmente compreensíveis para os decisores, evitando a utilização de procedimentos *Black Box*.
- **Requisito 5:** Um procedimento adequado não deve incluir parâmetros técnicos que não tenham qualquer significado para o decisor. Tais parâmetros induziriam novamente os efeitos de *Black Box*.
- **Requisito 6:** Um método adequado deve fornecer informações sobre a natureza conflituosa dos critérios.
- **Requisito 7:** A maioria dos métodos multicritério atribui pesos de importância relativa aos critérios. Estes pesos refletem uma parte significativa do processo de tomada de decisão. Um método adequado deve oferecer ferramentas que permitam testar facilmente diferentes conjuntos de pesos através análises de sensibilidade.

Nesse contexto, o PROMETHEE apresenta-se como um método que respeita todos estes requisitos, fornecendo aos decisores um modelo claro, flexível e adaptável às suas preferências e à natureza do problema.

O funcionamento do método PROMETHEE baseia-se na comparação par-a-par das alternativas avaliadas segundo múltiplos critérios, com o objetivo de estabelecer uma ordenação parcial (PROMETHEE I) ou total (PROMETHEE II). A sua aplicação é realizada de forma sequencial, permitindo transformar dados brutos de desempenho em *rankings* que apoiam a tomada de decisão, (Behzadian *et al.*, 2010).

Para a sua aplicação prática, o método PROMETHEE segue um conjunto de etapas estruturadas que permitem transformar os dados de avaliação das alternativas num sistema de preferências claro e justificável, (J.-P. Brans & Mareschal, 2005; Liao & Xu, 2014):

### 1. Definição das alternativas e critérios

A primeira etapa da aplicação do método PROMETHEE consiste na identificação clara do conjunto de alternativas em análise e dos critérios de avaliação que servirão de base para a comparação entre essas alternativas.

O conjunto de alternativas (Equação (6)) é representado por:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \quad (6)$$

onde cada elemento  $a_i$  corresponde a uma possível alternativa ou estratégia que poderá ser adotada no contexto da decisão em estudo.

Paralelamente, é necessário definir o conjunto de critérios:

$$C = \{g_1, g_2, \dots, g_k\} \quad (7)$$

Cada critério  $g_j$  representa uma dimensão relevante para a avaliação das alternativas, refletindo os múltiplos aspetos que devem ser considerados na decisão.

### 2. Avaliação das alternativas

Após a identificação das alternativas e dos critérios relevantes para a decisão, procede-se à avaliação do desempenho de cada alternativa em relação a cada critério. Esta etapa consiste na construção da matriz de desempenho, que organiza o desempenho das alternativas segundo os critérios previamente definidos.

Para cada alternativa  $a_i \in A$  e para cada critério  $g_j \in C$ , é atribuído um valor  $g_j(a_i)$ , o qual representa o desempenho da alternativa  $a_i$  relativamente ao critério  $g_j$ . Este valor pode ter origem em dados quantitativos ou qualitativos, desde que possam ser convertidos numa escala numérica compatível com o método.

A matriz de avaliação assume a forma seguinte:

$a$	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	...	$g_j(\cdot)$	...	$g_k(\cdot)$
$a_1$	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	...	$g_j(a_1)$	...	$g_k(a_1)$
$a_2$	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	...	$g_j(a_2)$	...	$g_k(a_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$a_i$	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	...	$g_j(a_i)$	...	$g_k(a_i)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$a_n$	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	...	$g_j(a_n)$	...	$g_k(a_n)$

Figura 6 Matriz de avaliação, (adaptado J.-P. Brans & Mareschal, 2005)

### 3. Cálculo da diferença entre pares de alternativas

Com a matriz de avaliação concluída, o passo seguinte do método PROMETHEE consiste no cálculo das diferenças de desempenho entre pares de alternativas para cada critério. Esta etapa é essencial, uma vez que o método é baseado em comparações par a par, ou seja, cada alternativa é comparada individualmente com todas as outras, critério a critério.

Para um par de alternativas  $(a_i, a_n)$  e para cada critério  $g_j$ , calcula-se o desvio:

$$d_j(a_i, a_n) = g_j(a_i) - g_j(a_n) \quad (8)$$

A Equação (8) representa a diferença de desempenho da alternativa  $a_i$  em relação à alternativa  $a_n$  no critério  $g_j$ .

O significado desta diferença depende da natureza do critério:

- Se o critério é de maximização, um valor positivo da função  $d_j(a_i, a_n)$  indica que  $a_i$  apresenta melhor desempenho que  $a_n$ .
- Se o critério é de minimização, um valor negativo indica uma preferência por  $a_i$ .

Este cálculo é efetuado para todos os pares possíveis de alternativas (exceto quando  $i = n$ , onde a comparação não se aplica) e para todos os critérios definidos.

O objetivo desta fase não é determinar qual a alternativa com melhor desempenho global, mas sim quantificar a diferença de desempenho em cada critério individual, para que essa informação possa ser posteriormente interpretada através das funções de preferência.

### 4. Aplicação das funções de preferência

Após o cálculo das diferenças de desempenho entre pares de alternativas para cada critério, o próximo passo consiste em converter essas diferenças em graus de preferência, aplicando funções de preferência. Estas funções representam a intensidade da preferência do decisor por uma alternativa face à outra, com base na magnitude do desvio observado.

Cada critério  $g_j$  é associado a uma função de preferência  $P_j$  que transforma o desvio  $d_j(a_i, a_n)$  num valor normalizado  $P_j(a_i, a_n)$ , situado entre 0 e 1, segundo a seguinte lógica:

- $P_j(a_i, a_n) = 0$ : Significa que o decisor não têm preferências entre as alternativas  $a_i$  e  $a_n$  nesse critério;
- $P_j(a_i, a_n) = 1$ : Significa que o decisor têm preferência máxima por  $a_i$  relativamente a  $a_n$  nesse critério;
- Os valores intermédios indicam níveis graduais de preferência, de acordo com a sensibilidade do decisor ao desvio observado.

A escolha da função de preferência adequada depende da natureza do critério, da escala dos dados e da percepção do decisor sobre o que constitui um desvio significativo. De acordo com Brans & Mareschal, no âmbito do PROMETHEE, são identificados seis tipos principais de funções de preferência:

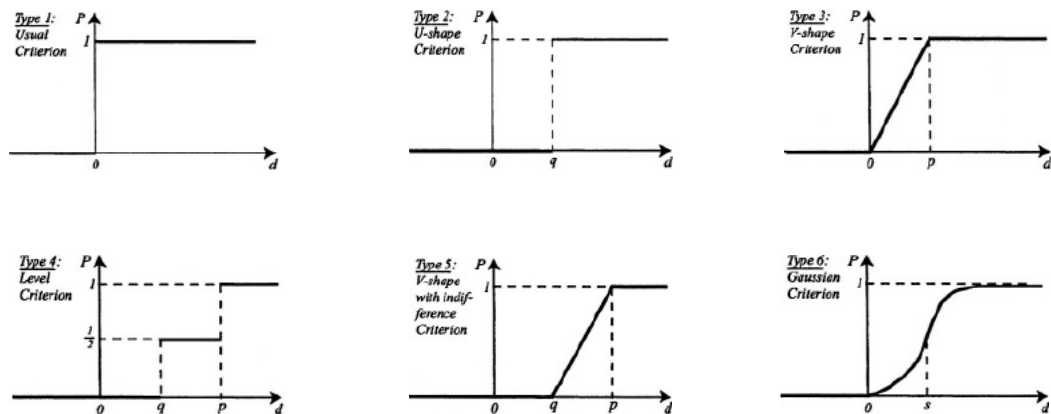


Figura 7 Funções de Preferência

Estas funções diferem entre si nos parâmetros exigidos e na forma como interpretam os desvios entre alternativas. A seleção da função adequada é, por conseguinte, um aspeto fundamental na construção do modelo, na medida em que permite refletir o grau de exigência ou de tolerância do decisor face às variações no desempenho das alternativas.

### 5. Cálculo do índice de preferência agregado

Concluída a aplicação das funções de preferência para cada critério, o passo seguinte consiste em agregar as preferências parciais de cada critério num índice de preferência global entre pares de alternativas. Este índice expressa, de forma resumida, o grau de preferência de uma alternativa  $a_i$  em relação a outra alternativa  $a_n$ , tendo em conta todos os critérios e os respetivos pesos.

O índice de preferência agregado entre as alternativas  $a_i$  e  $a_n$  (Equação (9)) é calculado da seguinte forma:

$$\pi(a_i, a_n) = \sum_{j=1}^k w_j * P_j(a_i, a_n) \quad (9)$$

onde:

- $w_j$  representa o peso atribuído ao critério  $g_j$ , refletindo a sua importância relativa no processo de decisão ( $\sum w_j = 1$ ).

O índice de preferência assume valores entre 0 e 1:

- Um valor de  $\pi(a_i, a_n) = 0$  indica ausência de preferência por  $a_i$  face a  $a_n$ , considerando todos os critérios;
- Um valor de  $\pi(a_i, a_n) = 1$  indica preferência absoluta por  $a_i$  em relação  $a_n$ ;
- Valores intermédios traduzem níveis parciais de preferência.

Este cálculo é realizado para todos os pares de alternativas possíveis, construindo-se assim uma matriz de preferências agregadas  $\pi(a_i, a_n)$ , que constitui a base para a próxima etapa de análise: o cálculo dos fluxos de preferência. A agregação ponderada das preferências

parciais torna possível captar a complexidade das decisões multicritério, respeitando as prioridades do decisor e permitindo uma análise equilibrada entre critérios de diferentes naturezas e unidades.

## 6. Cálculo de fluxos de preferência

Após a determinação do índice de preferência agregado para todos os pares de alternativas, o método PROMETHEE prossegue com o cálculo dos fluxos de preferência, que representam o grau de dominância de cada alternativa face às demais. Estes fluxos são fundamentais para a subsequente construção do *ranking* das alternativas.

São calculados dois tipos de fluxos para cada alternativa  $a_i$ :

- Fluxo de preferência positiva  $\phi^+(a_i)$ : Representa o grau médio com que a alternativa  $a_i$  domina as restantes alternativas.

$$\phi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^n \pi(a_i, a_n) \quad (10)$$

Onde:

- o  $n$  representa o número total de alternativas consideradas no problema de decisão.

Conforme se verifica, quanto mais elevado for o valor, mais acentuada será a preferência de  $a_i$  relativamente às restantes alternativas.

- Fluxo de preferência negativa  $\phi^-(a_i)$ : Representa o grau médio com que a alternativa  $a_i$  é dominada pelas outras alternativas.

$$\phi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^n \pi(a_n, a_i) \quad (11)$$

Um valor elevado de  $\phi^-(a_i)$  indica que  $a_i$  é, em média, pouco preferida face às outras alternativas.

Estes dois fluxos são obtidos através da média aritmética dos índices de preferência agregados, considerando todas as comparações possíveis entre pares de alternativas (exceto a comparação de uma alternativa consigo própria). A interpretação conjunta dos fluxos positivos e negativos permite aos decisores uma análise mais rica e diferenciada:

- O PROMETHEE I baseia-se nestes dois fluxos para fornecer uma ordenação parcial, permitindo identificar alternativas preferidas, indiferentes ou incomparáveis.
- O PROMETHEE II, por sua vez, irá utilizar os dois fluxos para construir uma ordenação completa, através do cálculo do fluxo total.

## 7. Cálculo do fluxo total de preferência

O último passo do método PROMETHEE consiste no cálculo do fluxo total de preferência para cada alternativa. Este valor resulta da diferença entre o fluxo de preferência positiva

e o fluxo de preferência negativa e permite estabelecer uma ordenação completa das alternativas em análise.

A fórmula do fluxo total de preferência é dada pela Equação (12):

$$\phi(a_i) = \phi^+(a_i) - \phi^-(a_i) \quad (12)$$

O valor  $\phi(a_i)$  pode ser:

- Positivo, indicando que, em média,  $a_i$  é preferida face às restantes alternativas;
- Negativo, indicando que  $a_i$  é, em média, dominada pelas restantes alternativas;
- Próximo de zero, o que pode sugerir uma posição relativamente neutra da alternativa no conjunto analisado.

Este fluxo total de preferência possibilita a construção da ordenação final das alternativas, no âmbito do PROMETHEE II, que disponibiliza uma classificação completa (sem incomparabilidades). Deste modo, a alternativa com o maior valor de  $\phi(a_i)$  será considerada a mais favorável segundo os critérios e pesos definidos, e aquela com o menor valor de  $\phi(a_i)$  será considerada a menos preferível.

Esta métrica final traduz, de forma sucinta, o equilíbrio entre os pontos fortes e fracos de cada alternativa, tendo em consideração todas as dimensões contempladas na análise multicritério. Esta ordenação constitui a base para a tomada de decisão fundamentada no contexto do problema em estudo.

### 3.2.1. PROMETHEE I – Ordenação parcial

O PROMETHEE I visa fornecer uma ordenação parcial das alternativas avaliadas com base nos fluxos de preferência positiva e negativa. A sua principal característica é a preservação das relações de incomparabilidade, o que a torna especialmente útil em contextos complexos e com elevada incerteza, (Macharis *et al.*, 2004).

A partir dos fluxos de preferência positiva ( $\phi^+$ ) e o fluxo de preferência negativa ( $\phi^-$ ), o método apresenta três tipos possíveis de relação entre pares de alternativas: preferência, indiferença, e incomparabilidade, (J. P. Brans *et al.*, 1986).

De acordo com Brans & Mareschal as relações entre estes dois fluxos é expressa da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} aP^I b \\ aI^I b \\ aR^I b \end{array} \right. \text{ iff } \left\{ \begin{array}{l} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ or} \\ \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) < \phi^-(b), \text{ or} \\ \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) = \phi^-(b); \\ \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) = \phi^-(b); \\ \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) > \phi^-(b), \text{ or} \\ \phi^+(a) < \phi^+(b) \text{ and } \phi^-(a) < \phi^-(b); \end{array} \right. \quad (13)$$

Onde:

- $aP^I b$  representa preferência;
- $aI^I b$  representa indiferença;
- $aR^I b$  representa incomparabilidade.

Esta formalização traduz-se numa abordagem prudente à decisão multicritério. A incomparabilidade  $aR^I b$  ocorre, por exemplo, quando a alternativa  $a$  tem um melhor desempenho em certos critérios mas é inferior noutros em relação à alternativa  $b$ . Neste caso, a informação fornecida pelos dois fluxos é inconsistente e não permite concluir inequivocamente qual alternativa é superior. Assim, o método opta por não forçar uma decisão arbitrária, reconhecendo explicitamente a existência de conflito entre critérios, (J.-P. Brans & Mareschal, 2005).

### 3.2.2. PROMETHEE II – Ordenação Completa

O PROMETHEE II é a versão do método que fornece uma ordenação completa e unívoca de todas as alternativas consideradas, eliminando qualquer situação de incomparabilidade entre pares. Este modelo é especialmente útil em contextos onde é necessário tomar decisões operacionais e selecionar diretamente a alternativa mais favorável, com base num critério agregador claro, (J. P. Brans *et al.*, 1986). A base desta ordenação é o fluxo total de preferência ( $\phi(a)$ ) que é definido de acordo com a Equação (12).

Tendo por base o fluxo total de preferência, o PROMETHEE II permite ordenar todas as alternativas da seguinte forma (J.-P. Brans & Mareschal, 2005):

$$\begin{cases} aP^{II} b & \text{iff} & \phi(a) > \phi(b) \\ aI^{II} b & \text{iff} & \phi(a) = \phi(b) \end{cases} \quad (14)$$

Esta abordagem resulta numa classificação completa, em que cada alternativa recebe um posicionamento inequívoco no ranking. No entanto, de acordo J.-P. Brans & Mareschal, ao considerar apenas o valor da diferença entre os fluxos positivo e negativo, pode-se perder alguma informação estrutural — nomeadamente os detalhes sobre os conflitos entre critérios que são visíveis no PROMETHEE I. Mesmo assim, o PROMETHEE II é extremamente eficaz para simplificar a análise e apoiar a decisão, especialmente em ambientes que exigem objetividade e rapidez, (J.-P. Brans & Mareschal, 2005).

Além disso, o fluxo total de preferência  $\phi(a)$  obedece a duas propriedades matemáticas relevantes:

$$-1 \leq \phi(a) \leq 1 \text{ e } \sum_{a \in A} \phi(a) = 0 \quad (15)$$

Estas propriedades, representadas na Equação (15), garantem que os valores atribuídos às alternativas se distribuem de forma equilibrada, com a média centrada em zero, o que reforça a coerência da análise, (J.-P. Brans & Mareschal, 2005).

Em aplicações reais, o PROMETHEE II é frequentemente utilizado para decisões finais, dado que produz uma ordenação clara e baseada em cálculos simples. Contudo, de acordo com J.-P. Brans & Mareschal é fundamental tanto analistas como decisores considerem ambas as versões, PROMETHEE I e PROMETHEE II. A primeira contribui para a análise de conflitos e zonas de indecisão, enquanto a segunda facilita a escolha final. Deste modo, a utilização conjunta das duas versões oferece uma abordagem robusta, equilibrada e adaptada a diferentes exigências do processo de decisão multicritério.

### 3.3. Desenvolvimento da Ferramenta de Tomada de Decisão AHP - PROMETHEE

Com base nos fundamentos teóricos dos métodos AHP, PROMETHEE I e PROMETHEE II, desenvolveu-se uma ferramenta de apoio à decisão em Microsoft Excel, com o objetivo de disponibilizar uma solução prática, acessível e reutilizável, quer para o caso de estudo desta dissertação, quer para outras situações similares de análise de multicritério.

Atualmente, várias ferramentas comerciais como o *Decision Lab* ou o *PROMCALC* permitem realizar este tipo de análise de forma automatizada. No entanto, estas soluções apresentam duas limitações relevantes: por um lado, os custos elevados de subscrição (*DecisionLab - Pricing Structure*, n.d.), e por outro, a complexidade técnica das interfaces, que pode limitar a sua aplicabilidade prática por parte de utilizadores com pouca formação técnica, (J.-P. Brans & Mareschal, 2005).

Assim, a ferramenta desenvolvida em Excel visa colmatar estas limitações, sendo orientada por quatro princípios fundamentais:

- **Simplicidade:** interface intuitiva, baseada em folhas de cálculo organizadas;
- **Transparência:** todas as fórmulas e passos do cálculo estão visíveis ao utilizador;
- **Flexibilidade:** permite alterar o número de alternativas, critérios, pesos e funções de preferência;
- **Utilidade prática:** possibilita aplicar o método híbrido em contextos reais de decisão, como o processo de montagem de bicicletas que ser como caso de estudo.

A estrutura da ferramenta em Excel está dividida nas seguintes folhas principais:

1. **Entrada de dados:** o utilizador introduz as alternativas, os critérios e os valores de desempenho;

Alternativa	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5	Critério 6
Tipo (Max/Min)	Minimizar	Maximizar	Maximizar	Maximizar	Maximizar	Maximizar
Peso						
A1						
A2						
A3						

Figura 8 Ferramenta PROMETHEE - Matriz de entrada de dados

2. **Preferência de critérios:** o utilizador avalia cada critério par a par de forma a definir a preferência de critérios;

	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5	Critério 6	Prioridade
Critério 1							#DIV/0!
Critério 2							#DIV/0!
Critério 3							#DIV/0!
Critério 4							#DIV/0!
Critério 5							#DIV/0!
Critério 6							#DIV/0!
Soma	0	0	0	0	0	0	0

Figura 9 Ferramenta PROMETHEE - Matriz de preferência de critérios

3. **Funções de preferência:** o utilizador define para cada critério a função de preferência e os respetivos parâmetros;

Critério	Tipo de Função	Parâmetro q (Indiferença)	Parâmetro p (Preferência)	Parâmetro $\sigma$
Critério 1				
Critério 2				
Critério 3				
Critério 4				
Critério 5				
Critério 6				

Figura 10 Ferramenta PROMETHEE - Funções de preferência

4. **Cálculo dos índices de preferência agregados:** construção da matriz de preferência, com cálculo automático dos índices de preferência agregados;

Alternativa i	Alternativa n	Critério	Tipo de Função	Diferença d	Pj(ai, an)	$\pi(ai, an)$
A1	A2	Critério 1	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A2	Critério 2	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A2	Critério 3	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A2	Critério 4	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A2	Critério 5	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A2	Critério 6	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A3	Critério 1	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A3	Critério 2	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A3	Critério 3	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A3	Critério 4	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A3	Critério 5	0	0	ERRO	#VALOR!
A1	A3	Critério 6	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A1	Critério 1	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A1	Critério 2	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A1	Critério 3	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A1	Critério 4	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A1	Critério 5	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A1	Critério 6	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A3	Critério 1	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A3	Critério 2	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A3	Critério 3	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A3	Critério 4	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A3	Critério 5	0	0	ERRO	#VALOR!
A2	A3	Critério 6	0	0	ERRO	#VALOR!
A3	A1	Critério 1	0	0	ERRO	#VALOR!

Figura 11 Ferramenta PROMETHEE - Matriz de índice de preferência agregado

5. **Resultados do PROMETHEE I:** cálculo dos fluxos positivos ( $\phi^+$ ) e fluxos negativos ( $\phi^-$ );

Alternativa	Fluxo Positivo $\phi^+$	Fluxo Negativo $\phi^-$
A1	#VALOR!	#VALOR!
A2	#VALOR!	#VALOR!
A3	#VALOR!	#VALOR!

Figura 12 Ferramenta PROMETHEE - Matriz dos fluxos de preferência

6. **Ranking PROMETHEE II:** ordenação final com base no fluxo líquido;

Alternativa	Fluxo Líquido $\phi$	Ranking
A1	#VALOR!	#VALOR!
A2	#VALOR!	#VALOR!
A3	#VALOR!	#VALOR!

Figura 13 Ferramenta PROMETHEE - Fluxo de preferência líquido

7. **Painel de resultados:** gráfico com a posição de cada alternativa.

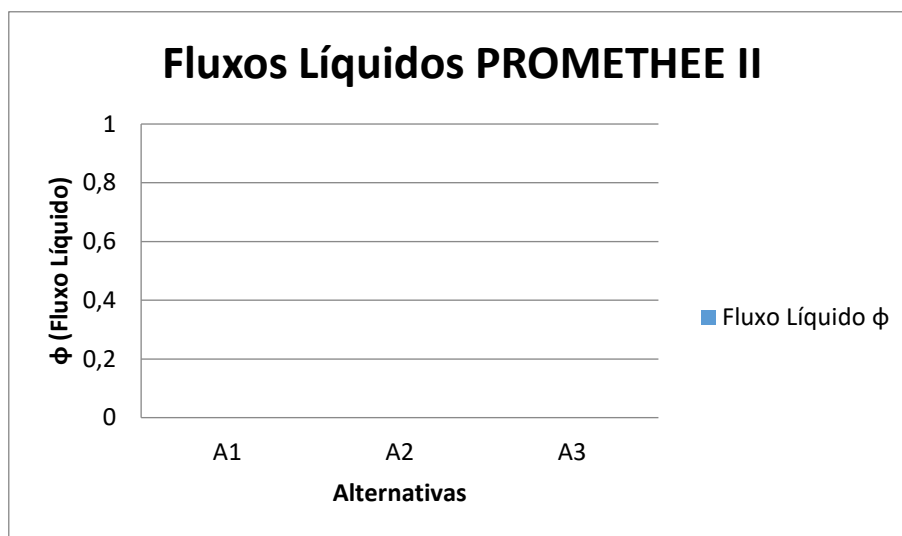


Figura 14 Ferramenta PROMETHEE - Gráfico de resultados PROMETHEE II

A ferramenta foi validada com base no caso de estudo descrito nesta dissertação, que permite simular diferentes cenários e apoiar a decisão de forma fundamentada e objetiva. O ficheiro Excel encontra-se no Apêndice D nesta dissertação e pode ser facilmente adaptado a outras decisões que envolvam múltiplos critérios.

### 3.4. Análise do Caso de Estudo

O presente caso de estudo incide sobre a RTE, S.A., uma organização industrial de referência no setor da produção de bicicletas, que opera no mercado nacional e internacional. A RTE possui uma estrutura produtiva moderna, com capacidade de adaptação a diferentes exigências do mercado, e tem vindo a investir no reforço da sua competitividade através da aposta na inovação, na qualidade e, mais recentemente, na sustentabilidade dos seus processos. A fábrica da RTE é composta por cinco linhas de montagem, concebidas para produzir uma vasta gama de modelos de bicicletas, que inclui bicicletas convencionais e elétricas. Cada linha opera com uma capacidade média de produção de cerca de 700 unidades por dia, o que resulta num volume diário total significativo e evidencia o impacto potencial de qualquer alteração no processo de montagem.

O problema analisado neste caso de estudo consiste em identificar e priorizar estratégias que contribuam para aumentar a sustentabilidade do processo de montagem. Esta necessidade resulta não só de uma preocupação crescente da empresa com os impactos ambientais e sociais da sua atividade, mas também da procura de maior eficiência operacional, de redução de custos e de conformidade com as boas práticas da indústria.

Neste contexto, o objetivo central deste caso de estudo é o desenvolvimento de um modelo MCDA que permita avaliar e selecionar alternativas estratégicas para melhorar a sustentabilidade na linha de montagem de bicicletas. Este modelo deverá permitir considerar simultaneamente múltiplos critérios de decisão, abrangendo dimensões económicas,

ambientais, sociais, tecnológicas e de qualidade, refletindo a complexidade do problema e as diferentes prioridades da organização.

A construção deste modelo baseia-se na metodologia híbrida AHP-PROMETHEE, que será aplicada a um conjunto de alternativas identificadas com a participação ativa da administração da empresa. A MCDA tem como objetivo apoiar a gestão na tomada de decisões fundamentadas, promovendo intervenções que maximizem os benefícios sustentáveis e minimizem os compromissos operacionais.

No que diz respeito à obtenção dos dados necessários à análise, a dissertação recorreu a duas fontes principais. No que se refere aos dados quantitativos, como valores estimados de investimento, poupança energética, produtividade esperada ou impacto em emissões de CO<sub>2</sub>, estes foram obtidos a partir das bases de dados internas da empresa, nomeadamente relatórios técnicos, orçamentos e históricos operacionais. Por outro lado, os dados qualitativos, relacionados com o impacto social, o grau de inovação e a perceção sobre a qualidade, foram recolhidos através de entrevistas a membros da administração e quadros técnicos da empresa, com experiência direta nos processos em análise.

### 3.5. Alternativas Equacionadas

No âmbito deste caso de estudo, e com o objetivo de promover a melhoria da sustentabilidade no processo de montagem de bicicletas da empresa RTE, foram discutidas diversas estratégias de intervenção. Foram equacionadas três alternativas que visam contribuir para a evolução dos processos produtivos, apoiando a empresa na sua missão de reforçar o compromisso com práticas mais sustentáveis:

- **Alternativa (A1):** Investimento em fontes de energia renovável para abastecimento da linha de montagem, com vista à redução da dependência energética de fontes não renováveis e da pegada de carbono associada à produção.
- **Alternativa (A2):** Digitalização do processo produtivo da linha de montagem, nomeadamente através da disponibilização de informação técnica em formato digital nos postos de trabalho, visando melhorar a eficiência e reduzir o erro humano.
- **Alternativa (A3):** Substituição de equipamentos e ferramentas convencionais por soluções de nova geração mais eficientes energeticamente, tais como a troca de pistolas pneumáticas por pistolas elétricas ou eletrónicas.

Estas alternativas serão analisadas em pormenor no capítulo seguinte, onde se procederá à caracterização específica de cada proposta, à apresentação dos dados quantitativos e qualitativos recolhidos e à avaliação do seu impacto no contexto do processo de montagem.

### 3.6. Definição de critérios

A avaliação das alternativas estratégicas propostas para melhorar a sustentabilidade do processo de montagem de bicicletas na empresa RTE será realizada com base num conjunto de

critérios, definidos de forma a refletir as dimensões mais relevantes do problema de decisão. A seleção destes critérios teve em consideração a natureza do setor industrial, os objetivos estratégicos da empresa e as boas práticas associadas à análise de sustentabilidade.

A aplicação do método MCDA requer que cada alternativa seja comparada em relação a cada critério, sendo essencial que estes critérios sejam claramente definidos, mensuráveis (quantitativamente ou qualitativamente) e coerentes com os objetivos da organização. A seguir, é apresentada a descrição detalhada de cada critério adotado:

- **Impacto Económico ( $g_1$ ):**

Este critério avalia o custo-benefício económico associado à implementação de cada alternativa. São considerados o investimento inicial necessário, os custos operacionais adicionais ou poupados, bem como os eventuais rendimentos financeiros ou poupanças ao longo do tempo. A unidade de medida utilizada será o euro (€) e o objetivo será minimizar o valor global do investimento necessário para implementar a alternativa.

- **Impacto Ambiental ( $g_2$ ):**

Este critério visa medir o efeito que a alternativa terá no ambiente, nomeadamente ao nível da redução de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A avaliação será expressa em toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas por ano, permitindo uma análise objetiva do benefício ambiental resultante da adoção da medida. Este critério será de maximização, uma vez que se pretende aumentar a poupança de emissões sempre que possível.

- **Impacto Social ( $g_3$ ):**

O impacto social consiste no efeito que cada alternativa poderá ter nos colaboradores da empresa e na comunidade envolvente. Serão considerados aspetos como a melhoria das condições de trabalho, a valorização profissional, a segurança no posto de trabalho e a imagem da empresa. Este critério será avaliado com base numa escala qualitativa de 1 a 5, definida pela administração da empresa, conforme apresentado na Tabela 9. Trata-se de um critério de maximização.

*Tabela 9 Escala de avaliação para o critério de Impacto Social*

Valor da Escala	Interpretação do Valor
1	Nenhum impacto social positivo
2	Impacto social baixo
3	Impacto social moderado
4	Impacto social elevado
5	Impacto social muito elevado

- **Inovação ( $g_4$ ):**

Este critério avalia o grau de inovação tecnológica e organizacional que a alternativa representa para a empresa. Serão valorizadas soluções que promovam a modernização do processo produtivo, a introdução de novas tecnologias e a preparação para desafios futuros. Tal como no critério anterior, a avaliação será efetuada com base numa escala qualitativa de 1 a 5, apresentada na Tabela 10. Trata-se também de um critério de maximização.

*Tabela 10 Escala de avaliação para o critério de Inovação*

Valor da Escala	Interpretação do Valor
1	Nenhuma inovação associada
2	Inovação pouco relevante
3	Inovação funcional e útil, mas não disruptiva
4	Inovação significativa com potencial de melhoria futura
5	Inovação altamente transformadora para a organização

- **Qualidade ( $g_5$ ):**

Este critério diz respeito ao impacto da alternativa na perceção da qualidade do produto final, considerando aspetos como a fiabilidade dos processos, a consistência dos resultados e a redução do risco de ocorrência de erros ou não conformidades. A avaliação será realizada com base numa escala qualitativa de 1 a 5, apresentada na Tabela 11, definida pela administração, permitindo refletir o grau de melhoria expectável na robustez do processo e na conformidade do produto, tendo em conta o conhecimento operacional da organização.

*Tabela 11 Escala de avaliação para o critério de Qualidade*

Valor da Escala	Interpretação do Valor
1	Sem impacto esperado na qualidade
2	Impacto reduzido e pouco significativo
3	Melhoria moderada em fiabilidade ou consistência
4	Melhoria clara na estabilidade e controlo do processo
5	Impacto muito elevado, com forte contribuição para a qualidade global

- **Produtividade ( $g_6$ ):**

Este critério avalia o impacto da alternativa na produtividade do processo de montagem, mais concretamente no número de bicicletas produzidas por colaborador por dia. Trata-se de um indicador objetivo que expressa a eficiência operacional das

alternativas propostas. Tendo em conta que o espectro desta apreciação é anual, a unidade de medida será o número de bicicletas produzidas por colaborador por ano, sendo este o critério de maximização.

Esta combinação de critérios permite uma avaliação equilibrada e multidimensional das alternativas, abordando as dimensões económica, ambiental, social, tecnológica, de qualidade e de produtividade. Esta abordagem está alinhada com os princípios da sustentabilidade e reforça a fundamentação do modelo de apoio à decisão adotado nesta dissertação.

### 3.7. Apreciação das Alternativas

Após a identificação das alternativas estratégicas para a melhoria da sustentabilidade do processo de montagem de bicicletas na empresa RTE, procede-se à apreciação individual de cada uma dessas alternativas. Esta análise visa caracterizar, de forma objetiva e fundamentada, os principais aspetos associados a cada estratégia, incluindo as vantagens, os desafios de implementação, o impacto previsto nas operações e os dados quantitativos e qualitativos recolhidos.

#### 3.7.1. Investimento em Fontes de Energia Renovável que Permita Abastecer as Necessidades Totais da Linha de Montagem

Como forma de melhorar a sustentabilidade da linha de montagem da empresa RTE, foi equacionado o investimento em fontes de energia renovável, através de uma solução combinada que integra autoprodução com painéis solares fotovoltaicos e a aquisição de energia verde certificada no mercado. Esta estratégia tem como objetivo assegurar que 100% das necessidades energéticas das linhas de montagem sejam satisfeitas por energia proveniente de fontes renováveis, contribuindo para a redução do impacto ambiental e para a melhoria da imagem institucional da empresa.

O consumo total de eletricidade da empresa no ano de 2024 foi de 1.658.295 kWh. A Tabela 12 apresenta a distribuição mensal deste consumo, com base nos dados da fatura energética.

*Tabela 12 Consumo mensal de eletricidade em 2024*

Mês	Período de Faturação	Consumo (kWh)
Jan	10/01/2022 – 09/02/2022	181.772
Fev	10/02/2022 – 09/03/2022	51.195
Mar	10/03/2022 – 09/04/2022	179.644
Abr	10/04/2022 – 30/04/2022	102.883
Mai	01/05/2022 – 31/05/2022	177.483
Jun	01/06/2022 – 30/06/2022	155.802
Jul	01/07/2022 – 31/07/2022	175.853

<b>Ago</b>	01/08/2022 – 31/08/2022	39.099
<b>Set</b>	01/09/2022 – 30/09/2022	107.154
<b>Out</b>	01/10/2022 – 31/10/2022	163.061
<b>Nov</b>	01/11/2022 – 30/11/2022	165.998
<b>Dez</b>	01/12/2022 – 31/12/2022	158.351
<b>Total</b>		<b>1.658.295</b>

Para o desenvolvimento desta alternativa, assume-se que 40% do consumo será suprido por autoprodução solar, o que representa:

$$1.658.295 \text{ kWh} * 40\% = 663.318 \text{ kWh/ano} \quad (16)$$

Após a simulação de desempenho da energia fotovoltaica (Anexo A), na localização da empresa, considera-se que cada painel solar de 1 kWh gera, em média 1445.56 kWh/ ano (*JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission, n.d.*), e portanto o número de painéis necessários de ser instalados será:

$$\frac{663.318 \text{ kWh}}{1445,56 \text{ kWh}} \approx 459 \text{ Painéis} \quad (17)$$

Tendo em conta que cada painel solar representa 1 kWp, logo a potência total a instalar será de 459 kWp. Com base em preços médios de mercado para instalações industriais (*IRENA – International Renewable Energy Agency, 2023*), estima-se em Portugal um custo de 723 €/kWp. Assim, o investimento inicial será:

$$459 \text{ kWp} * 723 \text{ €/kWp} = 331.857 \text{ €} \quad (18)$$

Este sistema permitirá deixar de adquirir 663.318 kWh à rede, o que, ao custo atual contratado de 0.14€/kWh, representa uma poupança de:

$$663.318 \text{ kWh} * 0,14 \text{ €/kWh} = 92.864,52 \text{ € anuais} \quad (19)$$

Os restantes 60% do consumo (994.977 kWh) continuarão a ser adquiridos como energia verde certificada ao mesmo custo, o que representa um encargo anual de:

$$994.977 \text{ kWh} * 0,14 \text{ €/kWh} = 139.296,78 \text{ € anuais} \quad (20)$$

Deste modo, o impacto económico direto pode ser resumido em três componentes principais:

- **Investimento no sistema de painéis solares:** 442.400€
- **Custo anual com compra de energia verde:** 139.296,78€
- **Poupança anual com energia autoproduzida:** 92.864,52€

Considerando estes dados, o período estimado para retorno do investimento, sem considerar eventuais incentivos fiscais ou variações no preço da eletricidade, é de:

$$\frac{442.400 \text{ €}}{92.864,52 \text{ €}} \approx 5 \text{ anos} \quad (21)$$

Estes resultados evidenciam um impacto económico favorável a médio prazo, com forte potencial de retorno e redução de dependência energética.

Em termos ambientais, a substituição integral da energia da rede por fontes renováveis permitirá evitar a emissão de gases com efeito de estufa. Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente, cada MWh de energia renovável evita, em média, a emissão de 0,2 toneladas de CO<sub>2</sub>, (APA - Agência Portuguesa Do Ambiente, 2024). Assim, este investimento na instalação de painéis solares evitará:

$$1.658 \text{ MWh} * 0,2 = 331,6 \text{ ton}_{CO_2}/\text{ano} \quad (22)$$

Esta redução anual de emissões, estimada 331,6 em toneladas de CO<sub>2</sub>, representa um contributo ambiental significativo para o compromisso da empresa com a neutralidade carbónica e a mitigação das alterações climáticas. Para além do impacto direto na pegada ecológica da operação, este resultado poderá ser valorizado em relatórios de sustentabilidade, candidaturas a incentivos de transição energética e futuras exigências regulamentares em termos de desempenho ambiental.

Adicionalmente, a adoção de fontes renováveis tem um impacto positivo na perceção pública da empresa e no sentimento de pertença dos colaboradores. A empresa começa a ser vista como uma organização ambientalmente responsável, em sintonia com os valores contemporâneos de sustentabilidade, o que pode reforçar a sua reputação junto dos clientes, parceiros e da comunidade envolvente.

Do ponto de vista interno, esta iniciativa pode ser percecionada como um sinal claro de compromisso com o futuro e com os valores ambientais, promovendo uma maior identificação dos colaboradores com os objetivos estratégicos da empresa. Esta valorização institucional pode ainda influenciar positivamente o clima organizacional e o orgulho de ser parte integrante da empresa.

Embora não represente uma inovação aplicada diretamente ao processo produtivo, esta alternativa representa uma transformação significativa ao nível das infraestruturas e da organização. A adoção de tecnologias de produção de energia limpa, aliada à aquisição de energia verde certificada, demonstra a capacidade da empresa para se alinhar aos princípios da modernização energética e às melhores práticas internacionais em termos de sustentabilidade. Esta orientação estratégica não só melhora a eficiência energética da organização, como também antecipa requisitos regulatórios futuros e prepara a empresa para responder às exigências de um mercado cada vez mais atento às questões ambientais.

Relativamente à qualidade do produto final, não se antecipam alterações nos procedimentos ou resultados de controlo de qualidade, uma vez que a origem da energia não influencia diretamente os parâmetros técnicos do processo de montagem. No entanto, a associação da empresa a práticas sustentáveis pode reforçar a perceção de qualidade e fiabilidade por parte dos clientes e parceiros comerciais. Esta valorização simbólica do produto poderá revelar-se

especialmente relevante em mercados exigentes, onde o desempenho ambiental da empresa produtora é um fator distintivo.

Em termos de produtividade, não se preveem alterações associadas a esta alternativa. A infraestrutura energética opera em paralelo com o processo produtivo, sem interferir com a organização do trabalho, os métodos de fabrico ou os tempos de ciclo. Assim, esta alternativa deve ser considerada neutra neste aspeto, não proporcionando melhorias operacionais diretas, mas também não impondo riscos ou limitações ao nível do desempenho existente.

Em suma, esta alternativa apresenta um desempenho sólido nos critérios económico e ambiental, com impactos adicionais relevantes ao nível social, organizacional e estratégico. Embora não exerça influência direta sobre a produtividade ou a qualidade técnica do produto final, é evidente a sua contribuição para a transformação do perfil energético da empresa. A sua implementação poderá representar um passo importante na consolidação de uma estratégia de sustentabilidade integrada.

### 3.7.2. Investimento na Digitalização do Processo Produtivo da Montagem

Esta alternativa propõe a digitalização das distribuições de tarefas nos postos de trabalho da linha de montagem, bem como a integração direta dessas instruções com as fichas técnicas digitais dos vários modelos de bicicleta. O objetivo é eliminar o uso de papel, garantir que cada operador tenha acesso imediato às suas tarefas e, sempre que necessário, possa consultar diretamente a informação técnica associada à operação a realizar. A solução será suportada por um sistema de *front-end* em ecrãs táteis instalados em cada posto de trabalho, ligados a uma plataforma digital de *back-office* que permitirá a gestão dinâmica das distribuições e atualizações diárias de balanceamento.

O desenvolvimento desta solução será realizado internamente pela equipa de informática da empresa, composta por cinco elementos. A estimativa de esforço total necessário para o desenvolvimento e implementação é de 1056 horas. Considerando um custo/hora de 21,55 €, o custo total de desenvolvimento é:

$$1056h \times 21,55\text{€/h} = 22.757,28\text{€} \quad (23)$$

Adicionalmente, será necessário instalar ecrãs táteis nos postos de trabalho. Cada linha de montagem tem, em média, 45 postos, o que totaliza 225 postos para as 5 linhas da RTE. Com um custo médio de 1.000 € por posto (incluindo o equipamento e instalação), o investimento em hardware ascende a:

$$225 \text{ postos} \times 1.000\text{€} = 225.000\text{€} \quad (24)$$

O custo total estimado desta alternativa será, portanto:

Tabela 13 Investimento na digitalização do processo produtivo

	Custo (€)
<b>Desenvolvimento interno</b>	22.757,28
<b>Equipamento e instalação</b>	225.000
<b>Total do Investimento</b>	247.757,28

A digitalização dos postos de trabalho terá um impacto ambiental direto, resultante da eliminação do uso diário de papel nas linhas de montagem. Atualmente, cada linha produz, em média, cinco modelos de bicicleta por dia. Para cada modelo, é necessário entregar uma folha impressa com a distribuição de tarefas a cada um dos 45 operadores da linha. Considerando que a fábrica opera com cinco linhas de montagem, o total de folhas impressas por dia pode ser calculado da seguinte forma:

$$5 \text{ modelos} \times 45 \text{ operadores} \times 5 \text{ linhas} = 1.125 \text{ folhas/dia} \quad (25)$$

Assumindo 251 dias úteis por ano, o total anual de folhas impressas é:

$$1.125 \text{ folhas/dia} \times 250 \text{ dias} = 282.375 \text{ folhas/ano} \quad (26)$$

Tendo em conta que 200.000 folhas de papel A4 correspondem a 1 tonelada de papel, a eliminação deste volume anual de impressão representa:

$$\frac{282.375}{200.000} = 1,41 \text{ ton de papel/ano} \quad (27)$$

De acordo com autores do artigo *Carbon Performance Assessment of Paper Producers: Methodology Note*, a produção de 1 tonelada de papel emite, em média, 0,643 toneladas de CO<sub>2</sub>, (Dietz *et al.*, 2019). Assim, a poupança estimada em emissões associadas à digitalização é de:

$$1,41 \times 0,643 = 0,91 \text{ ton}_{CO_2}/ano \quad (28)$$

Em termos de impacto social, esta alternativa melhora as condições de trabalho dos operadores ao eliminar a necessidade de consultar instruções impressas, que são frequentemente desatualizadas ou de difícil leitura. A disponibilização de informação técnica atualizada em tempo real, acessível num ecrã no próprio posto de trabalho, aumenta a autonomia, reduz o erro e promove a confiança no desempenho das tarefas. Esta modernização também melhora a imagem da empresa junto dos colaboradores e reforça o sentimento de pertença a uma organização inovadora e tecnologicamente avançada.

Esta alternativa traduz-se ainda numa melhoria a nível da inovação organizacional. A ligação direta entre as distribuições de tarefas e as fichas técnicas digitais representa um avanço significativo na gestão da informação do processo produtivo, permitindo uma abordagem mais ágil, rastreável e adaptável às alterações diárias no planeamento da produção. Esta infraestrutura tecnológica poderá futuramente ser integrada com sistemas de recolha e análise de dados em tempo real, promovendo a transformação digital da operação.

No que respeita à qualidade, a redução de erros operacionais será potenciada pela eliminação de versões desatualizadas ou ilegíveis das instruções em papel. A ligação direta entre cada tarefa e a respetiva instrução técnica, visível no ecrã do posto, assegura que os operadores executam as operações segundo os parâmetros definidos para cada modelo. Esta medida promove maior consistência no processo produtivo, com impacto positivo na conformidade do produto final.

Do ponto de vista da produtividade, a digitalização das distribuições de tarefas permitirá reduzir significativamente as paragens de linha associadas a erros de operador ou à utilização de instruções desatualizadas. Em 2024, estas paragens totalizaram 196,14 horas nas cinco linhas de montagem da RTE, conforme detalhado na Tabela 14 :

## Métodos e Aplicação

Tabela 14 Categorização e quantificação de paragens relativas a erros de operador e standards incorretos

Mês	Nível 2	Nível 3	Tempo de Paragem (Horas)
<b>RTE 3 - Montagem (Linha 5)</b>	Linha	Embalagem	19,35
		Enfiamentos	13,36
		Sistema Elétrico	12,00
		Afinações	11,03
		Acessórios	8,49
		Rodas e Correntes	4,72
		Acabamentos	4,34
		Controlo Qualidade	0,78
	Guiadores e Jogo de Direção	Erro Operador	19,96
	Rodas	Erro Operador	4,68
	<b>RTE 1 - Montagem (Linha 1 a 4)</b>	Atrasos na Montagem	Fim de Linha
Enfiamentos			24,96
Embalagem			14,44
Rodas			4,37
Guiadores			3,37
Abastecimentos			2,94
Afinações			2,83
Prensas			2,69
Pedais			0,58
Manivelas			0,29
Atrasos nas Pré-Montagens		Quadros	2,06
		Selins	0,82
		Guarda-Lamas	0,72
		Porta-Bagagens	0,38
		Discos	0,38
		Guiadores	0,23
<b>Total</b>			<b>196, 14</b>

Assumindo que a digitalização permitirá reduzir em 70% estas paragens, estima-se uma recuperação de tempo útil de:

$$196,14 h \times 0,70 = 137,30 h/ano \quad (29)$$

Atualmente, cada linha de montagem opera a uma velocidade média de 88 bicicletas por hora. Assim, a produção adicional anual possível com o tempo recuperado será de:

$$137,30 h \times 88 bic/h = 12.082,4 bic/ano \quad (30)$$

Distribuindo esta produção adicional pelos 225 colaboradores envolvidos nas 5 linhas de montagem (45 por linha), obtém-se a melhoria de produtividade individual:

$$12.082,4 bic / 225 trabalhadores = 53,70 bic/ano por trabalhador \quad (31)$$

Este valor reflete o impacto direto da digitalização na eficiência da operação, ao reduzir paragens causadas por erros humanos e melhorar o acesso à informação crítica no posto de trabalho.

É igualmente importante salientar que a empresa acredita que esta alternativa poderá proporcionar ganhos adicionais em termos de velocidade de execução das operações, graças à maior autonomia e clareza na leitura das instruções. No entanto, no momento da elaboração deste estudo, não existem dados disponíveis que permitam quantificar rigorosamente essa melhoria. Assim, a análise centrou-se exclusivamente na redução das paragens de linha associadas a falhas de informação ou erro humano.

### 3.7.3. Investimento na Substituição de Ferramentas Pneumáticas para Elétricas

Uma das estratégias equacionadas para aumentar a sustentabilidade da linha de montagem da empresa RTE consiste na substituição progressiva das ferramentas pneumáticas por ferramentas elétricas e eletrónicas. Esta transformação tecnológica visa reduzir o consumo energético, melhorar a eficiência do processo de aperto e promover uma maior fiabilidade operacional. Atualmente, cerca de 90% das ferramentas de aperto utilizadas na linha são pneumáticas, sendo alimentadas por ar comprimido proveniente de um sistema centralizado. A proposta passa por implementar ferramentas de nova geração com controlo eletrónico de binário, estratégias de aperto configuráveis e potencial para integração com sistemas digitais de controlo da qualidade.

Em termos económicos, este investimento representa uma oportunidade de otimização do consumo energético e dos custos operacionais. O ar comprimido é, em termos energéticos, uma das formas menos eficientes de utilização de energia elétrica na indústria (Unger & Radgen, 2017). Em 2024, o sistema de compressores da fábrica consumiu um total de 500.973 kWh. A Tabela 15 apresenta os consumos mensais em kWh do sistema de compressor responsável por abastecer as linhas de montagens:

Tabela 15 Consumos do sistema do ar comprimido

Mês	Caudal ( $m^3$ )	Consumo Energético (kWh)
Jan	23254	42911
Fev	23572	38449

## Métodos e Aplicação

<b>Mar</b>	22496	41575
<b>Abr</b>	24341	40886
<b>Mai</b>	25724	46135
<b>Jun</b>	29400	41820
<b>Jul</b>	34285	50719
<b>Ago</b>	12887	23399
<b>Set</b>	23258	43500
<b>Out</b>	28574	51570
<b>Nov</b>	21419	46025
<b>Dez</b>	16848	33984
<b>Total</b>	<b>286059</b>	<b>500973</b>

Considerando um preço médio de 0,14 €/kWh, o custo anual e consumo energético é de:

$$500.973 \text{ kWh} * 0,14 \text{ €/kWh} = 70.136,22 \text{ €} \quad (32)$$

Assumindo a substituição de 80% das ferramentas pneumáticas por alternativas elétricas, prevê-se uma redução proporcional no consumo de ar comprimido, equivalente a cerca de:

$$500.973 \text{ kWh} * 80\% = 400.778 \text{ kWh} \quad (33)$$

Considerando a substituição de 80% do stock já existente de ferramentas pneumáticas, estima-se uma poupança anual no consumo de energia de:

$$70.136,22 \text{ €} * 80\% = 56.108,98 \text{ €} \quad (34)$$

Adicionalmente, é de considerar o custo de manutenção associado ao sistema de compressão e à rede de fornecimento de ar comprimido (tubagens, válvulas, ligações), cujo valor anual em 2024 ascendeu a 23.500 €. Considerando que 80% da utilização do sistema seria eliminada com esta substituição, estima-se uma poupança adicional por ano em custos de manutenção de:

$$23.500 \text{ €} * 80\% = 18.800 \text{ €} \quad (35)$$

Para complementar a análise económica, foi realizado o levantamento de todas as ferramentas pneumáticas atualmente utilizadas na linha de montagem e identificadas as respetivas alternativas elétricas/eletrónicas equivalentes (Apêndice B). A substituição considerada abrange ferramentas com um binário entre 0,4 e 48 Nm, cobrindo a grande maioria de aperto críticos nos modelos de bicicleta que representam mais de 80% da produção anual.

O investimento necessário para a substituição inclui os seguintes componentes:

- Custo da ferramenta elétrica;
- Cabeçote de aperto (quando aplicável);
- Bateria;

- Carregador.

O número de unidades a substituir por modelo foi obtido pelo inventário realizado pela equipa de Meio de Apoio à Produção e os respetivos valores unitários foram obtidos através do contacto direto do fornecedor, (*Ferramentas Elétricas Para o Ambito Profissional | FEIN POWER TOOLS IBERICA, S.L.U.*, n.d.). Como resultado, a substituição de 80% das ferramentas pneumáticas atualmente em uso representa um investimento total de aproximadamente 236.137,43 € (Apêndice B).

Com base nestes dados, estima-se que o retorno do investimento ocorrerá em aproximadamente:

$$\frac{236.137,43}{74.908,98} \approx 3.2 \text{ anos} \quad (36)$$

Isto significa que a empresa poderá recuperar totalmente o investimento em menos de quatro anos, o que, aliado aos benefícios ambientais, sociais e operacionais descritos, reforça a viabilidade e relevância estratégica desta alternativa.

Para além da poupança económica, esta redução de consumo energético traduz-se também num impacto ambiental positivo. Utilizando o fator de emissão médio de 0,2 tCO<sub>2</sub>/MWh, recomendado pela (“APA - Agência Portuguesa Do Ambiente,” 2024), a substituição parcial das ferramentas poderá evitar a emissão anual de aproximadamente:

$$400,8 \text{ MWh} * 0,2 \text{ t}_{CO_2}/\text{MWh} = 80 \text{ ton}_{CO_2}/\text{ano} \quad (37)$$

A nível social, esta medida poderá contribuir para a melhoria das condições de trabalho dos operadores, reduzindo o ruído e as vibrações associadas às ferramentas pneumáticas, bem como o esforço físico associado à manipulação de mangueiras de ar comprimido. A modernização do posto de trabalho tem ainda um impacto positivo na perceção dos colaboradores, promovendo um maior sentido de valorização e de pertença à organização. Este efeito pode refletir-se em ganhos de motivação e em maior envolvimento com os objetivos da empresa.

Esta alternativa representa um passo importante na modernização do processo produtivo, do ponto de vista da inovação. As ferramentas elétricas e eletrónicas oferecem funcionalidades avançadas, como o controlo digital de binário, a monitorização da qualidade do aperto e a possibilidade de integração com sistemas de rastreabilidade. A introdução deste tipo de equipamentos representa uma evolução tecnológica relevante, com potencial para fomentar uma cultura de melhoria contínua e de excelência operacional.

No que respeita à qualidade, as ferramentas de nova geração apresentam uma maior precisão e consistência nos valores de aperto, reduzindo o risco de não conformidades relacionadas com fixações incorretas. Este aspeto é particularmente relevante em pontos críticos, como o aperto dos discos às rodas, onde variações no binário podem afetar a segurança e o desempenho do produto final.

Para sustentar esta avaliação, foram realizados testes de capacidade a duas ferramentas de aperto: a FEIN ASM 18-12 PC (elétrica) e a LUM 22 HRX 10 (pneumática). Os resultados,

detalhados no Apêndice C, demonstram uma performance superior da ferramenta elétrica. A FEIN apresentou um desvio padrão de 0,0492 Nm e um índice de capacidade Cpk de 6,510, refletindo uma elevada repetibilidade e centragem em relação ao binário teórico de 7,50 Nm. Em contraste, a ferramenta pneumática LUM apresentou uma maior variabilidade, com um desvio padrão de 0,0707 Nm e um Cpk de apenas 4,489, evidenciando uma menor estabilidade e precisão em torno do valor teórico de 6,75 Nm.

Apesar dos valores de capacidade serem excelente nas duas ferramentas, esta diferença é significativa em termos de qualidade do processo, na medida em que confirma que a utilização de ferramentas elétricas/eletrónicas contribui de forma clara para um controlo mais rigoroso do binário aplicado, reduzindo a probabilidade de defeitos de montagem e assegurando maior consistência na linha de produção.

Por fim, no critério da produtividade, é expectável que esta medida contribua para ganhos operacionais. Por um lado, a eliminação de falhas no fornecimento de ar comprimido reduzirá paragens de linha não planeadas. Por outro, a maior velocidade e ergonomia das ferramentas elétricas poderá acelerar operações críticas.

Para avaliar o impacto da substituição das ferramentas pneumáticas por ferramentas elétricas no critério da produtividade, tomou-se como referência uma cadência média atual de 88 bicicletas por hora por linha de montagem. Cada linha opera em média com 45 trabalhadores, num turno de 7 horas e 15 minutos (7,25 horas, não considerando intervalos para refeições e pausas) e um total anual de 260 dias úteis. Atualmente, cada linha de montagem produz diariamente:

$$88 \text{ bic/h} \times 7,25 \text{ h/dia} = 638 \text{ bic/dia por linha} \quad (38)$$

Considerando que, em média, trabalham 45 colaboradores em cada linha, a produtividade diária por trabalhador é calculada por:

$$\frac{638 \text{ bic/dia}}{45 \text{ trabalhadores}} \approx 14,18 \text{ bic/dia por trabalhador} \quad (39)$$

Portanto a produtividade anual atual por colaborador é estimada em:

$$14,18 \text{ bic/dia} \times 260 \text{ dias/ano} \approx 3.686,22 \text{ bic/ano por trabalhador} \quad (40)$$

Durante o ano de 2024, foram registadas 12,1 horas de paragens não planeadas causadas por falhas em ferramentas pneumáticas e compressores. A Figura 15 abaixo apresenta detalhadamente estas paragens, destacando que as pistolas pneumáticas e os compressores representam a maioria dessas interrupções, totalizando respetivamente 7,0 horas e 5,1 horas

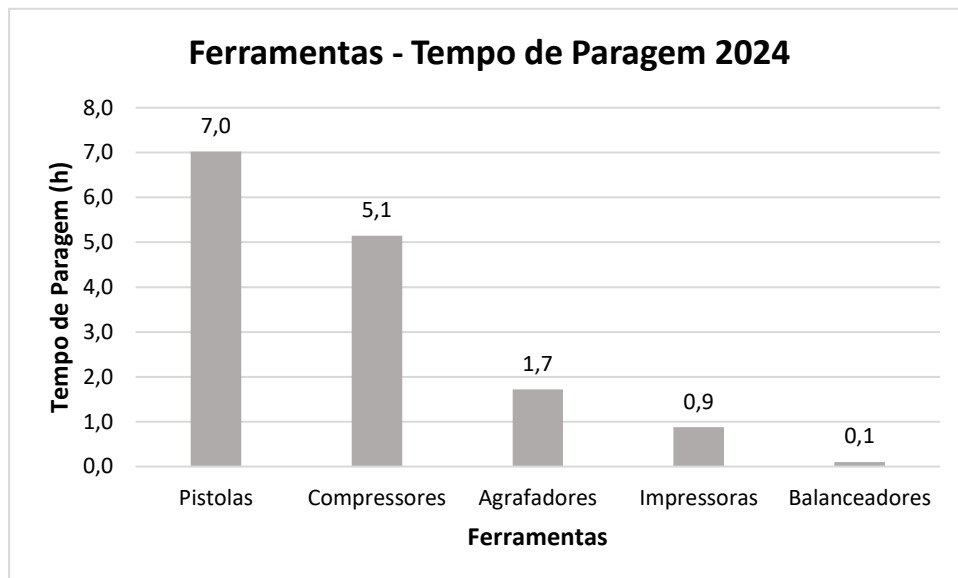


Figura 15 Tempo de paragem em 2024 devido a ferramentas

Estas paragens representam uma oportunidade de ganho de produtividade percentual de:

$$\frac{12,1 \text{ h}}{260 \text{ dias} \times 7,25 \text{ h/dia}} \approx 0,00642 \text{ ou } (0,642\%) \quad (41)$$

Aplicando este ganho percentual à produtividade anual atual obtém-se um acréscimo de produtividade anual por colaborador de aproximadamente:

$$3.686,22 \text{ bic/ano} \times 0,00642 \approx 23,66 \text{ bic adicionais / ano por trabalhador} \quad (42)$$

Adicionalmente, espera-se que a substituição das ferramentas pneumáticas por elétricas resulte numa redução de tempo de operação de 1 segundo no aperto dos discos e 2 segundos no aperto dos calços, totalizando 3 segundos poupados por bicicleta. Atualmente, o tempo necessário para produzir cada bicicleta é:

$$\frac{7,25 \text{ h/dia} \times 3600 \text{ seg / h}}{638 \text{ bic/dia}} = 40,91 \text{ seg/bic} \quad (43)$$

Considerando, a melhoria de 3 segundos por bicicleta, o novo de tempo de ciclo será de:

$$40,91 \text{ seg} - 3 \text{ seg} = 37,91 \text{ seg / bic} \quad (44)$$

Este novo tempo de ciclo, aumenta a produção diária para:

$$\frac{7,25 \text{ h/dia} \times 3600 \text{ seg / h}}{37,91 \text{ seg / bic}} \approx 689 \text{ bic/dia} \quad (45)$$

## Métodos e Aplicação

Distribuindo esta produção diária pelos 45 colaboradores da linha, obtém-se uma produtividade diária de:

$$\frac{689 \text{ bic / dia}}{45 \text{ trabalhadores}} = 15,31 \text{ bic/dia por trabalhador} \quad (46)$$

Assim a produtividade anual após a implementação desta melhoria será de:

$$15,30 \text{ bic/dia} \times 260 \text{ dias/ano} \approx 3.977,94 \text{ bic/ano por trabalhador} \quad (47)$$

Através da comparação da produtividade melhorada com a produtividade atual, é possível verificar um aumento significativo de:

$$3.977,94 - 3.686,22 = 291,72 \text{ bic adicionais por ano por trabalhador} \quad (48)$$

Este aumento total de cerca de 292 bicicletas adicionais por ano por trabalhador evidencia o potencial e a relevância desta alternativa proposta, traduzindo-se numa melhoria direta da eficiência produtiva da fábrica.

## 4. Resultados e Discussão

Este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos através da aplicação do modelo híbrido *AHP-PROMETHEE* ao estudo de caso em análise. Inicialmente, serão detalhados os dados de entrada utilizados, incluindo as alternativas consideradas e os critérios selecionados, que são essenciais para fundamentar o processo de avaliação. Seguidamente, serão abordadas as matrizes de preferência de critérios e de alternativas, elementos fundamentais para a correta aplicação do método *AHP-PROMETHEE*. Após este enquadramento, serão apresentados os resultados das análises *PROMETHEE I* e *II*, destacando as alternativas mais favoráveis para aumentar a sustentabilidade do processo produtivo em estudo. Por fim, os resultados obtidos serão alvo de uma discussão aprofundada, incluindo uma análise de sensibilidade para avaliar a robustez das conclusões face a possíveis variações nos pesos atribuídos aos critérios. Este capítulo visa, assim, consolidar o entendimento sobre a eficácia prática das alternativas avaliadas, contribuindo para uma tomada de decisão mais fundamentada e sólida na empresa.

### 4.1. Apresentação de resultados

Nesta subcapítulo serão apresentados detalhadamente os resultados decorrentes da aplicação prática do método *AHP-PROMETHEE* ao caso em estudo. Numa primeira fase, serão especificados os dados de entrada, indicando claramente as alternativas tecnológicas consideradas e os critérios utilizados para a sua avaliação. Seguidamente, com recurso ao método *AHP*, serão descritas as matrizes de preferência, que traduzem quantitativamente as preferências atribuídas aos diferentes critérios. Após esta fase, aplica-se o método *PROMETHEE*, que inicia na construção das matrizes de preferência entre as alternativas definidas. Finalmente, serão explicitados os resultados obtidos das etapas *PROMETHEE I* e *II*, permitindo identificar e ordenar as alternativas mais adequadas face aos objetivos definidos no contexto deste caso de estudo..

#### 4.1.1. Dados de Entrada

A definição dos dados de entrada constitui uma etapa fundamental para a aplicação da MCDA. Para tal, foi construída uma estrutura hierárquica de decisão, de acordo com método *AHP*, (Figura 16), na qual se representa o objetivo global — a priorização de alternativas sustentáveis para a linha de montagem de bicicletas, os critérios de avaliação e as alternativas estratégicas consideradas.

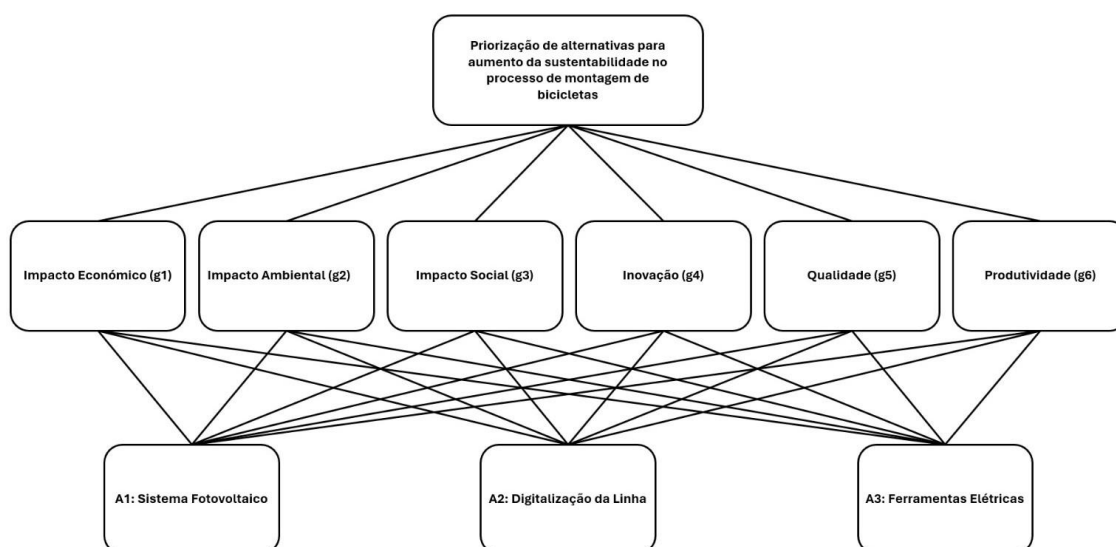


Figura 16 Árvore hierárquica

A árvore hierárquica adotada reflete a lógica da decisão e encontra-se alinhada com os princípios da sustentabilidade industrial. No topo está o objetivo global da decisão, suportado por seis critérios que integram diferentes dimensões de análise: impacto económico, impacto ambiental, impacto social, inovação, qualidade e produtividade. As alternativas avaliadas foram:

- **A1:** Investimento em fontes de energia renovável que permita abastecer as necessidades totais da linha de montagem.
- **A2:** Investimento na Digitalização do Processo Produtivo da Montagem
- **A3:** Investimento na Substituição de Ferramentas Pneumáticas para Elétricas

A Tabela 16 apresenta o resumo dos dados de entrada utilizados, conforme introduzido na ferramenta (Apêndice D). Os critérios foram classificados segundo o seu tipo (maximizar ou minimizar), peso relativo atribuído e valores obtidos para cada alternativa:

Tabela 16 Dados de entrada

Alternativa	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5	Critério 6
<b>Tipo (Max/Min)</b>	Minimizar	Maximizar	Maximizar	Maximizar	Maximizar	Maximizar
<b>Peso</b>	0,28	0,05	0,03	0,13	0,15	0,37
<b>A1</b>	488 832,26 €	331,6	2	2	1	0
<b>A2</b>	247 757,28 €	0,941	4	5	5	53,7
<b>A3</b>	161 228,45 €	80	2	4	4	292

Os critérios quantitativos (Critério 1, 2 e 6) foram calculados com base em dados objetivos, conforme desenvolvido nos capítulos anteriores. O impacto económico considerou os investimentos necessários para cada alternativa, expressos em euros, sendo este um critério de minimização. O impacto ambiental foi medido em toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas por ano (maximização) e a produtividade foi expressa como o número de bicicletas produzidas por colaborador por ano (também um critério de maximização).

Já os critérios qualitativos (Critérios 3, 4 e 5) foram avaliados com base em entrevistas estruturadas à administração da empresa. A cada alternativa foi atribuída uma pontuação numa escala ordinal de 1 a 5, refletindo o grau perceptível de benefício em cada dimensão. Esta abordagem permitiu integrar o conhecimento técnico e estratégico dos responsáveis pela decisão no processo de análise multicritério.

#### 4.1.2. Matriz de Preferência de Critérios

A definição da matriz de preferência de critérios é uma etapa essencial na aplicação do método MCDA, na medida em que permite determinar o peso relativo de cada critério de decisão. Neste fase do estudo, essa análise foi realizada com recurso ao método AHP, o qual se baseia na comparação par-a-par entre os critérios. O objetivo é quantificar, de forma estruturada e consistente, a importância relativa de cada critério no contexto específico do caso de estudo, assegurando que os pareceres dos decisores reflitam adequadamente as prioridades estratégicas da organização.

A avaliação foi realizada em conjunto com a administração da empresa, através de entrevista e análises comparativas, utilizando como base na escala de intensidade de Saaty (Tabela 7). Esta escala, composta por nove níveis, permite expressar a preferência de um critério face a outro, variando desde igual importância (valor 1) até dominância completa (valor 9), incluindo os respetivos valores recíprocos para situações de menor importância relativa, (Turcksin *et al.*, 2011).

Com base nesta metodologia, foi construída a matriz de preferência entre os seis critérios definidos. A ponderação final de cada critério foi obtida através da normalização da soma das colunas da matriz, resultando nos pesos de prioridade apresentados na última coluna da Tabela X.

*Tabela 17 Matriz de preferência de critérios*

	<b>Critério 1</b>	<b>Critério 2</b>	<b>Critério 3</b>	<b>Critério 4</b>	<b>Critério 5</b>	<b>Critério 6</b>	<b>Prioridade</b>
<b>Critério 1</b>	1	5	7	4	4	1/3	<b>28%</b>
<b>Critério 2</b>	1/5	1	3	1/5	1/5	1/7	<b>5%</b>
<b>Critério 3</b>	1/7	1/3	1	1/5	1/5	1/7	<b>3%</b>
<b>Critério 4</b>	1/4	5	5	1	1	1/4	<b>13%</b>

<b>Critério 5</b>	1/4	5	5	1	1	1/2	<b>15%</b>
<b>Critério 6</b>	3	7	7	4	2	1	<b>37%</b>
<b>Soma</b>	4,84	23,33	28,00	10,40	8,40	2,37	

Da análise realizada, destaca-se a produtividade como o critério com maior peso relativo de 37%, seguida do impacto económico com 28%, e da qualidade com 15%. Estes resultados refletem a orientação da empresa para soluções que contribuam para ganhos operacionais concretos e para o retorno do investimento. Os restantes critérios inovação, impacto ambiental e impacto social têm pesos inferiores, contudo, continuam a ser considerados relevantes numa perspetiva de sustentabilidade.

#### 4.1.3. Matriz de Preferências Alternativas

Após a definição dos pesos dos critérios e a aplicação das funções de preferência, o passo seguinte da MCDA consiste na construção da matriz de preferência entre alternativas. Esta etapa permite analisar o comportamento relativo de cada alternativa em comparação com as outras, em função de cada critério de decisão previamente estabelecido. A partir desta fase aplica-se o método PROMETHEE.

No presente caso de estudo, foi utilizada a função de preferência linear (*Usual*) para todos os critérios. Esta função assume um comportamento binário, atribuindo o valor 0 caso não exista preferência (diferença não significativa entre alternativas) ou o valor 1 caso exista uma diferença considerada relevante pelo decisor. Esta função é particularmente adequada quando os critérios apresentam dados objetivos com margens de comparação claras.

Para cada comparação entre alternativas  $a_i$  e  $a_n$ , é calculada a diferença de desempenho para cada critério, designada por  $d_j(a_i, a_n)$ . A partir dessa diferença, é determinado o grau de preferência parcial  $P_j(a_i, a_n)$ , que representa a intensidade da preferência no critério  $j$ . De seguida, os valores parciais são agregados através da ponderação dos critérios, utilizando os pesos  $w_j$ , resultando no índice de preferência global agregado  $\pi(a_i, a_n)$ .

Nas Tabela 18, Tabela 19, Tabela 20, Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23, encontram-se os resultados das comparações efetuadas entre as diferentes alternativas consideradas neste estudo (A1, A2 e A3). Para cada par de alternativas, são indicados o critério considerado, o tipo de função utilizada, o valor da diferença  $d_j$ , o grau de preferência parcial  $P_j$  e o valor agregado  $\pi$ . Estas informações permitem compreender, de forma detalhada, como se constrói a matriz de preferências e de que forma as alternativas se comparam entre si.

Tabela 18 Matriz preferência: A1 vs A2

Alternativa $i$	Alternativa $n$	Critério	Tipo de Função	Diferença $d_j$	$P_j(a_i, a_n)$	$\pi(a_i, a_n)$
A1	A2	Critério 1	Usual	-241074,98	0	0,00

A1	A2	Critério 2	Usual	330,659	1	0,05
A1	A2	Critério 3	Usual	-2	0	0,00
A1	A2	Critério 4	Usual	-3	0	0,00
A1	A2	Critério 5	Usual	-4	0	0,00
A1	A2	Critério 6	Usual	-53,7	0	0,00

Tabela 19 Matriz preferência: A1 vs A3

Alternativa $i$	Alternativa $n$	Critério	Tipo de Função	Diferença $d_j$	$P_j(a_i, a_n)$	$\pi(a_i, a_n)$
A1	A3	Critério 1	Usual	-327603,81	0	0,00
A1	A3	Critério 2	Usual	251,6	1	0,05
A1	A3	Critério 3	Usual	0	1	0,03
A1	A3	Critério 4	Usual	-2	0	0,00
A1	A3	Critério 5	Usual	-3	0	0,00
A1	A3	Critério 6	Usual	-292	0	0,00

Tabela 20 Matriz preferência: A2 vs A1

Alternativa $i$	Alternativa $n$	Critério	Tipo de Função	Diferença $d_j$	$P_j(a_i, a_n)$	$\pi(a_i, a_n)$
A2	A1	Critério 1	Usual	241074,98	1	0,28
A2	A1	Critério 2	Usual	-330,659	0	0,00
A2	A1	Critério 3	Usual	2	1	0,03
A2	A1	Critério 4	Usual	3	1	0,13
A2	A1	Critério 5	Usual	4	1	0,15
A2	A1	Critério 6	Usual	53,7	1	0,37

## Resultados e Discussão

Tabela 21 Matriz preferência: A2 vs A3

Alternativa $i$	Alternativa $n$	Critério	Tipo de Função	Diferença $d_j$	$P_j(a_i, a_n)$	$\pi(a_i, a_n)$
A2	A3	Critério 1	Usual	-86528,83	0	0,00
A2	A3	Critério 2	Usual	-79,059	0	0,00
A2	A3	Critério 3	Usual	2	1	0,03
A2	A3	Critério 4	Usual	1	1	0,13
A2	A3	Critério 5	Usual	1	1	0,15
A2	A3	Critério 6	Usual	-238,3	0	0,00

Tabela 22 Matriz preferência: A3 vs A1

Alternativa $i$	Alternativa $n$	Critério	Tipo de Função	Diferença $d_j$	$P_j(a_i, a_n)$	$\pi(a_i, a_n)$
A3	A1	Critério 1	Usual	327603,81	1	0,28
A3	A1	Critério 2	Usual	-251,6	0	0,00
A3	A1	Critério 3	Usual	0	1	0,03
A3	A1	Critério 4	Usual	2	1	0,13
A3	A1	Critério 5	Usual	3	1	0,15
A3	A1	Critério 6	Usual	292	1	0,37

Tabela 23 Matriz preferência: A3 vs A2

Alternativa $i$	Alternativa $n$	Critério	Tipo de Função	Diferença $d_j$	$P_j(a_i, a_n)$	$\pi(a_i, a_n)$
A3	A2	Critério 1	Usual	86528,83	1	0,28
A3	A2	Critério 2	Usual	79,059	1	0,05
A3	A2	Critério 3	Usual	-2	0	0,00
A3	A2	Critério 4	Usual	-1	0	0,00
A3	A2	Critério 5	Usual	-1	0	0,00

A3	A2	Critério 6	Usual	238,3	1	0,37
----	----	------------	-------	-------	---	------

Estas matrizes constituem, assim, a base quantitativa para a etapa seguinte do método *PROMETHEE*, onde serão calculados os fluxos de preferência e o ranking final das alternativas.

#### 4.1.4. *PROMETHEE I*

O método *PROMETHEE I* permite estabelecer uma relação de preferência parcial entre alternativas, com base no cálculo dos fluxos positivos ( $\phi^+$ ) e negativos ( $\phi^-$ ). Estes dois indicadores representam, respetivamente, o grau de dominância de cada alternativa sobre as restantes e o grau de dominância das restantes alternativas sobre a alternativa em questão.

A comparação entre estes dois fluxos permite identificar relações de preferência e situações de incomparabilidade. No entanto, o *PROMETHEE I* não estabelece uma ordenação total, mas sim parcial. A Tabela 24 apresenta os resultados dos fluxos positivos e negativos obtidos para as três alternativas consideradas no presente estudo:

*Tabela 24 Resultados do PROMETHEE I*

Alternativa	Fluxo Positivo $\phi^+$	Fluxo Negativo $\phi^-$
<b>A1</b>	0,06	0,95
<b>A2</b>	0,63	0,37
<b>A3</b>	0,82	0,19

A análise dos valores apresentados na Tabela 24, permite concluir que:

- A alternativa A3 apresenta o maior fluxo positivo (0,82) e o menor fluxo negativo (0,19), o que indica que é a alternativa com maior dominância global sobre as demais
- A alternativa A2 apresenta valores equilibrados (0,63 positivo e 0,37 negativo), o que demonstra um desempenho competitivo, embora inferior ao da alternativa A3.
- A alternativa A1, por outro lado, revela um desempenho significativamente inferior, com o menor fluxo positivo (0,06) e o maior fluxo negativo (0,95), o que sugere fraca dominância e forte dominância das outras alternativas sobre ela.

## 4.2. Discussão de resultados

No sentido de obter uma ordenação total das alternativas, foi aplicado o método PROMETHEE II, que calcula o fluxo líquido global ( $\phi$ ) para cada alternativa. Este valor resulta da diferença entre o fluxo positivo ( $\phi^+$ ) e o fluxo negativo ( $\phi^-$ ).

Os valores obtidos são ilustrados graficamente na Figura 17:

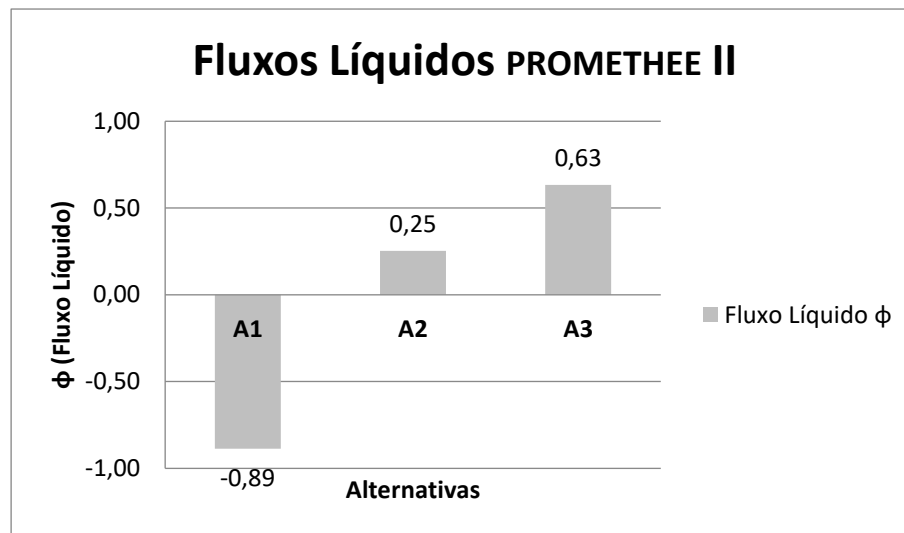


Figura 17 Resultados do PROMETHEE II

A análise dos fluxos líquidos permite estabelecer uma ordenação completa das alternativas, que reflete o seu desempenho global tendo em conta todos os critérios e os respetivos pesos atribuídos no modelo. O *ranking* resultante indica que:

- **A3 - Investimento na Substituição de Ferramentas Pneumáticas para Elétricas:** apresenta o melhor desempenho global, com um fluxo líquido de 0,63. Este valor indica que a alternativa domina significativamente as restantes, sendo preferida pelo modelo multicritério em grande parte das comparações.
- **A2 – Investimento na Digitalização do Processo Produtivo da Montagem:** ocupa a segunda posição, com um fluxo líquido positivo (0,25), demonstrando uma performance favorável, embora inferior à de A3.
- **A1 – Investimento em Fontes de Energia Renovável que Permita Abastecer as Necessidades Totais da Linha de Montagem:** surge em último lugar, com um fluxo líquido negativo (-0,89), o que reflete um desempenho global mais fraco face às outras alternativas.

Esta ordenação está alinhada com os resultados obtidos nas etapas anteriores, nomeadamente com os fluxos positivos e negativos do PROMETHEE I. A alternativa A3 destaca-se por apresentar uma combinação sólida de vantagens económicas, melhorias em termos de produtividade e um impacto positivo na qualidade, dimensões com maior peso na estrutura de decisão definida.

Por outro lado, A1, embora relevante do ponto de vista ambiental, é penalizada pelos custos elevados de investimento e pela menor contribuição direta para a produtividade e inovação do

processo. A2 surge como uma solução equilibrada, mas que não tem o impacto transformador de A3.

Os resultados reforçam, assim, a coerência interna do modelo de decisão e validam a alternativa A3 como a mais robusta e alinhada com os objetivos estratégicos de sustentabilidade e eficiência definidos para o processo de montagem da empresa RTE, S.A.

### 4.3. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade tem como principal objetivo avaliar o nível de robustez dos resultados obtidos através do método PROMETHEE face a possíveis variações na ponderação atribuída a cada critério. Trata-se de uma etapa essencial em qualquer processo de apoio multicritério à decisão, na medida em que permite compreender em que medida as preferências do decisor e as incertezas associadas à atribuição de pesos podem influenciar a ordenação das alternativas. Esta abordagem contribui para validar a consistência dos resultados obtidos e identificar zonas de instabilidade em que pequenas variações no peso de um critério possam alterar significativamente a classificação final.

Esta análise de sensibilidade foi realizada no Microsoft Excel, onde foram simuladas variações do peso de cada critério individualmente, entre 0% e 90%, em intervalos de 10%, mantendo-se os restantes pesos redistribuídos proporcionalmente. Para cada variação, foi calculado o novo fluxo líquido das alternativas e o respetivo ranking, o que permitiu observar as mudanças no desempenho relativo das opções consideradas.

Serão agora apresentadas as análises de sensibilidade realizadas para cada critério, individualmente, com a respetiva representação gráfica e discussão dos seus impactos nos resultados obtidos.

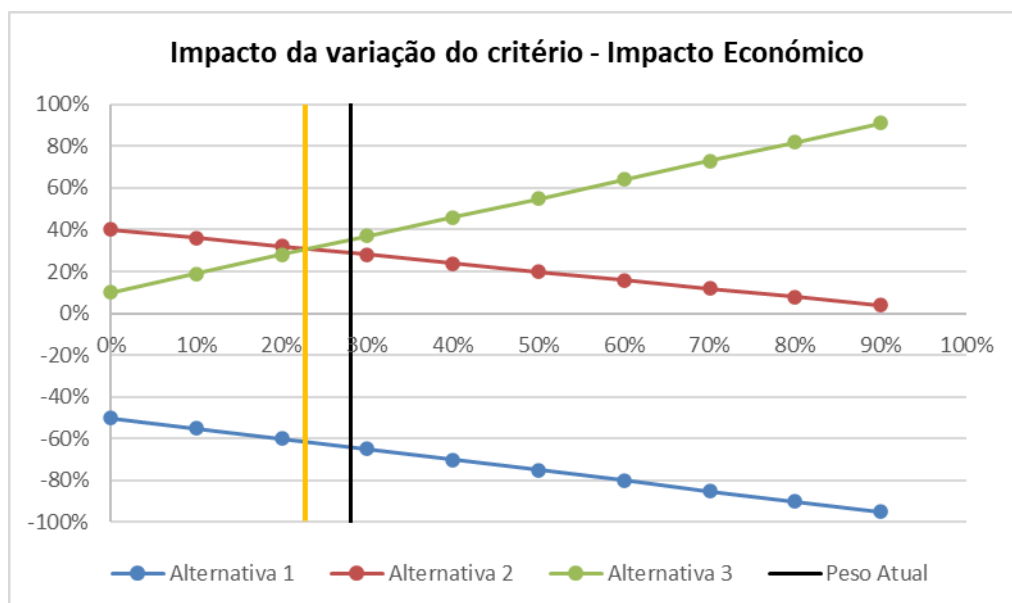


Figura 18 Impacto da variação do critério - Impacto Económico

## Resultados e Discussão

A análise de sensibilidade ao critério de Impacto Económico, representada na Figura 18, evidencia uma elevada influência deste critério no resultado final. A alternativa A3 apresenta um aumento consistente no fluxo líquido à medida que o peso económico cresce. Já a alternativa A2 perde relevância progressivamente. A interseção entre A2 e A3 (representada pela linha vertical a amarelo) ocorre sensivelmente aos 23%, ponto a partir do qual A3 lidera o ranking.

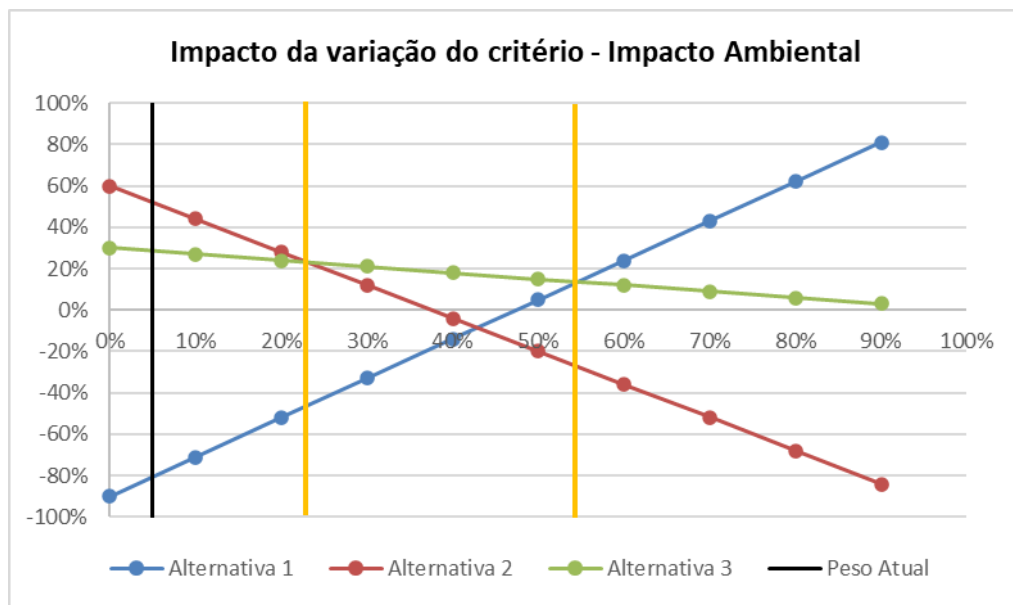


Figura 19 Impacto da variação do critério - Impacto Ambiental

No que se refere ao critério de impacto ambiental, através da Figura 19, verifica-se um comportamento inverso ao anterior. A alternativa A1 beneficia claramente com o aumento do impacto ambiental, liderando o ranking a partir dos 55% (linha vertical amarela), superando a alternativa A3. No entanto, a variação da ponderação do critério demonstra que, antes dos 23% (linha vertical amarela), a alternativa A2 lidera, e a partir dos 23%, a alternativa A3 lidera o ranking. Este critério revela ser determinante para estratégias com foco na sustentabilidade ambiental.

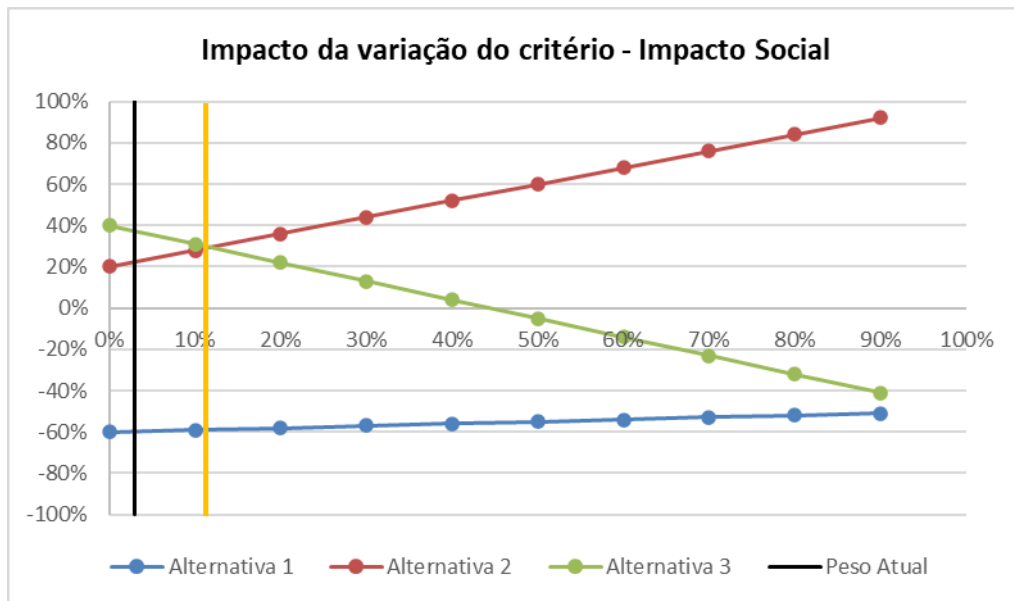


Figura 20 Impacto da variação do critério - Impacto Social

O critério de impacto social (Figura 20) mostra que a alternativa A2 passa a liderar o ranking logo com pesos acima de 10% (linha vertical amarela), ultrapassando a alternativa A3, que inicialmente apresenta um melhor desempenho. A alternativa A1 mantém um desempenho reduzido, sem impacto relevante na liderança. A alternativa A2 revela ser significativamente valorizada neste critério.

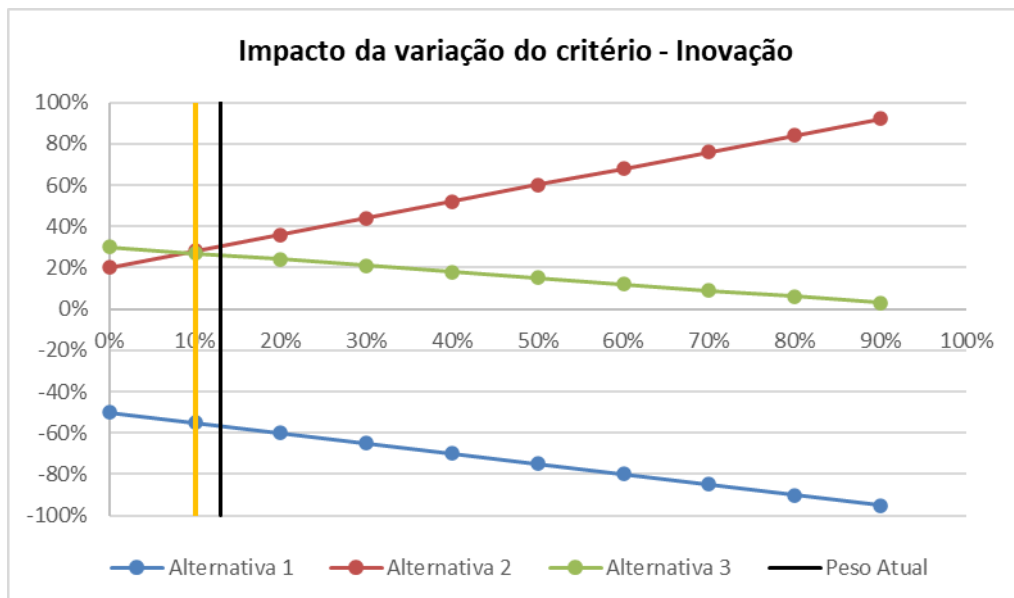


Figura 21 Impacto da variação do critério - Inovação

Relativamente ao critério de Inovação, através da Figura 21, verifica-se que alternativa A2 obtém uma vantagem clara sobre as restantes alternativas para qualquer peso superior a 10% (linha vertical amarela), consolidando a sua posição como a opção mais inovadora. As restantes alternativas não sofrem alterações significativas.

## Resultados e Discussão

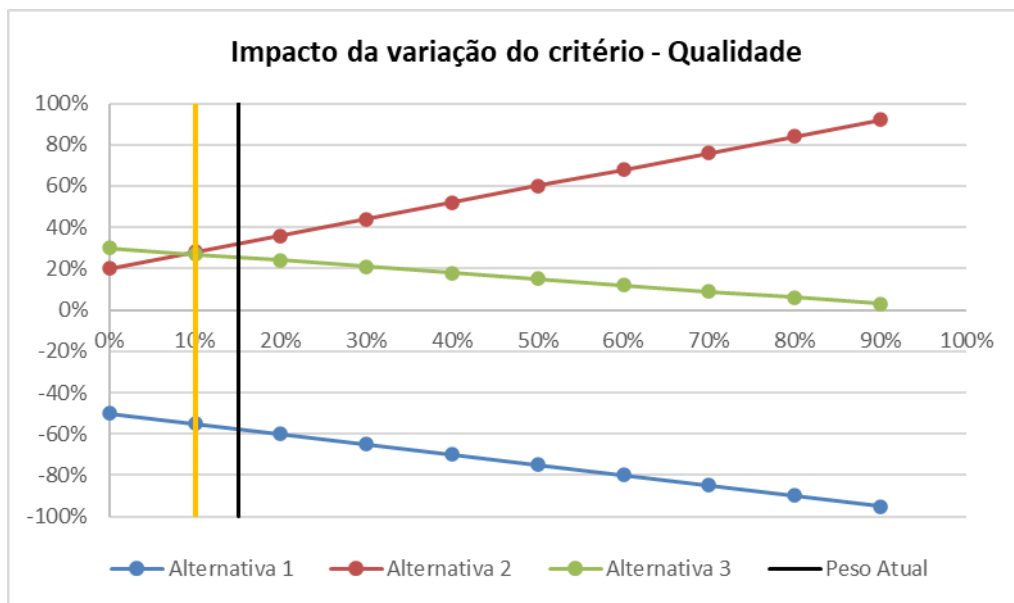


Figura 22 Impacto da variação do critério - Qualidade

No critério Qualidade (Figura 22), a alternativa A2 volta a destacar-se positivamente, atingindo a liderança à medida que o peso aumenta progressivamente. A3 perde influência ao longo do intervalo e A1 não tem qualquer relevância neste critério.

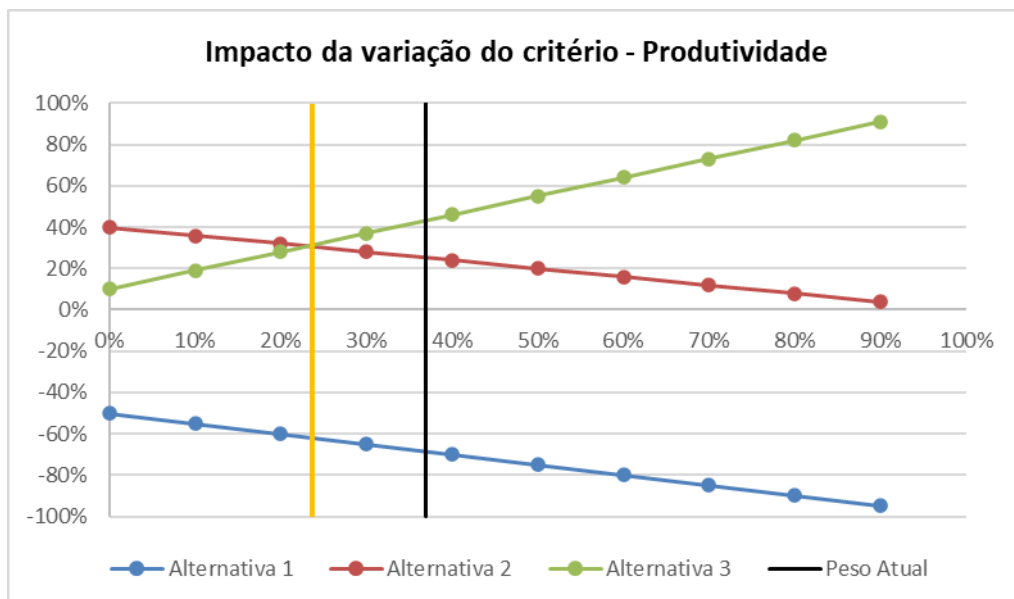


Figura 23 Impacto da variação do critério - Produtividade

A análise ao critério de produtividade, representada na Figura 23, confirma o forte impacto da alternativa A3, que lidera claramente com o aumento do peso associado. A interseção entre a alternativa A2 e a alternativa A3 (linha vertical amarela) ocorre por volta dos 25%, demonstrando que a alternativa A3 é a opção mais eficaz em termos de eficiência operacional.

A análise de sensibilidade permitiu verificar a robustez dos resultados obtidos, destacando a alternativa A3 como a mais vantajosa em termos globais, sobretudo nos critérios económico e produtivo. No entanto, revelou também que a alternativa A2 poderia ser preferível em

contextos onde a inovação, qualidade ou o impacto social sejam mais valorizados, realçando a importância da adaptação dos pesos à estratégia da organização.

## Resultados e Discussão

## 5. Conclusão

Este capítulo tem como principal objetivo apresentar uma síntese final dos resultados alcançados ao longo deste trabalho, integrando as principais observações, reflexões e contributos obtidos com a aplicação da MCDA no contexto da sustentabilidade industrial.

Num primeiro momento, são destacadas as conclusões finais mais relevantes, resultantes da análise dos dados e da comparação entre as alternativas estratégicas avaliadas. De seguida, são discutidas as limitações identificadas durante o desenvolvimento do estudo, bem como propostas para trabalhos futuros, com vista a ampliar e aprofundar as possibilidades de investigação nesta área.

### 5.1. Conclusões finais

Esta dissertação teve como principal objetivo avaliar estratégias de melhoria da sustentabilidade numa linha de montagem de bicicletas, recorrendo à MCDA, nomeadamente o método AHP na fase de estruturação do problema e o método PROMETHEE para as restantes fases da MCDA.

A revisão da literatura permitiu consolidar conhecimentos fundamentais sobre sustentabilidade em processos industriais e sobre a aplicação da MCDA como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Constatou-se que a integração entre estas duas áreas tem vindo a adquirir crescente importância, ao permitir a consideração simultânea de critérios ambientais, económicos e sociais. Foram igualmente explorados indicadores de sustentabilidade, desafios operacionais e tecnologias que aumentam a eficiência e a responsabilidade ambiental nas operações industriais. No que se refere à metodologia MCDA, a literatura reforçou a sua importância em contextos de decisão complexos, nos quais é necessário equilibrar múltiplos critérios e interesses. A estruturação formal do problema, a definição de critérios e a análise comparativa entre alternativas revelaram-se etapas essenciais para garantir decisões robustas e coerentes.

Neste enquadramento, o caso de estudo permitiu aplicar a metodologia híbrida AHP-PROMETHEE à avaliação de três alternativas estratégicas com impacto na sustentabilidade da linha de montagem da empresa RTE, S.A. Através da definição de critérios quantitativos e qualitativos, como o impacto económico, ambiental, social, a inovação, a qualidade e a produtividade, foi possível estabelecer uma hierarquia das alternativas de acordo com o seu desempenho global.

## Conclusão

Os resultados obtidos através do PROMETHEE II evidenciaram que a alternativa A3 (investimento na substituição de ferramentas pneumáticas para elétricas) apresentou o melhor desempenho global, com um fluxo líquido positivo de 0,63, demonstrando ganhos significativos em termos de produtividade, qualidade e impacto ambiental. A alternativa (investimento na digitalização do processo produtivo da montagem) revelou um desempenho equilibrado e um elevado potencial de inovação, o que se traduziu num fluxo líquido de 0,25. Por sua vez, a alternativa A1 (investimento em fontes de energia renovável que permita abastecer as necessidades totais da linha de montagem) ficou em terceiro lugar, penalizada pelos elevados custos de investimento e por um impacto mais limitado nas dimensões operacionais, tendo obtido um fluxo líquido de -0,89.

Adicionalmente, a análise de sensibilidade permitiu avaliar a robustez das conclusões obtidas. Constatou-se que a alternativa A3 continua a ser a mais vantajosa para os pesos atualmente atribuídos aos critérios de impacto económico (28%), impacto social (3%) e produtividade (37%), reforçando a sua solidez como solução preferencial. No entanto, verificou-se que a alternativa A2 pode tornar-se preferível em cenários em que os critérios de impacto social, inovação ou qualidade assumam maior importância. Estes resultados evidenciam a importância de alinhar os pesos atribuídos com as prioridades estratégicas da organização, permitindo uma decisão mais ajustada à realidade e aos objetivos da empresa.

A aplicação da metodologia permitiu à empresa obter uma visão clara e estruturada das consequências de cada alternativa, o que a ajudou a tomar decisões com base em critérios técnicos e estratégicos. A ferramenta revelou-se eficaz na identificação da solução que melhor se alinha com os objetivos de sustentabilidade e eficiência da organização.

Em suma, esta dissertação contribuiu para demonstrar o potencial da MCDA, e em particular do método híbrido AHP-PROMETHEE, na escolha de estratégias sustentáveis em ambientes industriais. Os conhecimentos adquiridos ao longo do trabalho constituem uma base sólida para futuras aplicações da metodologia em contextos semelhantes e para aprofundar a integração entre a análise multicritério e a sustentabilidade industrial.

## 5.2. Limitações e trabalhos futuros

Apesar dos contributos relevantes obtidos com a realização deste trabalho, é importante reconhecer algumas limitações que poderão ser superadas em estudos futuros. A primeira limitação prende-se com o número de alternativas estratégicas consideradas, que, embora representativas da realidade da empresa RTE, S.A., não abrangem todas as possibilidades de melhoria no domínio da sustentabilidade industrial. A inclusão de um leque mais alargado de alternativas poderia enriquecer a análise e ampliar o espectro de soluções avaliadas.

Adicionalmente, a definição dos critérios e respetivos pesos foi realizada com base em dados reais e com a participação da administração da empresa, mas este processo está naturalmente sujeito a subjetividade e à perspectiva de um grupo restrito de decisores. A inclusão de outras partes interessadas, como operadores, engenheiros ou especialistas em sustentabilidade,

## Conclusão

permitiria obter uma visão mais abrangente e participativa, aumentando a solidez das ponderações atribuídas.

Outra limitação está relacionada com a natureza estática da análise multicritério efetuada. Os dados utilizados refletem uma realidade num momento específico, não contemplando a evolução futura dos custos, benefícios ou impacto das estratégias analisadas. Estudos futuros poderão incorporar modelos dinâmicos que considerem variações ao longo do tempo, nomeadamente no que respeita a custos de energia, manutenção, adoção tecnológica ou regulamentações ambientais.

Em termos metodológicos, a adoção de uma abordagem híbrida, que integrou os métodos AHP e PROMETHEE, revelou-se adequada e eficaz para estruturar o problema e avaliar as alternativas estratégicas em estudo. A utilização do AHP permitiu captar as preferências da administração de forma estruturada na atribuição dos pesos aos critérios, enquanto o PROMETHEE possibilitou uma análise robusta do desempenho das alternativas. No entanto, em trabalhos futuros, seria pertinente realizar uma comparação entre diferentes métodos MCDA, como o ELECTRE ou o TOPSIS, com o objetivo de validar a consistência dos resultados obtidos e de analisar a sensibilidade das decisões em função da metodologia adotada. Adicionalmente, poderão ser exploradas outras configurações de métodos híbridos, incluindo abordagens fuzzy, que aumentem a flexibilidade e a precisão na modelação da incerteza e da subjetividade inerentes ao processo de tomada de decisão. Esta evolução metodológica contribuiria para tornar a avaliação de estratégias mais robusta e adaptada à complexidade dos contextos industriais.

Por fim, é recomendável o desenvolvimento de ferramentas automatizadas ou *dashboards* interativos que permitam à empresa aplicar a lógica da decisão multicritério de forma recorrente e flexível, sempre que surjam novas estratégias ou os contextos de operação se alterem. A digitalização do processo de decisão reforçaria a agilidade e a transparência na aplicação de medidas sustentáveis.

Em suma, este trabalho oferece um ponto de partida robusto para a aplicação estruturada da MCDA em contextos industriais, no entanto as limitações identificadas não comprometem a validade dos resultados, mas apontam caminhos relevantes para aprofundar a abordagem proposta em futuras investigações ou aplicações práticas.

## Conclusão

## Referências

- Abdulla, A., & Baryannis, G. (2024). A hybrid multi-criteria decision-making and machine learning approach for explainable supplier selection. *Supply Chain Analytics*, 7, 100074. <https://doi.org/10.1016/J.SCA.2024.100074>
- Alexopoulos, D. K., Anastasiadis, A. G., Kaminaris, S. D., Vokas, G. A., & Psomopoulos, C. S. (2022). Assessing flexibility options in power systems using Fuzzy Logic and AHP methods. *Energy Reports*, 8, 776–791. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.07.079>
- APA - Agência Portuguesa do Ambiente. (2024). In *Fator de Emissão da Eletricidade 2024*. APA. [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_Clima/Inventarios/FE\\_GEE\\_Eletricidade\\_2024\\_final.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Inventarios/FE_GEE_Eletricidade_2024_final.pdf)
- Azapagic, A., & Perdan, S. (2000). Indicators of Sustainable Development for Industry: A General Framework. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(4), 243–261. <https://doi.org/10.1205/095758200530763>
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., & Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198–215. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2009.01.021>
- Brans, J. P., Vincke, Ph., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The Promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228–238. [https://www.academia.edu/29731589/How\\_to\\_select\\_and\\_how\\_to\\_rank\\_projects\\_The\\_Promethee\\_method](https://www.academia.edu/29731589/How_to_select_and_how_to_rank_projects_The_Promethee_method)
- Brans, J.-P., & Mareschal, B. (2005). Promethee Methods. *International Series in Operations Research and Management Science*, 78, 163–186. [https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5\\_5](https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_5)
- Campos-Guzmán, V., García-Cáscales, M. S., Espinosa, N., & Urbina, A. (2019). Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 343–366. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.01.031>
- Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 46, 138–148. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2014.06.011>
- DecisionLab - Pricing Structure. (n.d.). Retrieved May 18, 2025, from <https://www.decisionlab.se/pricing.html>
- Dietz, S., Irwin, W., Raus, B., Jahn, V., & Noels, J. (2019). *Carbon Performance Assessment of Paper Producers: Methodology Note*. <http://www.transitionpathwayinitiative.org>.
- Dodgson, J. S., Spackman, M., Pearman, A., & Phillips, L. D. (2009). Multi-criteria analysis: a manual. *Appraisal*, 11(1–3), 16. <https://doi.org/10.1002/mcda.399>
- Dyllick, T., & Hockerts, K. (2002). BEYOND THE BUSINESS CASE FOR CORPORATE SUSTAINABILITY. *Business Strategy and the Environment Bus. Strat. Env*, 11, 130–141. <https://doi.org/10.1002/bse.323>

## Referências

- Elemure, I., Dhakal, H. N., Leseure, M., & Radulovic, J. (2023). Integration of Lean Green and Sustainability in Manufacturing: A Review on Current State and Future Perspectives. *Sustainability 2023*, Vol. 15, Page 10261, 15(13), 1–25. <https://doi.org/10.3390/SU151310261>
- Energy Agency, I. (2021). Energy Efficiency 2021. *International Energy Agency*. [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/)
- Epstein, M. J., Buhovac, A. R., Elkington, J., & Leonard, H. B. D. (2017). Making sustainability work: Best practices in managing and measuring corporate social, environmental and economic impacts. *Making Sustainability Work: Best Practices in Managing and Measuring Corporate Social, Environmental and Economic Impacts*, 1–305. <https://doi.org/10.4324/9781351276443/MAKING-SUSTAINABILITY-WORK-MARC-EPSTEIN-ADRIANA-REJC-BUHOVAC-JOHN-ELKINGTON-HERMAN-DUTCH-LEONARD>
- Ferramentas eletricas para o ambito profissional | FEIN POWER TOOLS IBERICA, S.L.U.* (n.d.). Retrieved May 17, 2025, from [https://fein.com/pt\\_pt/](https://fein.com/pt_pt/)
- Garza-Reyes, J. A. (2015). Lean and green – a systematic review of the state of the art literature. *Journal of Cleaner Production*, 102, 18–29. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.04.064>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017a). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017b). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048>
- Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 1–29. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2015.07.019>
- Gupta, P., Mehlawat, M. K., & Ahemad, F. (2023). Selection of renewable energy sources: a novel VIKOR approach in an intuitionistic fuzzy linguistic environment. *Environment, Development and Sustainability*, 25(4), 3429–3467. <https://doi.org/10.1007/S10668-022-02172-2/METRICS>
- Hacking, T., & Guthrie, P. (2008). A framework for clarifying the meaning of Triple Bottom-Line, Integrated, and Sustainability Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(2–3), 73–89. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2007.03.002>
- IRENA – International Renewable Energy Agency. (2023). Custos Da Produção de Energia Renovável Em 2023. <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023-PT>
- Ishizaka, A., & Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14336–14345. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2011.04.143>
- JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. (n.d.). Retrieved May 3, 2025, from [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)
- Kant, R., & Kant, R. (2011). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Natural Science*, 4(1), 22–26. <https://doi.org/10.4236/NS.2012.41004>
- Keisler, J. M., & Linkov, I. (2021). Use and Misuse of MCDA to Support Decision Making Informed by Risk. *Risk Analysis*, 41(9), 1513–1521. <https://doi.org/10.1111/RISA.13631>
- Khalili, N. R., & Duecker, S. (2013). Application of multi-criteria decision analysis in design of sustainable environmental management system framework. *Journal of Cleaner Production*, 47, 188–198. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2012.10.044>

## Referências

- Klewitz, J., & Hansen, E. G. (2014). Sustainability-oriented innovation of SMEs: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, *65*, 57–75. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.07.017>
- Kolk, A., & Pinkse, J. (2005). Business responses to climate change: Identifying emergent strategies. *California Management Review*, *47*(3). <https://doi.org/10.2307/41166304>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, *143*, 37–46. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2017.06.041>
- Kowalski, K., Stagl, S., Madlener, R., & Omann, I. (2009). Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis. *European Journal of Operational Research*, *197*(3), 1063–1074. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2007.12.049>
- Kumar, P., Singh, R. K., & Kumar, V. (2021). Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. *Resources, Conservation and Recycling*, *164*, 105215. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105215>
- Labuschagne, C., Brent, A. C., & Van Erck, R. P. G. (2005). Assessing the sustainability performances of industries. *Journal of Cleaner Production*, *13*(4), 373–385. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2003.10.007>
- Liao, H., & Xu, Z. (2014). Multi-criteria decision making with intuitionistic fuzzy PROMETHEE. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, *27*(4), 1703–1717. <https://doi.org/10.3233/IFS-141137>
- Linkov, I., Satterstrom, F. K., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T., & Ferguson, E. (2006). From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. *Environment International*, *32*(8), 1072–1093. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2006.06.013>
- Macharis, C., Springael, J., De Brucker, K., & Verbeke, A. (2004). PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis.: Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP. *European Journal of Operational Research*, *153*(2), 307–317. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00153-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00153-X)
- Marimuthu, R., Sankaranarayanan, B., Ali, S. M., Jabbour, A. B. L. de S., & Karuppiah, K. (2021). Assessment of key socio-economic and environmental challenges in the mining industry: Implications for resource policies in emerging economies. *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 814–830. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.02.005>
- Matos, I. D. C., Gomes Costa, H., Roboredo, M., & Lima, D. (2024). Refining the PROMETHEE-scoring method: Propositions and an economic freedom assessment. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, *31*(3–4). <https://doi.org/10.1002/MCDA.1835>
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2002). Sustainable Bio-Composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment*, *10*(1–2), 19–26. <https://doi.org/10.1023/A:1021013921916/METRICS>
- Oliveira, M., Fontes, D. B. M. M., & Pereira, T. (2018). Evaluating vehicle painting plans in an automobile assembly plant using an integrated AHP-PROMETHEE approach. *International Transactions in Operational Research*, *25*(4), 1383–1406. <https://doi.org/10.1111/ITOR.12179;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:14753995;WGROU P:STRING:PUBLICATION>
- Oliveira Neto, G. C. de, Pinto, L. F. R., Amorim, M. P. C., Giannetti, B. F., & Almeida, C. M. V. B. de. (2018). A framework of actions for strong sustainability. *Journal of Cleaner Production*, *196*, 1629–1643. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.067>

## Referências

- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, *156*(2), 445–455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Ouria, M., Delgado, J., Moura, P., & de Almeida, A. T. (2023). Multi-criteria decision-making in decarbonizing urban transportation systems: A case study from Tabriz-Iran. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *122*, 103854. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2023.103854>
- Ozdemir, M. S., & Saaty, T. L. (2006). The unknown in decision making: What to do about it. *European Journal of Operational Research*, *174*(1), 349–359. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2004.12.017>
- Pandey, V., Komal, & Dincer, H. (2023). A review on TOPSIS method and its extensions for different applications with recent development. *Soft Computing*, *27*(23), 18011–18039. <https://doi.org/10.1007/S00500-023-09011-0/TABLES/10>
- Paradowski, B., Shekhovtsov, A., Sałabun, W., Baczkiewicz, A., & Kizielewicz, B. (2021). Similarity Analysis of Methods for Objective Determination of Weights in Multi-Criteria Decision Support Systems. *Symmetry* 2021, Vol. 13, Page 1874, *13*(10), 1874. <https://doi.org/10.3390/SYM13101874>
- Podvezko, V. (2009). Application of AHP technique. *Journal of Business Economics and Management*, *10*(2), 181–189. <https://doi.org/10.3846/1611-1699.2009.10.181-189>
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, *15*(1), 281–299. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2011.01.007>
- Subramanian, N., & Ramanathan, R. (2012). A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management. *International Journal of Production Economics*, *138*(2), 215–241. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2012.03.036>
- Sustainable Development Goals | United Nations Development Programme*. (2024). United Nations Development Programme. <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). A Comprehensive Overview of the ELECTRE Method in Multi Criteria Decision-Making. *Journal of Management Science & Engineering Research*, *6*(2), 5–16. <https://doi.org/10.30564/JMSER.V6I2.5637>
- Thokala, P., Devlin, N., Marsh, K., Baltussen, R., Boysen, M., Kalo, Z., Longrenn, T., Mussen, F., Peacock, S., Watkins, J., & Ijzerman, M. (2016). Multiple Criteria Decision Analysis for Health Care Decision Making—An Introduction: Report 1 of the ISPOR MCDA Emerging Good Practices Task Force. *Value in Health*, *19*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.JVAL.2015.12.003>
- Torfi, F., Farahani, R. Z., & Rezapour, S. (2010). Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives. *Applied Soft Computing*, *10*(2), 520–528. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2009.08.021>
- Tripathi, S., Bachmann, N., Brunner, M., Rizk, Z., & Jodlbauer, H. (2024). Assessing the current landscape of AI and sustainability literature: identifying key trends, addressing gaps and challenges. *Journal of Big Data* 2024 11:1, *11*(1), 1–68. <https://doi.org/10.1186/S40537-024-00912-X>
- Turcksin, L., Bernardini, A., & Macharis, C. (2011). A combined AHP-PROMETHEE approach for selecting the most appropriate policy scenario to stimulate a clean vehicle fleet. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *20*, 954–965. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2011.08.104>
- UNEP. (2019). Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People. *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. <https://doi.org/10.1017/9781108627146>

## Referências

- Unger, M., & Radgen, P. (2017). *Energy Efficiency in Compressed Air Systems – A review of energy efficiency potentials, technological development, energy policy actions and future importance*.  
[https://www.researchgate.net/publication/323019150\\_Energy\\_Efficiency\\_in\\_Compressed\\_Air\\_Systems\\_-\\_A\\_review\\_of\\_energy\\_efficiency\\_potentials\\_technological\\_development\\_energy\\_policy\\_actions\\_and\\_future\\_importance](https://www.researchgate.net/publication/323019150_Energy_Efficiency_in_Compressed_Air_Systems_-_A_review_of_energy_efficiency_potentials_technological_development_energy_policy_actions_and_future_importance)
- Velasquez, M., & Thomas Hester, P. (2013). An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), 56–66.  
[https://www.researchgate.net/publication/275960103\\_An\\_analysis\\_of\\_multi-criteria\\_decision\\_making\\_methods](https://www.researchgate.net/publication/275960103_An_analysis_of_multi-criteria_decision_making_methods)
- Veleva, V., & Ellenbecker, M. (2001). Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*, 9(6), 519–549.  
[https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00010-5](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00010-5)
- Wang, Y. J., & Lee, H. S. (2007). Generalizing TOPSIS for fuzzy multiple-criteria group decision-making. *Computers & Mathematics with Applications*, 53(11), 1762–1772.  
<https://doi.org/10.1016/J.CAMWA.2006.08.037>
- Wang, Y., & Yang, Y. (2021). Analyzing the green innovation practices based on sustainability performance indicators: a Chinese manufacturing industry case. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 1181–1203. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-10531-7/TABLES/27>
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development*.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildiene, S. (2014). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(1), 165–179. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>

## Referências

# Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: João Pedro Fernandes Martins

ISEP, Porto, 14 de Junho de 2025



# Apêndice A – Análise Bibliométrica

## VOSviewer

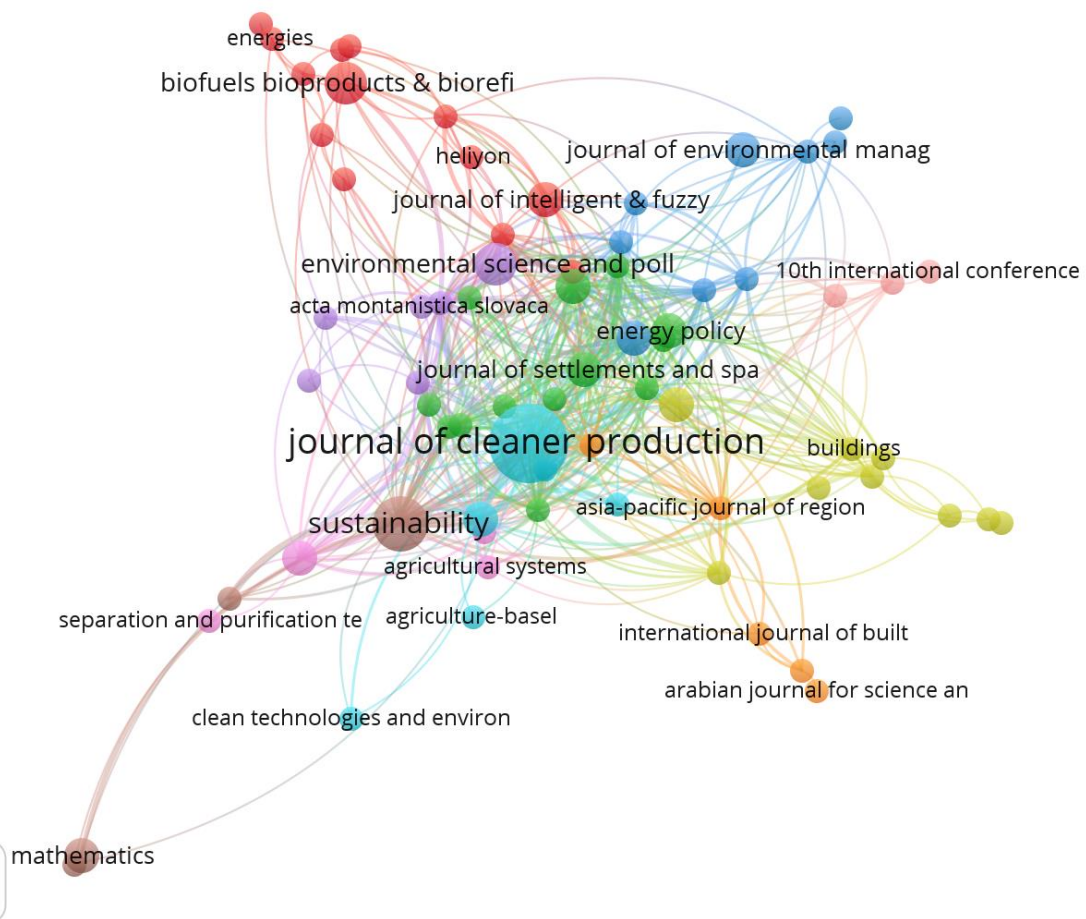


Figura 24 Análise Bibliométrica das Fontes Bibliográficas



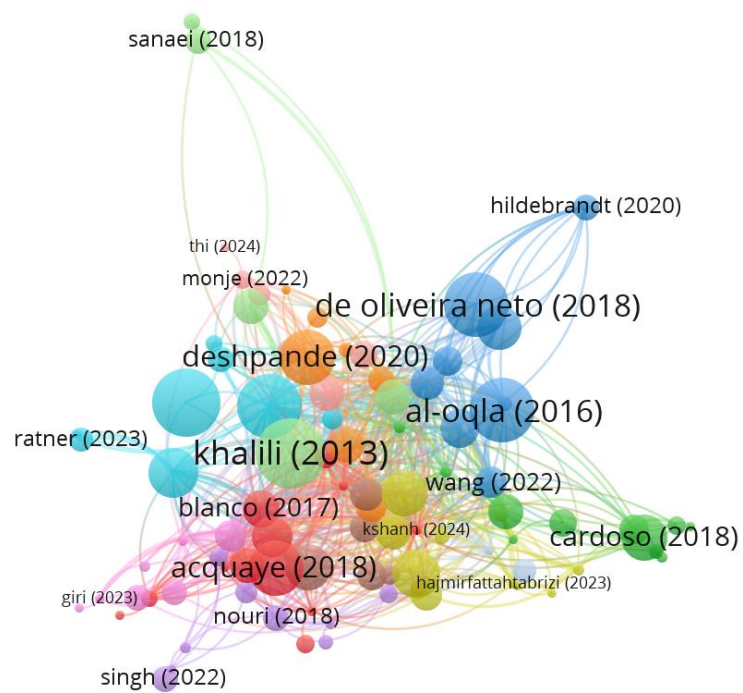


Figura 26 Análise Bibliométrica dos Artigos

## Apêndice A

## **Apêndice B – Investimento na Transição de Ferramentas Pneumáticas para Elétricas**

Apêndice B

Ferramentas Pneumáticas Atlas Copco															
Modelos	LTV009 R09-Q	LTV009 R025-Q	LTV28 R15-10	LTV28 X R25-10	LTV29-2 R24-10	LTV29-2 R30-10	LTV39-2 R30-10	LTV39-2 R48-10	LUM12 HRX5-350	LUM12 HRX8	LUM 22 HRX10	LUM22 HRX12	LUM32 HR10	LUM32 HR15	TWIST VR13-16
Torque (Nm)	1.3 - 9	0.6 - 2.5	7. - 15	12. - 25	12. - 24	15. - 30	15. - 30	24. - 48	0.4 - 5	1.5 - 8	3.5 - 10	3.5 - 12.5	5. - 10	7.5 - 15.5	2. - 6
Velocidade (rpm)	430	1650	560		640	500	870	560	350	500	800	500	750	450	1300
Stock Atual (un)	27	10	5	6	23	4	5	6	3	2	27	2	41	27	6

Ferramentas Elétricas Fein															
Modelos	ASW 18-12 PC	ASW 18-6 PC	ASW 18-18 PC	ASW 18-30 PC	ASW 18-30 PC	ASW 18-30 PC	ASW 18-30 PC	ASW 18-60 PC	ASM 18-8 PC	ASM 18-8 PC	ASM 18-12 PC	ASM 18-12 PC	ASM 18-12 PC	ASM 18-12 PC	ASW 18-6 PC
Torque (Nm)	3. - 12	1.2-6	6. - 18	12. - 30	12. - 30	12. - 30	12. - 30	25. - 60	1.-8	1.-8	3.-12	3.-12	3.-12	3.-12	1.2-6
Velocidade (rpm)	75-1020	100 - 1340	65-900	30-420	30-420	30-420	30-420	20-230	110-1200	110-1200	80-900	80-900	80-900	80-900	100 - 1340

Investimento na Transição Pneumática para Elétrica																
Máquina	655,00 €	655,00 €	655,00 €	1 249,00 €	1 249,00 €	1 249,00 €	1 249,00 €	1 359,00 €	575,00 €	575,00 €	575,00 €	575,00 €	575,00 €	575,00 €	655,00 €	
Bateria	153,90 €	153,90 €	153,90 €	153,90 €	153,90 €	153,90 €	153,90 €	153,90 €	102,00 €	102,00 €	102,00 €	102,00 €	102,00 €	102,00 €	153,90 €	
Cabeçote	459,00 €	459,00 €	629,00 €	655,00 €	655,00 €	655,00 €	655,00 €	655,00 €	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	459,00 €	
Carregador	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	76,91 €	
Custo Unitário	1 344,81 €	1 344,81 €	1 514,81 €	2 134,81 €	2 134,81 €	2 134,81 €	2 134,81 €	2 244,81 €	753,91 €	753,91 €	753,91 €	753,91 €	753,91 €	753,91 €	1 344,81 €	
Custo Total	36 309,87 €	13 448,10 €	7 574,05 €	12 808,86 €	49 100,63 €	8 539,24 €	10 674,05 €	13 468,86 €	2 261,73 €	1 507,82 €	20 355,57 €	1 507,82 €	30 910,31 €	20 355,57 €	8 068,86 €	<b>236 891,34 €</b>

Figura 27 Investimento na substituição de ferramentas pneumáticas para elétricas

## **Apêndice C – Análises de Capabilidade de Ferramentas Elétricas e Pneumáticas**

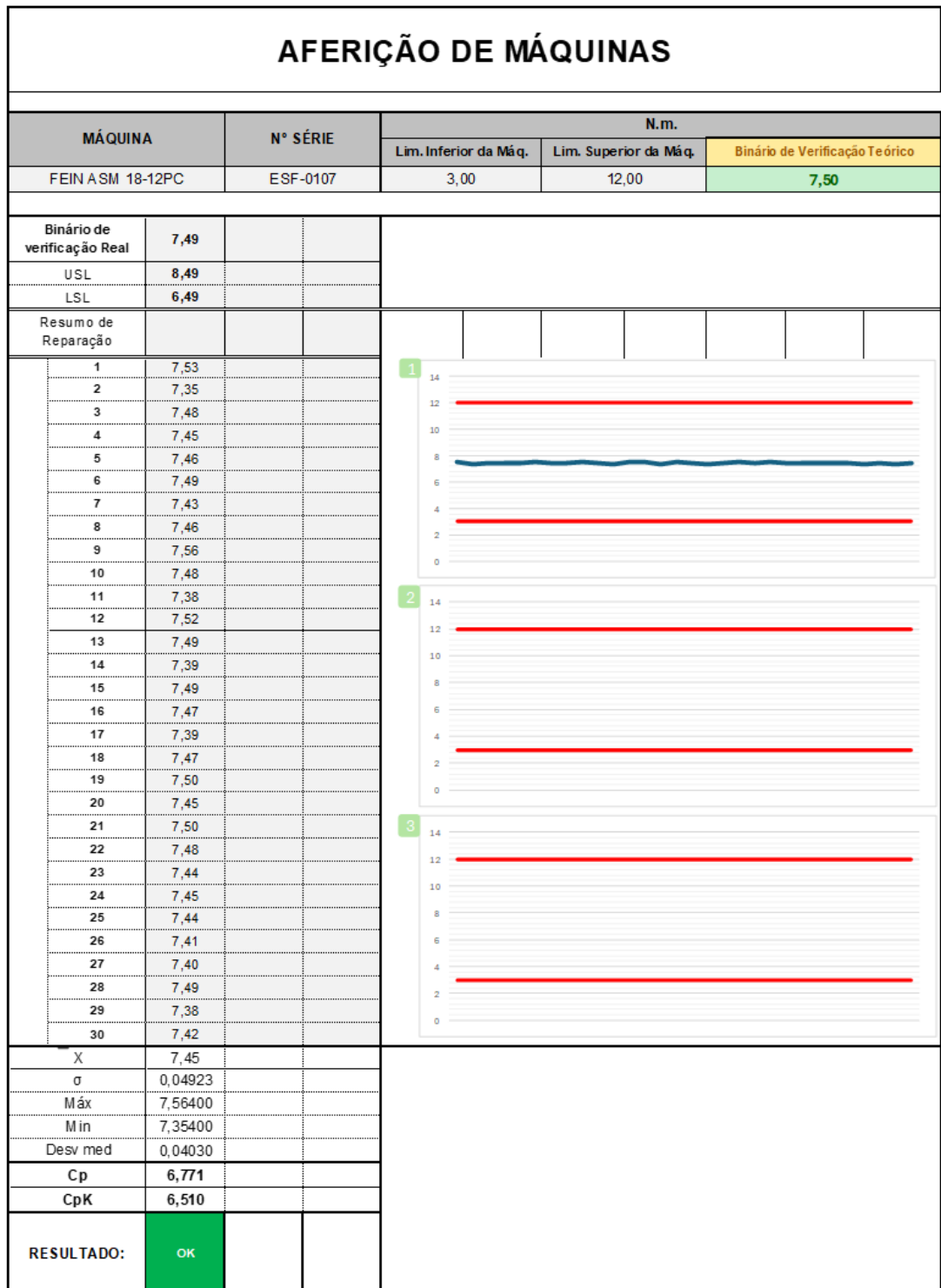


Figura 28 Análise de capacidade de uma ferramenta elétrica (FEIN ASM 18-12PC)

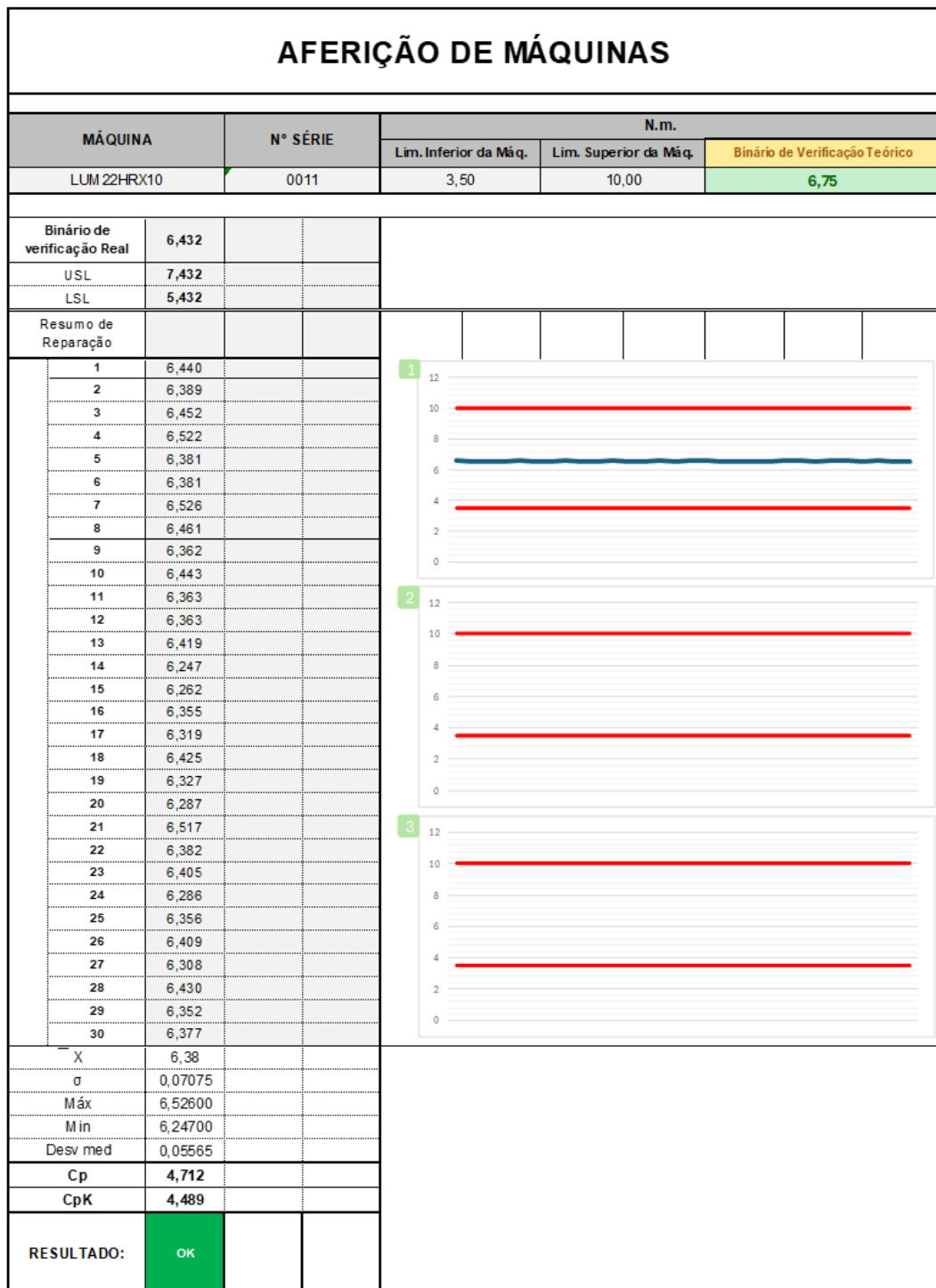


Figura 29 Análise de capacidade de uma ferramenta pneumática (LUM22HRX10)



## Apêndice D – Ferramenta MCDA Excel



*Figura 30 Ligação para a ferramenta MCDA Excel*



# Anexo A



PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

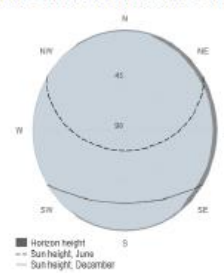
Provided inputs:

Latitude/Longitude: 41.063,-8.619  
 Horizon: Calculated  
 Database used: PVGIS-SARAH3  
 PV technology: Unknown  
 PV installed: 1 kWp  
 System loss: 14 %

Simulation outputs

Slope angle: 35 °  
 Azimuth angle: 0 °  
 Yearly PV energy production: 1445.56 kWh  
 Yearly in-plane irradiation: 1904.22 kWh/m<sup>2</sup>  
 Year-to-year variability: 52.11 kWh  
 Changes in output due to:  
 Angle of incidence: -2.67 %  
 Spectral effects: NaN %  
 Temperature and low irradiance: -8 %  
 Total loss: -24.08 %

Outline of horizon at chosen location:



Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



Monthly PV energy and solar irradiation

Month	E <sub>m</sub>	H(i) <sub>m</sub>	SD <sub>m</sub>
January	81.8	107.1	18.2
February	95.1	124.7	18.6
March	117.3	154.6	19.3
April	131.3	173.4	14.4
May	148.5	196.3	13.8
June	145.3	192.2	9.6
July	159.9	211.3	9.9
August	158.5	209.0	8.4
September	140.4	184.8	11.0
October	108.9	143.1	15.7
November	81.8	107.2	18.0
December	76.7	100.4	12.4

E<sub>m</sub>: Average monthly electricity production from the defined system [kWh].  
 H(i)<sub>m</sub>: Average monthly sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system [kWh/m<sup>2</sup>].  
 SD<sub>m</sub>: Standard deviation of the monthly electricity production due to year-to-year variation [kWh].

The European Commission makes this website available to enhance public access to information about its initiatives and European Union policies in general. Our goal is to keep this information timely and accurate. If errors are brought to our attention, we will try to correct them. However, the Commission accepts no responsibility or liability whatsoever with regard to the information on this site.  
 It is our goal to minimize disruption caused by technical errors. However, some data or information on this site may have been created or structured in a way or format that did not account for some technical changes that our website will not be interrupted or otherwise affected by such changes. The Commission accepts no responsibility with regard to such problems incurred as a result of using this site or any linked external sites.  
 For more information, please visit [https://ec.europa.eu/infoblade/notice\\_en](https://ec.europa.eu/infoblade/notice_en)

PVGIS ©European Union, 2001-2025.  
 Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged, save where otherwise stated.

Report generated on 2025/05/03



Figura 31 Simulação de desempenho da energia fotovoltaica localização da empresa