



## Apoio à Tomada de Decisão Multicritério Aplicada à Economia Circular

FILIPA MARIA SILVA FERNANDES

setembro de 2023

# APOIO À TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO APLICADA À ECONOMIA CIRCULAR

Filipa Maria Silva Fernandes

**2022/2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

## **APOIO À TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO APLICADA À ECONOMIA CIRCULAR**

Filipa Maria Silva Fernandes

1171076

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira e coorientação da Doutora Marisa João Guerra Pereira de Oliveira

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

## **AGRADECIMENTOS**

Concluído o Mestrado em Engenharia Mecânica é para mim essencial agradecer não só a quem esteve presente e me apoiou durante a realização desta dissertação, mas também a toda a gente que fez parte em algum momento deste meu percurso e de alguma maneira me ajudou ao longo destes anos. A conclusão desta etapa é a conclusão de um objetivo sonhado que não teria sido possível sem um grande suporte por trás em todos os momentos mais desafiantes.

Este feito teve inúmeros altos e baixos e não teria sido possível primeiramente sem o apoio dos meus familiares, principalmente dos meus pais que sempre de tudo fizeram para que a minha formação fosse possível e proporcionaram tudo o que eu precisasse.

Agradecer também aos meus amigos por todas as vezes que estiveram lá quando precisava de uma palavra de alento e pelos momentos passados também na vida académica que é do melhor que se pode levar destes anos.

Um agradecimento também à Engenheira Maria Teresa pela orientação e apoio dado e por tudo o que transmitiu do seu conhecimento bem como pela disponibilidade para ajudar.

Por último, à Engenheira Liliana Gonçalves e à Bruna Gomes da Toyota, agradeço por toda a disponibilidade que sempre demonstraram em ajudar e apoiar, espero na minha vida profissional encontrar muitas pessoas como elas.

Deixo esta etapa e esta casa com um sentimento gigante de felicidade, orgulho e uma nostalgia imensa, com toda a certeza que fui muito feliz e tudo valeu a pena, tudo me ensinou algo e cresci imenso.

Não é o fim de nada, mas o início de tudo.

página propositadamente em branco

## RESUMO

A economia circular é um modelo de desenvolvimento sustentável que visa reduzir o desperdício e a poluição, mantendo os materiais em uso pelo maior tempo possível através da reutilização, recuperação, reparação e reciclagem. A economia circular é importante para a sustentabilidade do planeta e para o bem-estar das populações. No contexto industrial, a economia circular pode ser aplicada por meio da escolha de estratégias que visam reduzir o desperdício e a poluição.

Considerando que no contexto das opções estratégicas para alcançar economia circular numa área industrial a tomada de decisão é multicritério, o uso de metodologias multicritério podem ser utilizadas para suportar a escolha de estratégias mais sustentáveis. Essas metodologias permitem avaliar diferentes alternativas face a critérios de carácter quer qualitativo quer quantitativo, como o impacto ambiental, o custo e a eficácia, para seleccionar a melhor opção.

Foi criado um modelo multicritério para avaliação de estratégias para economia circular usando o método AHP e aplicado num contexto real industrial da indústria automóvel, na secção de pintura. O processo real foi analisado, foram pesquisadas e analisadas com os decisores várias alternativas de opções estratégicas e seu impacto na empresa face a recursos disponíveis. Assim, foram definidas as alternativas estratégicas, como a utilização de tintas à base de água que não contêm solventes, robotização da secção o que impacta numa redução de recursos gastos e respetivo desperdícios, utilização de energias alternativas no processo. Foram definidos os critérios relevantes para a avaliação e seriação das alternativas definidas usando o método AHP.

Os resultados obtidos permitiram obter um *ranking* para as estratégias de economia circular a aplicar à secção de pintura, ajudando a empresa na percepção do impacto das mesmas no alcance de maior sustentabilidade. Foi realizada uma análise de sensibilidade dos resultados obtidos pelo AHP que permite ver as amplitudes de variação para que as posições se alterem.

## PALAVRAS-CHAVE

Sustentabilidade; Economia Circular; Metodologia Multicritério; AHP; Priorização de Estratégias

página propositadamente em branco

## ABSTRACT

The circular economy is a sustainable development model that aims to reduce waste and pollution by keeping materials in use for as long as possible through reuse, recovery, repair, and recycling. The circular economy is important for the sustainability of the planet and the well-being of populations. In an industrial context, the circular economy can be applied through the choice of strategies that aim to reduce waste and pollution. Considering that decision-making for achieving a circular economy in an industrial area is multicriteria, support for decision-making can be provided by multicriteria methodologies to support the choice of more sustainable strategies. These methodologies allow for the evaluation of different alternatives based on qualitative and quantitative criteria, such as environmental impact, cost, and effectiveness, to select the best option.

A multicriteria model was created to evaluate strategies for the circular economy using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. The model was applied in a real industrial context in the automotive industry, specifically in the painting section. The actual process was analysed, and various alternative strategic options and their impact on the company were researched and analysed by decision-makers. As a result, strategic alternatives were defined, such as the use of water-based paints that do not contain solvents, robotization of the section to reduce resource consumption and waste, and the use of alternative energy sources in the process. Relevant criteria were defined for evaluating and ranking the defined alternatives.

The results obtained allowed for ranking the circular economy strategies to be applied to the painting section, helping the company understand their impact on achieving greater sustainability. An analysis of sensitivity was performed on the results obtained by AHP, which allows us to see the range of variation for the positions to change

## KEYWORDS

Sustainability; Circular Economy; Multicriteria Methodology; AHP; Strategies Prioritization

página propositadamente em branco

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XI
1. INTRODUÇÃO .....	13
1.1. Contextualização .....	13
1.2. Objetivo .....	13
1.3. Metodologia .....	14
1.4. Estrutura.....	14
1.5. Empresa do caso de estudo.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Sustentabilidade.....	15
2.1.1. As Metas da União Europeia.....	16
2.1.2. <i>European Green Deal</i> e os efeitos na saúde .....	17
2.2. Economia Circular.....	18
2.2.1. Do Modelo Linear ao Modelo Circular .....	18
2.2.2. Princípios da Economia Circular.....	19
2.2.3. Desafios da Economia Circular.....	20
2.2.4. Economia Circular e a Indústria 4.0 .....	21
2.3. Metodologia Multicritério.....	22
2.3.1. Etapas da Metodologia Multicritério .....	23
2.3.2. Exemplos de Métodos.....	23
2.3.3. Difusão de Métodos.....	25
3. MÉTODOS E APLICAÇÃO .....	27
3.1. Método AHP .....	27
3.2. Caso de Estudo .....	29
3.2.1. Processo da Pintura.....	30
3.3. Estratégias Equacionadas.....	30
3.4. Definição dos Critérios .....	31
3.5. Avaliação das Estratégias.....	31
3.5.1. Substituição do diluente de limpeza de base solvente por diluente de base aquosa.....	32
3.5.2. Implementação de um sistema de pintura robotizado .....	33
3.5.3. Instalação de sistema de coletores solares para auxiliar aquecimento da cabine de pintura .....	36
3.6. Avaliação dos critérios.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
4.1. Aplicação do Método AHP.....	39
4.1.1. Hierarquia .....	39

---

4.1.2. Matriz de Preferência do Critérios.....	39
4.1.3. Cálculo das Matrizes de Comparação das Alternativas para cada critério.....	41
4.1.4. Razão de Coerência dos Critérios.....	44
4.1.5. Discussão de Resultados .....	44
4.2. Análise de Sensibilidade .....	45
5. CONCLUSÃO .....	49
5.1. Conclusões finais .....	49
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Aspetos do desenvolvimento sustentável (Adaptado de Joshi, 2022).....	15
Figura 2 -Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Adaptado de Balogh et al., 2017) ....	16
Figura 3 - Os 9R's (Adapatado de Kirchherr et al, 2017).....	20
Figura 4 - Pilares tecnológicos na Indústria 4.0, adaptados de Rüssmann et al. (2015).....	21
Figura 5 - Estrutura Hierárquica .....	28
Figura 6 - Matriz de comparação de elementos no método AHP (adaptado de Turcksin et al.,2011) .....	28
Figura 7 - Árvore Hierárquica AHP .....	39
Figura 8 -Impacto da variação da importância do critério Viabilidade Técnica .....	46
Figura 9 - Impacto da variação da importância do critério Impacto Ambiental .....	46
Figura 10 - Impacto da variação da importância do critério Viabilidade Económica .....	47
Figura 11 - Impacto da variação da importância do critério Inovação .....	47
Figura 12 -Impacto da variação da importância do critério Segurança e Saúde dos Trabalhadores	48

página propositadamente em branco

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Etapas a seguir na utilização da Metodologia Multicritério (adaptado de Thokala et al., 2016) .....	23
Tabela 2 - A escala de Saaty para comparação a pares (adaptado de Turcksin et al.,2011) .....	28
Tabela 3 - Custos diretos do Robot da Pintura no caso da OGMA (fonte: (Pedro Santos Ferreira et al., 2018)).....	35
Tabela 4 - Estudo económico da solução proposta (fonte: (Santos & Máximo, n.d.)) .....	36
Tabela 5 - Avaliação dos Critérios através de uma escala numérica .....	37
Tabela 6 - Matriz de Preferência dos Critérios.....	40
Tabela 7 - Matriz Normalizada e Valor Médio para cada critério .....	40
Tabela 8 - Matriz de comparação do Critério Viabilidade Técnica .....	41
Tabela 9 - Matriz de comparação do Impacto Ambiental.....	41
Tabela 10 - Matriz de comparação do Critério Viabilidade Económica .....	42
Tabela 11 - Matriz de comparação do Critério Inovação .....	42
Tabela 12 - Matriz de comparação do Critério Segurança e Saúde dos Trabalhadores .....	42
Tabela 13 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Viabilidade Técnica .....	43
Tabela 14 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Impacto Ambiental .....	43
Tabela 15 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Viabilidade Económica.....	43
Tabela 16 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Inovação.....	43
Tabela 17 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Segurança e Saúde dos Trabalhadores.....	44
Tabela 18 - Razão de Coerência .....	44
Tabela 19 - Cálculo do Valor Final .....	45

página propositadamente em branco

## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de Siglas

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
ATEX	Atmosphere Explosibles
CO2	Dióxido de Carbono
COMET	<i>Characteristic Objects Method</i>
COV	compostos orgânicos voláteis
DEMATEL	<i>Decision making trial and evaluation laboratory</i>
DSRC	Diretiva de Relatório de Sustentabilidade Corporativa
EC	Economia Circular
ELECTRE	<i>Elimination and choice expressing reality</i>
EPI	Equipamento Proteção Individual
I4.0	Indústria 4.0
IC	Índice de Consistência
INEGI	Instituto de Ciência e inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
IR	índice aleatório
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
MCDA	Métodos de Decisão Analíticos Multicritério
MCDM	Métodos de Decisão Multicritério
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i>
RC	Razão de Consistência
SMART	<i>Simple multiattribute rating technique</i>
TCAP	Toyota Caetano Portugal Ovar
TIR	Taxa Interna de Retorno
UE	União Europeia
TOPSIS	<i>Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution</i>
VAL	Valor Atual Líquido

página propositadamente em branco

## 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório apresenta-se primeiramente uma contextualização do tema a abordar referindo-se a importância do mesmo. Seguidamente, são apresentados os objetivos a atingir nesta dissertação e a metodologia utilizada. Por último, é descrito a maneira como o relatório se encontra estruturado e faz-se uma pequena introdução à empresa do caso de estudo.

### 1.1. Contextualização

Desde a segunda metade do século XX que o desenvolvimento sustentável é um dos principais temas e preocupações de organizações e governos a nível mundial. Este problema tem vindo a crescer de forma exponencial e medidas imediatas tem de ser tomadas antes que não haja mais nada que possa ser feito no sentido de salva guardar os recursos naturais do nosso planeta. A consciencialização da população em geral e de instituições governamentais é um trabalho que tem vindo a ser realizado, mas que ainda não assumiu o papel necessário para reverter a curva acentuada que se observa na deterioração do ambiente.

Neste sentido, ao longo dos anos foram criados diversos acordos globalmente que obrigassem países a cumprir certos comportamentos e limites no gasto dos recursos naturais da terra de modo a não ultrapassar os limites sustentáveis. O conceito de uma economia circular surgiu e rapidamente se tornou uma ferramenta da sustentabilidade e modificou o modo como negócios operavam.

Assim, a metodologia multicritério pode ser uma boa ferramenta de auxílio para as empresas no mapeamento de informação para a avaliar e medir o seu desenvolvimento de modo sustentável. Os Métodos de Decisão Multicritério que já provaram ser um aliado fundamental para facilitar os processos de tomada de decisão, se aplicados para a conquista da sustentabilidade e implementação da economia circular podem ser muito importantes.

### 1.2. Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo desenvolver um modelo para suportar a tomada de decisão multicritério no âmbito da economia circular, garantindo o alcance de sustentabilidade.

A Economia Circular é um conceito que suporta a sustentabilidade e a regeneração de operações de negócios. Com o objetivo de ajudar as empresas a implementar o conceito de Economia Circular é necessário desenvolver um modelo eficiente de tomada de decisões com múltiplos atributos, de modo a facilitar a coordenação de um grande grupo de decisores e a implementação de ações.

### 1.3. Metodologia

Tendo em consideração o objetivo e tema desta dissertação, a metodologia desenvolve-se em quatro fases. Na primeira fase é feita uma revisão de literatura em sustentabilidade, economia circular e metodologia multicritério para suporte à decisão, onde os principais modelos foram analisados. Numa segunda fase é elaborado um modelo multicritério para escolha de alternativas no contexto de decisão economia circular. Numa terceira fase o modelo é validado usando a metodologia estudo de caso. Numa última fase os resultados da aplicação da metodologia multicritério são analisados e feita uma análise de sensibilidade.

### 1.4. Estrutura

O relatório está dividido em seis capítulos sendo o primeiro um enquadramento onde se encontra uma contextualização ao tema a abordar, o objetivo, a metodologia e apresentação da empresa onde foi realizado o caso de estudo. O segundo capítulo refere-se à Revisão Bibliográfica e está dividido em três subcapítulos. O primeiro subcapítulo diz respeito ao tema da sustentabilidade. De seguida, é abordado o tema da economia circular e a metodologia multicritério, temas mais específicos e os pilares deste trabalho. Seguidamente, o terceiro capítulo diz respeito aos Métodos e Aplicação, sendo aí apresentado o problema de economia circular onde o caso de estudo foi aplicado. No quarto capítulo, designado Resultados e Discussão, é então aplicado o método AHP e analisados os resultados obtidos. O capítulo cinco refere-se às considerações e conclusões retiradas.

### 1.5. Empresa do caso de estudo

A dissertação foi realizada no INEGI, mas o caso de estudo foi realizado na Toyota de Ovar e, por isso, será feito um pequeno resumo sobre a mesma. A Toyota surgiu em 1937 no Japão, mas foi apenas em 1968 que Salvador Caetano assinou um contrato que iniciava a importação e comercialização da marca para Portugal. A fábrica de Ovar, onde foi realizado o caso de estudo desta dissertação, foi a primeira fábrica Toyota na Europa e surgiu 5 anos depois, em 1971.

São diversos os modelos produzidos na fábrica de Ovar ao longo dos seus anos de existência, sendo que hoje em dia apenas é produzido o modelo *Lande Cruiser* série 70 que é exclusivo para exportação para África do Sul.

O sistema de produção da Toyota baseia-se em dois conceitos, o *jidoka* e *just in time* que permitem a produção eficiente e rápida de um carro de cada vez, com a qualidade total satisfazendo desta maneira os requisitos dos clientes. Os princípios da Toyota baseiam-se no respeito pelo ambiente sem descorar a qualidade. Metas desafiadoras para se encontrar sempre uma maneira melhor antecipando as necessidades dos clientes excedendo as suas expectativas e satisfazendo as suas necessidades. A Toyota procura ser pioneira em novas oportunidades e investimentos no futuro, estando em constante inovação e procurando ser o futuro da mobilidade, sendo a segurança a sua prioridade número um. (Toyota Portugal (2023) <https://www.toyota.pt/>)

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste segundo capítulo, encontra-se a revisão bibliográfica realizada, corporizada com o objetivo de adquirir uma maior compreensão e conhecimento sobre os temas desta dissertação. Primeiramente, será abordado o tema da sustentabilidade, a sua importância e as metas da União Europeia (UE). Seguidamente, fazendo segmento ao primeiro tema será exposto o tema da Economia Circular (EC), o seu contexto, vantagens, princípios e como se relaciona com a Indústria 4.0 (I4.0). O último subcapítulo diz respeito à Metodologia Multicritério, o principal tema deste trabalho.

### 2.1. Sustentabilidade

A população mundial tem vindo a aumentar até taxas nunca alcançadas desde meados do século XX. A deterioração dos recursos naturais e renováveis da Terra, a sobrepopulação e o avanço industrial e tecnológico levam a problemas sociais, ambientais e económicos que tornam a sustentabilidade um dos maiores temas da atualidade.

Preocupações relacionadas com a sustentabilidade estão presentes nas agendas tanto de políticos como estratégias de empresas. Sustentabilidade pode ser definida como a situação em que as atividades da população são realizadas de maneira a permitir a conservação do funcionamento dos ecossistemas do planeta, ou uma transformação do estilo de vida da população que otimize a probabilidade de as condições de vida darem segurança e bem-estar, pela manutenção do fornecimento de bens não substituíveis (Geissdoerfer et al., 2017).

Desde 1960, que as preocupações com questões ambientais, como a destruição da camada de ozono ou perda de biodiversidade, tem vindo a crescer uma vez que este cenário não é suportável para o futuro (Geissdoerfer et al., 2017). O desenvolvimento sustentável é a capacidade de se dar resposta às necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras darem resposta às suas necessidades (Joshi, 2022). A preservação de recursos naturais, minimização de impactos negativos para o ambiente e o bem estar social, garantem um futuro viável para as gerações futuras o que é fundamental para a sobrevivência da humanidade e do planeta.

O desenvolvimento sustentável é o equilíbrio entre aspetos económicos, ambientais e sociais (Figura 1), e o desempenho de uma organização depende também destes aspetos (Joshi, 2022).

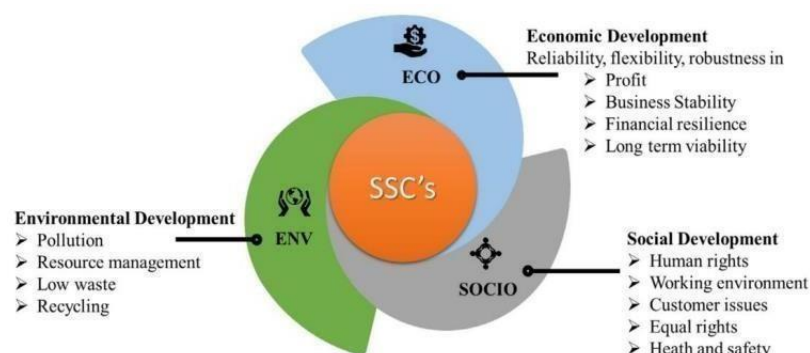


Figura 1 – Aspetos do desenvolvimento sustentável (Adaptado de Joshi, 2022)

### 2.1.1. As Metas da União Europeia

As metas adotadas por instituições como a Organização das Nações Unidas (ONU) e a Comissão Europeia (EUCO) possuem o objetivo de reduzir o consumo de energia primária, ao mesmo tempo, que se consegue o crescimento econômico global levando a um planeta autossustentável, melhorando o bem-estar humano e a prosperidade econômica (Heun& Brockway, 2019).

No sentido de um desenvolvimento mais sustentável, a UE definiu uma Agenda para 2030 considerada bastante ambiciosa. Esta agenda é composta por 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (Figura 2) e 169 metas que pretendem o alcance de objetivos económicos, sociais, ambientais e institucionais globalmente até ao ano de 2030. Esta Agenda surge como complemento a outros acordos internacionais como o Acordo Climático de Paris e as metas de biodiversidade de Aichi, e todos eles tem como finalidade assegurar a estabilidade dos recursos naturais da terra (van Vuuren et al., 2022).

As metas estabelecidas são, por exemplo, a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> em pelo menos 40% abaixo do nível que existia em 1990, o aumento para 27% do uso de fontes de energia renováveis para o consumo de energia da UE e o aumento da eficiência energética em pelo menos 27%. Esta agenda engloba os três aspetos do desenvolvimento sustentável: económico, social e ambiental. Entre os objetivos destacam-se questões como a eliminação da pobreza e fome, o fornecimento de educação e serviços de saúde para todos ao mesmo tempo que se garante a conservação do ambiente e trabalho e boas condições de vida numa sociedade justa com instituições fortes (Balogh et al., 2017).



Figura 2 -Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Adaptado de Balogh et al., 2017)

Na Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática, em 2015, 196 delegações decidiram diminuir as emissões de gases de efeito de estufa de modo a evitar um aumento da temperatura global superior a 2°C até 2050 (Pradere et al., 2022).

A Comissão Europeia estabeleceu um regulamento para garantir que os objetivos energéticos e ambientais da UE serão atingidos. (Bigerna et al., 2016).

O progresso alcançado por cada país é medido através de um conjunto de indicadores que tem o objetivo de avaliar o desenvolvimento alcançado. Esta avaliação, é um auxílio para decisões políticas que tenham de ser tomadas a fim de alcançar os objetivos pretendidos. Alguns dos indicadores que existem são o Índice da Vulnerabilidade, Índice de Desempenho Ambiental ou a Pegada Ecológica (Tóthová & Heglasová, 2022).

A existência da “Diretiva de Relatórios de Sustentabilidade Corporativa” (DRSC), uma medida que se foca na revisão de regulamentos sobre sustentabilidade que tem como finalidade a prevenção e redução de reivindicações de práticas para o alcance da sustentabilidade que não correspondam à realidade. Um dos temas em crescimento nos últimos anos e considerado um dos seis objetivos mais importantes para o desenvolvimento sustentável, é a transição para uma economia circular, e, neste sentido, as empresas têm a necessidade de progredir no alcance da mesma (Opferkuch et al., 2022).

Por fim, a conferência *Energy Modelling Platform for Europe 2020* apresentou um conjunto de estudos sobre descarbonização, o impacto financeiro numa transição energética e o papel envolvente dos consumidores e população, entre outros, na perspetiva de contribuir para a construção de políticas mais sustentáveis (Auer et al., 2022).

### **2.1.2. European Green Deal e os efeitos na saúde**

O *European Green Deal* traça a criação de uma economia competitiva e eficiente no uso de recursos, ao mesmo tempo que garante a neutralidade climática, sem excluir a componente social (Auer et al., 2022).

O *European Green Deal* ambiciona atingir zero emissões líquidas de gases de efeito de estufa até 2050. Do mesmo modo, este acordo também tem como grande objetivo proteger a biodiversidade e saúde do planeta e conseqüentemente, tornar o ambiente menos tóxico, melhorar a saúde e bem-estar da população. O sucesso da implementação das políticas deste acordo em setores como energia, transportes, comida, indústria e na saúde, setores que contribuem substancialmente para emissões elevadas de dióxido de carbono, metano e carbono negro, tem a capacidade de reduzir drasticamente a curto prazo os riscos de saúde latentes para a população causados pela mudança climática (Haines & Scheelbeek, 2020).

O sucesso deste acordo traz a redução da emissão dos gases de efeito de estufa, da poluição de partículas finas e do ozônio troposférico o que advém benefícios significativos para a saúde da população. Por exemplo, conseguir alcançar a política de substituir o uso de combustíveis fósseis por energia renovável nos setores mencionados anteriormente podia prevenir cerca de 3,6 milhões de mortes prematuras por ano, de doenças cardíacas, pulmonares, AVC, entre outras.

As políticas que tem impacto positivo na saúde, no ambiente e economia, devem ser sempre implementadas e o êxito deste acordo será um modelo para outros países que observam os impactos do mesmo (Haines & Scheelbeek, 2020).

## 2.2. Economia Circular

A EC surgiu na década de 70 da ideia de reduzir o consumo de matérias-primas para a produção industrial, mas é aplicável a qualquer recurso. Impulsionados pelo crescimento populacional, são diversos os impactos negativos observados no planeta, como a diminuição da biodiversidade, que à degradação de ecossistemas, e a escassez de matérias-primas devido ao aumento da procura, que causa flutuações nos preços de mercado e instabilidade na economia mundial (Arruda et al., 2021).

Em virtude disto, o conceito de economia circular emergiu rapidamente oferecendo um novo enquadramento nas estratégias de eficiência de recursos. Uma importante contribuição da economia circular baseia-se na integração dos aspetos de sustentabilidade em modelos de negócio que suportam as empresas na redução do impacto ambiental de maneira economicamente viável (Brändström & Saidani, 2022).

A adoção de estratégias da economia circular apresenta várias vantagens como a possibilidade de melhorar questões ambientais, sustentar o crescimento da economia e acrescentar valor, para além de criar emprego, sendo, portanto, um conceito que sustenta os aspetos da sustentabilidade; económico, ambiental e social (Schöggel et al., 2020).

### 2.2.1. Do Modelo Linear ao Modelo Circular

O modelo linear foi o centro de todo o desenvolvimento industrial, mas rapidamente se tornou infundado optar por seguir este caminho. O modelo linear apresenta dois problemas fulcrais: os recursos estão cada vez mais escassos e é mais caro realizar-se a sua extração à medida que as reservas naturais são exploradas, e, para além deste ponto, os resíduos gerados ultrapassarão em mais do dobro o crescimento da população até 2050, e maior parte destes resíduos tem como destino o meio ambiente ou são tratados de forma ineficiente (de Souza Junior et al., 2020). O modelo linear define-se nos passos “tirar-fazer-usar-descartar”. Possui uma estratégia na qual recursos naturais finitos são extraídos para atividades produtivas não sustentáveis a longo prazo, gerando elevadas quantidades de resíduos que deterioram o meio ambiente (Bongers & Casas, 2022).

Assim, tornou-se necessário integrar em agendas políticas a forma como a sociedade produz e consome, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, nomeadamente o ODS12: Consumo e produção responsáveis (Diaz et al., 2022).

O conceito de economia circular introduziu uma nova perspetiva ao analisar o sistema industrial e o ambiente como um só, caracterizado por fluxos de material, energia, informação e provisão de recursos. Assim, a economia circular baseia-se na análise das operações de sistemas industriais e na sua otimização, criando um modelo de desenvolvimento económico, com produção, distribuição e recuperação de produtos (Ghisellini et al., 2016).

A UE refere-se à económica circular como uma “megatendência global irreversível” e considera-a uma estratégia obrigatória para a criação de uma “economia sustentável, de baixo carbono, eficiente em termos de recursos e competitiva” (Calisto Friant et al., 2021).

### 2.2.2. Princípios da Economia Circular

Nos processos que seguem o modelo da economia circular são garantidos fluxos circulares de recursos onde o ciclo é fechado entre o pós-uso e a produção, e é reduzido o uso de recursos associados a produtos e processos de produção. A economia circular compromete-se a reduzir o impacto ambiental e social dos processos de produção e o consumismo, e integra-se assim na sustentabilidade. Para além da recuperação de produtos no final do seu ciclo de vida e a sua reintegração, o conceito de economia circular também passa pelo desenvolvimento de produtos usando menores quantidades de matéria prima virgem, com uma maior vida útil e fáceis de manter, reparar e reutilizar (Chiaroni et al., 2022).

A transição para uma economia circular pode ser feita através de diferentes processos, como por exemplo, a logística reversa e cadeias de abastecimento de circuito fechado, a simbiose industrial, a reciclagem ou o design do produto verde (Chiaroni et al., 2022). A cadeia de valor circular é constituída por nove partes: fornecimento de material, design, produção, distribuição e vendas, consumo e uso, recolha e eliminação; reciclagem e recuperação; reprodução e reentrada (NazlıKöseoğlu, 2022).

O modelo da economia circular desenvolve-se baseado em três princípios elementares (de Souza Junior et al., 2020):

1. Eliminar o desperdício e a poluição
2. Manter os materiais e produtos em uso com o maior valor possível
3. Recuperar ecossistemas.

Além destes princípios, a EC fundamenta-se em três “ações” principais, designadas “Princípios dos 3R's”: reduzir, reutilizar e reciclar (de Souza Junior et al., 2020).

A Diretiva-Quadro de Resíduos da UE acabou por introduzir um quarto R, 'Recuperar'. Vários estudos propuseram ainda uma outra estrutura, os 9R's (Figura 3): Repensar; Recusar; Reduzir; Reutilizar; Reparar; Reaproveitar; Reciclar; Reaplicar e Reintegrar (Kirchherr et al., 2017). Esta estrutura permite reduzir o consumo de materiais e a produção de resíduos, prolongar a vida útil dos produtos, facilitar a reutilização, reciclar resíduos em materiais secundários e utilizar recursos renováveis (Bianchi & Cordella, 2023)

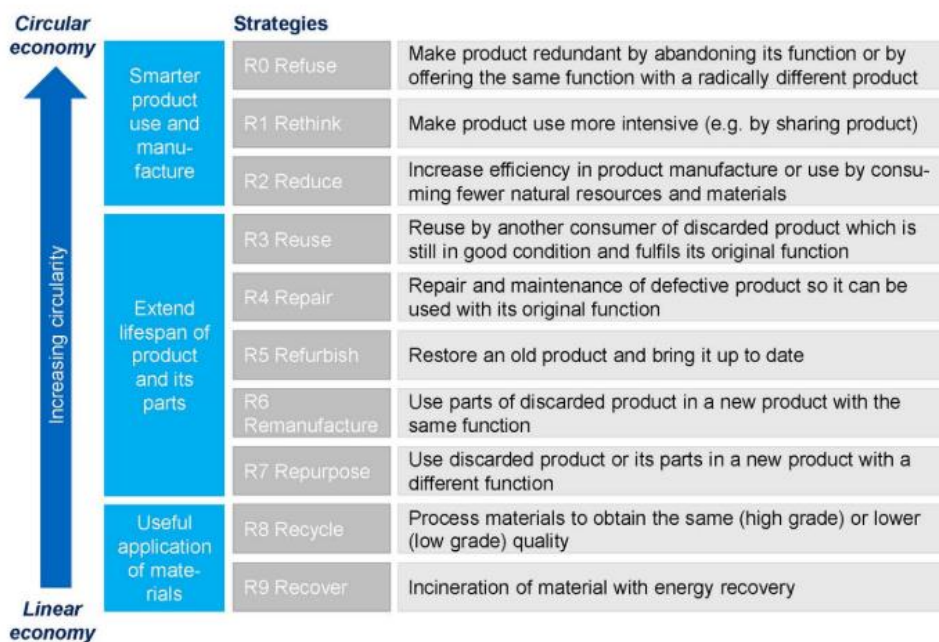


Figura 3 - Os 9R's (Adaptado de Kirchherr et al, 2017)

A reutilização mantém os materiais finitos no ciclo económico e preserva o valor do produto, reduzindo a procura por novos recursos. A reparação e reaplicação, apesar de, também se focarem em manter o maior valor possível dos produtos exigem mais recursos para esse fim. A reutilização e reparação tem um maior compromisso com os princípios da economia circular do que o uso de matérias primas secundárias e a reciclagem. Na verdade, a reciclagem é menos eficiente em termos de consumo de recursos e energia do que a reutilização e o reparo uma vez que estas últimas preservam material original (Knäble et al., 2022).

As práticas da EC estão associadas à minimização de resíduos; à otimização de recursos; à manutenção do valor de produtos reciclando-os e reutilizando-os; à integração de práticas de sustentabilidade; ao uso de energias renováveis; a um design de produtos recicláveis e à reintrodução de produtos e materiais no ciclo de produção evitando-se desperdícios (de Souza Junior et al., 2020).

### 2.2.3. Desafios da Economia Circular

Ao tomar a medida de adotar o conceito de economia circular para uma organização, há sempre várias incertezas devido à complexa conexão das várias partes interessadas o que torna os efeitos da economia circular difíceis de prever. As estratégias da economia circular são importantes para permitir às empresas alcançarem e melhorarem a sustentabilidade. A implementação do conceito de economia circular numa empresa advém com fortes impactos nos processos da organização, no seu modelo de operações e nas suas estratégias, sendo por isso uma transição que acarreta um certo risco e incertezas. A implementação do conceito da economia circular tem um impacto em quase todas as atividades que constituem a cadeia de valor de uma organização (Eisenreich et al., 2022).

O design e desenvolvimento do produto correspondem a 80% do impacto que este terá na sustentabilidade (Diaz et al., 2022). Contrariamente ao que tem sido adotado, onde se verifica um maior foco no final da cadeia, através dos valores de recuperação, consumo e uso em vez de a concentração recair sobre a produção, distribuição e vendas (Nazlı Köseoğlu, 2022).

A transição de uma economia linear para uma circular tem se demonstrado essencial para se atingir a sustentabilidade. No entanto, esta transformação implica a adoção de novos processos e serviços que também podem significar agregar impactos ambientais consideráveis à cadeia de produção (de Souza Junior et al., 2020). Se uma tecnologia que apoie a circularidade não gerar maior produção, irá levar à diminuição do crescimento económico e, portanto, é fulcral perceber quais são os impactos da mudança de um modelo linear para o modelo circular (Nazlı Köseoğlu, 2022).

#### 2.2.4. Economia Circular e a Indústria 4.0

As empresas e organizações estão a ser influenciadas a implementar mudanças de modo a atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável, onde o papel da tecnologia é importante para a transição, incentivando um caminho onde a inovação e sustentabilidade se unem. As mudanças também dizem envolver as inter-relações entre Indústria 4.0 (I4.0), dados inteligentes e economia circular (D'Adamo et al., 2022).

A ideia da Indústria 4.0 diz respeito a uma indústria inteligente, de produção autónoma com empresas e fábricas mais eficientes e económicas. Este conceito promete revolucionar a maneira como a indústria moderna atua, mudando o design, as operações e o transporte de produtos, otimizando a produção, através do uso de tecnologias inovadoras, integradas e interconectadas (Figura 4) (Dantas et al., 2021).



Figura 4 - Pilares tecnológicos na Indústria 4.0, adaptados de Rüßmann et al. (2015)

Todas estas tecnologias apresentam também grandes vantagens no impacto ambiental da indústria de produção uma vez que permitem reduzir a geração de resíduos, minimizar os impactos ambientais e ajudar a indústria a alcançar uma produção mais limpa. No entanto, o investimento no desenvolvimento tecnológico por si só não é suficiente para se atingir objetivos de desenvolvimento sustentável (Dantas et al., 2021).

De certo modo, o conceito de economia circular foi desenvolvido à volta da ideia de revolucionar todo o sistema diretamente ligado à extração de recursos, design de produtos, consciência ambiental, modelos de negócios inovadores e políticas integrativas. O desenvolvimento de nova tecnologia como proposto na I4.0 promove novas oportunidades para fechar ciclos de produção, maximizando o uso dos recursos usados e diminuir a extração de matéria prima (Dantas et al., 2021).

Um dos problemas da I4.0. diz respeito ao impacto que tem nos aspetos sociais da sustentabilidade sendo que a principal discussão se refere à geração de empregos uma vez que o progresso tecnológico substituiria a necessidade de mão de obra. A par deste problema, a transição para estes conceitos exige um suporte de formação para os trabalhadores (Dantas et al., 2021).

A promoção da sustentabilidade ambiental através da implementação de tecnologias em benefício de práticas circulares que permitam alcançar a sustentabilidade, irá potenciar a otimização de processos, a redução de emissões e o uso excessivo de recursos (Dantas et al., 2021).

### **2.3. Metodologia Multicritério**

A Análise de Decisão Multicritério (MCDA) auxilia a tomada de decisão e é usada para avaliar e comparar alternativas ou soluções tendo em consideração vários critérios. O objetivo é auxiliar os decisores no processo de tomar uma decisão, e não tomar a decisão (Pearman, 2009).

Os métodos MCDA mais usados usam um peso que descreve a relevância do critério quando comparado com os restantes (Paradowski & Sałabun, 2021). A MCDA aplica-se a critérios qualitativos e quantitativos (de Moraes et al., 2010). Uma análise de risco baseada em MCDA permite identificar critérios associadas a vulnerabilidades no sistema caracterizando a maneira como ações alternativas podem afetar esses riscos e assim, sintetizam essas informações para comparar, priorizar ou selecionar estratégias alternativas de mitigação (Keisler JM, 2020).

A metodologia MCDA é uma importante ferramenta de apoio quando se tem de tomar decisões complexas e que permite organizar e sintetizar informações e incluir medidas objetivas. Muitas vezes as opiniões dos decisores são diferentes, mas todos os argumentos serão considerados ao estruturar o modelo de decisão, tendo a metodologia de decisão multicritério como principal finalidade ajudá-los a encontrar a alternativa que melhor atenda às suas necessidades e a ter uma melhor compreensão geral do problema (Ycesan et al., 2010).

### 2.3.1. Etapas da Metodologia Multicritério

Embora os haja vários Métodos de Decisão Multicritério (MCDM) as etapas no processo de decisão são comuns a todos eles e estão definidas e descritas na Tabela 1(Thokala et al., 2016).

Tabela 1 - Etapas a seguir na utilização da Metodologia Multicritério (adaptado de Thokala et al., 2016)

Etapas	Descrição
Definir o problema	Identificação dos objetivos, do tipo de decisão, das alternativas, das partes interessadas e saída necessária
Selecionar e estruturar critérios	Identificação dos critérios relevantes para avaliar alternativas
Medir desempenho	Combinação de dados sobre o desempenho das alternativas nos critérios e criação de uma “matriz de desempenho”
Definir alternativas	Ter em conta as preferências das partes interessadas para mudanças dentro dos critérios
Ponderar critérios	Ter em conta as preferências das partes interessadas entre os critérios
Calcular pontuações agregadas	Com as pontuações das alternativas nos critérios e os pesos dos critérios calcular o "valor total" pelo qual as alternativas são classificadas
Incertezas	Realizar análises de incerteza
Conclusão	Interpretar os resultados do MCDA, incluindo análise de incerteza, para apoiar a tomada de decisão

### 2.3.2. Exemplos de Métodos

Os MCDM que existem atualmente são variados e com diferentes características. Alguns exemplos são o *Analytic hierarchy process* (AHP); o *Analytic network process* (ANP); *Elimination and choice expressing reality* (ELECTRE); *Preference ranking organization method for enrichment evaluation* (PROMETHEE); *Technique for order performance by similarity to ideal solution* (TOPSIS); *Multicriteria optimization and compromise solution* (VIKOR); *Decision making trial and evaluation laboratory* (DEMATEL); *Simple multiattribute rating technique*(SMART); *Characteristic Objects Method* (COMET); *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*(MACBETH).

Os MCDM visam fornecer a decisores um conjunto finito de alternativas, ações ou soluções, avaliadas a partir de múltiplos critérios, atributos, recursos ou objetivos. Podemos classificar os métodos MCDM em quatro categorias (Chai et al., 2013):

- Métodos de Utilidade Multiatributo

Estes métodos atribuem um “valor de utilidade” a cada alternativa, que representa o grau de preferência para a base da classificação ou escolha. Por exemplo, AHP usa comparações em pares com avaliações de especialistas para lidar com a medição de atributos qualitativos. Também o ANP, uma extensão do AHP, é uma teoria de medição relativa de atributos intangíveis. Estes métodos são importantes e frequentemente usados em tomadas de decisão atualizadas (Chai et al., 2013).

- Métodos de Superação

Estes métodos trabalham com as preferências dos decisores e valores de avaliação das alternativas (por exemplo, fornecedores). O método ELECTRE é um exemplo deste tipo de métodos. Os métodos PROMETHEE são também baseados na situação de uma comparação par a par de alternativas (Chai et al., 2013). O método PROMETHEE é um “clássico” entre os métodos MCDA e permite tanto uma análise qualitativa como quantitativa para classificar as alternativas (Wang et al., 2022). Existem diversas versões do PROMETHEE: o PROMETHEE I para classificação parcial de alternativas; o PROM-ETHEE II para classificação completa das alternativas; o PROMETHEE III para classificação baseada em intervalos; o PROMETHEE IV para classificação completa ou parcial das alternativas quando o conjunto de soluções viáveis é contínuo; o PROMETHEE V para problemas com restrições de segmentação; o PROMETHEE VI para a representação do cérebro humano; o PROMETHEE GDSS para decisões tomadas em grupo. Recentemente surgiram mais duas abordagens designadas de PROMETHEE TRI para lidar com problemas de classificação e PROMETHEE CLUSTER para classificação nominal (Behzadian et al., 2010).

Também o GAIA é um método de superação e descritivo uma vez que indica características importantes do problema de decisão e auxilia quem vai tomar a decisão a obter preferências e a finalizar a decisão (B. Mareschal, 2009).

- Métodos de Compromisso

Estes métodos são o mais próximo da solução ideal baseados na premissa que um compromisso representa um acordo com base em concessões mútuas. O TOPSIS e VIKOR são exemplos de métodos de compromisso e baseiam-se numa função agregadora que representa a proximidade com o ideal (Chai et al., 2013). O TOPSIS é considerado um método muito direto que trabalha no princípio da distância aos objetos referenciais, onde a distância das alternativas aos elementos de referência é medida e são respetivamente solução ideal positiva e negativa. Este método é considerado um método simples de MCDA frequentemente usado (Shekhovtsov & Salabun, 2020). A diferença entre estes métodos é que o TOPSIS usa normalização linear para eliminar as unidades da função de critérios, enquanto VIKOR usa vetores de normalização (Chai et al., 2013).

- Outros Métodos MCDM

O método SMART é uma técnica básica de classificação que usa o método de peso aditivo simples para obter valores totais como o índice de classificação. Este método tem a vantagem de considerar critérios quantitativos e qualitativos, no entanto, não consegue considerar informações de decisão incertas, como termos linguísticos, valores de intervalo e vários valores difusos. O método DEMATEL é um modelo estrutural para analisar a relação de influência entre critérios de avaliação complexos, e consegue lidar com classificações e avaliações difusas, convertendo a relação entre as causas e os efeitos dos critérios em um modelo estrutural acessível (Chai et al., 2013). O COMET é um método recente, que identifica e resolve problemas de tomada de decisão com propriedades individuais, que são raras nos restantes métodos de tomada de decisão multicritério e trabalha no princípio da distância aos objetos referenciais com livre reversão de classificação e não requer normalização dos dados de entrada (Yelmikheiev & Norek, 2021). O MACBETH é um método para decisões em práticas de logística reversa cada vez mais popular, funciona como uma abordagem interativa que permite que os decisores avaliem alternativas através de comparações qualitativas sobre as diferenças de atratividade em vários critérios (Dhouib, 2014).

### 2.3.3. Difusão de Métodos

A imprecisão que envolve muitos dos dados que baseiam o processo de tomada de decisão levou a que fossem desenvolvidos conjuntos difusos para modelos de tomada de decisão (Pearman, 2009a).

Exemplo disto são os modelos “Fuzzy-MCDA”, que com o objetivo de auxiliarem os decisores nos processos de decisão são frequentemente integrados com, por exemplo, os métodos AHP; ANP; PROMETHEE; VIKOR ou o TOPSIS (Burak et al., 2022). A Teoria dos Conjuntos Fuzzy foi desenvolvida para lidar com a incerteza e subjetividade do pensamento humano (El Mokrini et al., 2016) e pode então ser especialmente útil para resolver problemas MCDA. Aliás, o método COMET é baseado em lógica Fuzzy e conjuntos Fuzzy triangulares (Kozlov & Norek, 2021). A Lógica Fuzzy, tem sido utilizada em problemas de decisão multicritério que os métodos lógicos tradicionais não foram capazes de solucionar (Yelmikheiev & Norek, 2021).

Outra opção frequentemente encontra em artigos durante a pesquisa bibliográfica foram conjuntos híbridos de métodos MCDA, como por exemplo AHP-PROMETHEE, combinando os pontos fortes de ambos os métodos numa única ferramenta. O AHP estabelece árvores de decisão hierárquica e determina os pesos dos critérios identificando os conflitos entre os critérios do PROMETHEE. Já o PROMETHEE ao associar uma função de preferência a cada critério também otimiza o AHP. Para além disto, pode ser usado o PROMETHEE I que se baseia na classificação parcial e evitando potenciais conflitos entre boas e más pontuações nos critérios, frequentes em métodos de agregação, como o AHP; ou o PROMETHEE II que fornece uma classificação completa das alternativas desde a melhor até à pior (Turcksin et al., 2011).



## 3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

Neste capítulo, é apresentado o problema de EC onde o caso de estudo foi aplicado, serão estudadas estratégias de EC que garantem a sustentabilidade, melhorando a pegada ecológica da Toyota. Há vários métodos que implementam a metodologia multicritério e para este caso de estudo foi escolhido o método AHP por ser amplamente aplicado e por ser suportado por um software. O modelo suporta o mapeamento de informação para a tomada de decisão no âmbito da EC.

### 3.1. Método AHP

O método AHP é uma ferramenta que se mostrou eficaz ao longo do tempo no que diz respeito a lidar com tomadas de decisões que envolvem diversas alternativas tendo em conta onde um grupo de decisores utiliza diversos critérios e as consequências dessas decisões tem consequências a longo prazo.

O método AHP representa-se como um modelo aditivo linear, no entanto, os seus passos consistem inicialmente na atribuição de pesos e pontuações atingidas por alternativas baseadas em comparações par a par entre critérios e as opções. O(s) decisor(es) é que avaliam e decidem a relevância de cada critério relativamente ao que está a ser comparado. Esta comparação *pairwise* utilizada por este MCDA é considerada simples e conveniente. Este método foi desenvolvido por Saaty e tornou-se uns dos mais utilizados no auxílio de decisões (Pearman, 2009b).

O primeiro passo essencial neste processo é a definição dos critérios relevantes e as respostas do(s) decisor(es) à questão “Quão importante é o Critério A comparativamente ao Critério B”, esta questão é colocada de forma pareada a todos os critérios a ter em consideração, estabelecendo-se os pesos para os critérios e as pontuações de desempenho para opções nos diferentes critérios (Pearman, 2009b).

O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) começa então pela definição do objetivo, identificação dos critérios e seleção de alternativas. Depois destes três primeiros passos, constrói-se uma estrutura hierárquica com os três níveis: o objetivo, os critérios e as alternativas, respetivamente do topo até à base (Alexopoulos et al., 2022).

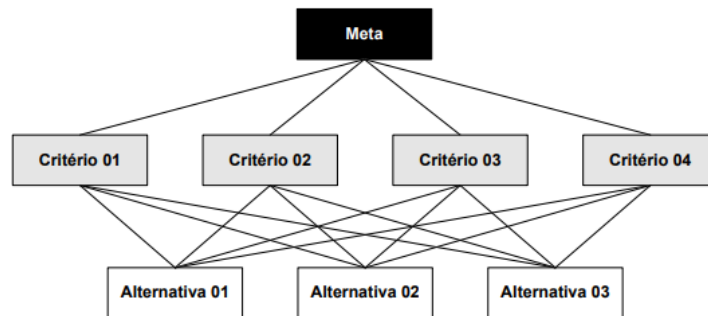


Figura 5 - Estrutura Hierárquica

De seguida, são definidos os critérios considerados relevantes pelos decisores e é realizada a comparação das alternativas para cada critério. Para cada critério, cada alternativa é comparada com as restantes em pares e assume valores de acordo com a escala de importância relativa, apresentada na Tabela 2. Ou seja, se uma alternativa  $i$  é igualmente ou mais preferida que a alternativa  $j$  que está a ser comparada assume um valor entre 1 a 9 enquanto a alternativa  $j$  assume o valor recíproco quando comparada com a alternativa  $i$ . Uma matriz  $A$  (Figura 5) é construída, onde  $a_{ij}$  é o valor de acordo com a importância relativa da comparação da alternativa  $i$  com a alternativa  $j$  enquanto  $a_{ji}$  é o valor recíproco da comparação da alternativa  $j$  com a alternativa  $i$ .

Tabela 2 - A escala de Saaty para comparação a pares (adaptado de 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	Valores intermédios
$\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{9}$	Recíprocos

C	$a_1$	...	$a_i$	...	$a_n$
$a_1$	1				
...		[1]			
$a_i$			$P_c(a_i, a_1)$		
...				[1]	
$a_n$					1

Figura 6 - Matriz de comparação de elementos no método AHP (adaptado de Turcksin et al.,2011)

Depois, cada valor da matriz  $A$  é dividido pela soma dos valores da sua coluna e é construída uma nova matriz  $X$ . Posteriormente, a soma dos valores de cada linha da nova matriz  $X$  é dividida pelo número de alternativas. O resultado é o vetor de prioridade de cada alternativa que classifica as alternativas pela ordem de importância para cada critério (Alexopoulos et al., 2022).

Seguidamente, é necessário calcular o valor médio de consistência  $\lambda_{max}$ . Cada coluna da matriz  $A$  é multiplicada pelo vetor de prioridade correspondente desenvolvendo uma nova matriz  $Z$ . Posteriormente, a soma dos valores de cada linha da matriz  $Z$  é dividida pelo vetor de prioridade correspondente e a média dos valores calculados é  $\lambda_{max}$ . (Alexopoulos et al., 2022).

Com o valor médio de consistência calcula-se o valor do Índice de Consistência (IC), como representa a equação 6, onde  $n$  diz respeito ao número de alternativas (Alexopoulos et al., 2022).

*Equação 1 - Índice de Consistência (Alexopoulos et al., 2022)*

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

Com o valor de IC faz-se o cálculo do Razão de Consistência (RC), representada na equação 7, onde  $IR$  é o índice aleatório, um valor tabelado que corresponde a um  $n$  número de alternativas (Alexopoulos et al., 2022).

*Equação 2 - Razão de Consistência (Alexopoulos et al., 2022)*

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

Quando RC inferior a 10% pode-se considerar a tomada de decisão consistente. Por último, a soma dos vetores de prioridade de cada alternativa para cada critério fornece os vetores de prioridade global, que é a classificação geral das alternativas (Alexopoulos et al., 2022).

### 3.2. Caso de Estudo

No âmbito da EC, o método AHP foi aplicado ao processo da pintura da fábrica da Toyota, em Ovar. A priorização de estratégias de economia circular, de modo a garantir maior sustentabilidade, um dos valores defendidos pela Toyota, vai fornecer suporte à empresa na tomada de decisão.

### 3.2.1. Processo da Pintura

As cabines dos veículos saem do setor de soldadura e entram no setor da pintura onde são primeiramente submetidos a uma lavagem com desengorduramento a fim de retirar as impurezas que a chapa apresenta do processo de soldadura. De seguida, é realizado um pré-tratamento em 6 tanques. No primeiro tanque faz-se o desengorduramento mergulhando-se totalmente o carro num banho em rotação com agitação. O segundo tanque é um banho intermédio de água para garantir que não há contaminação nas restantes etapas. De seguida, o tanque da ativação que prepara quimicamente a chapa para a quarta etapa fornece a primeira película que previne a corrosão. No quinto tanque há uma lavagem com água desmineralizada para garantir que não há contaminação. Por último, no sexto tanque realiza-se a eletrodeposição, processo para cobrir a chapa com recurso a uma substância condutora havendo emigração de partículas eletricamente carregadas e tem o intuito de proteger a chapa.

De seguida, as cabines dos veículos são secas numa estufa e passam pela primeira inspeção manual. Na fase seguinte é aplicada a vedação que evita a corrosão e são também submetidos a uma limpeza para posteriormente na cabine de pintura serem então submetidos à pintura primária e secos numa estufa seladora. A pintura primária tem como finalidade preparar a superfície para a camada de acabamento. A pistola utilizada é electrostática, ou seja, há uma descarga elétrica entre a chapa e a pistola o que permite, através da diferença de potencial, que a tinta se agarre melhor, diminuindo desperdício e aumentando a produtividade e impacto ambiental. Nesta fase, volta a haver uma inspeção manual da pintura, todos os defeitos detetados são reparados através de retificação manual.

### 3.3. Estratégias Equacionadas

A Toyota rege-se pelos valores de sustentabilidade e procura sempre que possível melhorar os seus produtos e processos sem nunca colocar em causa a qualidade da marca e do serviço. Foram então discutidas diferentes estratégias possíveis de adotar no âmbito da EC no setor da pintura, que ajudarão a empresa a diminuir a sua pegada ecológica. Foram equacionadas três estratégias, sendo elas:

- Estratégia 1 (E1) - Substituição do diluente de limpeza com base solvente por diluente de base aquosa
- Estratégia 2 (E2) - Adoção de um sistema de pintura robotizado
- Estratégia 3 (E3) - Instalação de sistema de coletores solares para auxiliar aquecimento da cabine de pintura

Depois de reunidas as várias estratégias, foi então necessário fazer-se uma apreciação das mesmas, que será apresentada mais à frente.

### 3.4. Definição dos Critérios

Depois de identificadas possíveis estratégias que a Toyota pode adotar para melhorar o seu processo produtivo foi necessário identificar-se os critérios. Sem esquecer que a sustentabilidade assenta em aspetos económicos, sociais e ambientais, os critérios são a imagem disso. O processo de definição de critérios bem como a sua relevância pertence à Direção de Operações da TCAP Ovar e ao responsável pela produção e pintura, eles são os decisores. As decisões foram discutidas e realizadas nas reuniões diárias que a equipa realiza. Foram então selecionados cinco critérios e os mesmos, bem como a sua definição encontram-se de seguida:

- Viabilidade Técnica (C1): através dos recursos disponíveis pela empresa e dos recursos necessários para colocar a estratégia em prática qual é a facilidade com que a medida pode efetivamente ser implementada com sucesso garantindo a manutenção/melhoria de resultados;
- Impacto Ambiental (C2): avaliação do impacto que as estratégias terão num conjunto de problemas ambientais, por exemplo, redução de emissões gases, diminuição de consumo de energia, redução de resíduos e poluição;
- Viabilidade económica (C3): ter em conta os custos de implementação, mas também o potencial de diminuição dos custos a longo prazo, ou seja, custo-benefício;
- Inovação (C4): em que medida a estratégia apresenta inovação para a empresa e é passível de melhoria a longo prazo;
- Impacto na Segurança e saúde dos trabalhadores (C5): o impacto que as medidas terão nos trabalhadores.

A relevância dos critérios viabilidade técnica e inovação são critérios que dependem de fatores como a situação da empresa, os seus valores e objetivos; por exemplo o estado atual dos seus equipamentos e processos, as metas estratégicas e o impacto que pretendem obter com as medidas a implementar.

Os critérios possuem caráter qualitativo e por isso será utilizada uma escala de avaliação numérica para uma melhor compreensão.

### 3.5. Apreciação das Estratégias

Através da literatura foi realizada uma apreciação das estratégias para suporte do mapeamento de informação da tomada de decisão no âmbito da EC e em que medida estas garantem mais sustentabilidade.

### 3.5.1. Substituição do diluente de limpeza de base solvente por diluente de base aquosa

Na Toyota o diluente utilizado para limpeza na fase final da pintura possui uma base solvente. Os solventes são responsáveis por elevadas quantidades de compostos orgânicos voláteis (COV'S), o que é uma preocupação para a empresa. Assim, uma das estratégias equacionadas é a substituição deste diluente de base solvente por um diluente de base aquosa. No âmbito da EC, esta medida irá reduzir a poluição causada por estes compostos, sendo este recurso mais sustentável e haverá ainda otimização do mesmo.

Em termos ambientais, os solventes são uma grande fonte de preocupação uma vez que ao evaporarem, libertam COV's que ao reagirem na presença da luz solar com óxidos de azoto e óxidosulfúricos provocam poluição atmosférica. (Pedro Ferreira Maria Marques et al., 2013).

Atribui-se aos COV's um papel nocivo para a qualidade do ar e para a saúde que resulta principalmente do uso destes componentes em atividades industriais. Os COV's são hidrocarbonetos que possuem uma volatilidade que lhes fornece capacidade de espalharem para distâncias relativamente longe do local onde foram emitidos. Estes compostos são formados por carbono, hidrogénio, e outros elementos; todos eles considerados gases com efeito de estufa contribuindo para o aumento da concentração de ozono, elemento particularmente responsável pelo aumento médio da temperatura do planeta. Além da poluição causada na atmosfera, também contribuem para a poluição da água (Cristina & Ribeiro, 2015).

Os efeitos diretos das emissões de COV, produzem também consequências na saúde humana. Estas consequências dependem das quantidades absorvidas e tempos de exposição. Num efeito imediato, o contacto dos trabalhadores com COV's pode provocar irritações cutâneas, nos olhos e nas vias respiratórias, mas a longo prazo podem-se desenvolver problemas mais graves nomeadamente problemas cardíacos, hepáticos, digestivos e efeitos cancerígenos. (Marisa & Gomes, n.d.) Os éteres de glicol de cadeia curta são extremamente nocivos para a medula óssea e outros COV possuem efeitos diretos no corpo humano nomeadamente no coração, fígado e associa-se a exposição aos vapores de benzeno à leucemia (Cristina & Ribeiro, 2015).

Foi contactado um fornecedor da empresa ITC – “Investigação Técnica e Química”, que é uma empresa que produz produtos biodegradáveis com percentagens de COV's muito baixas e que garante soluções para as situações mais desafiantes de modo a garantir a mesma qualidade que os produtos com base de solventes fornecem. Da reunião com o fornecedor foram fornecidas informações bastante interessantes, como, que os seus clientes obtiveram diminuições significativas das quantidades de produtos usadas, até 40%. O fornecedor garantiu a disponibilidade para a realização de testes de modo a verificar que a qualidade se mantinha e de modo a serem realizados estudos caso seja necessário modificar o produto à imagem da situação na empresa.

No ano de 2022, a Toyota gastou 2800 litros do seu diluente, que se traduzem em 4908€ por ano, ou seja, o preço do produto usado é cerca de 1,75€ por litro. Considerando que o preço por litro dos produtos deste fornecedor varia dentro dos mesmos valores e que haverá um maior

aproveitamento, reduzindo a necessidade de compra de tantos litros, será de um ponto de vista económico uma medida vantajosa. Assim, podemos concluir que não há investimentos iniciais significativos e os testes que podem ser necessários para avaliar a qualidade do produto possuem uma despesa relativamente baixa.

No que à viabilidade técnica diz respeito, esta estratégia é altamente viável e possui baixo custo e riscos mínimos, mantendo a qualidade do processo. Em relação ao critério Inovação, esta estratégia é considerada inovadora no sentido que representa uma mudança em direção à sustentabilidade.

### **3.5.2. Implementação de um sistema de pintura robotizado**

Os robôs são um dos pilares da I4.0 e permitem otimizar processos, reduzir resíduos minimizando os impactos ambientais e ajudam a alcançar uma produção mais limpa. A implementação de tecnologia pode de facto trazer benefícios para a implementação de economia circular garantindo uma melhor sustentabilidade. O processo de pintura na Toyota ainda é realizado manualmente, e por isso, foi equacionada a estratégia de implementação de um sistema de pintura robotizado.

A robotização é um processo complexo, mas que já comprovou possuir uma excelente relação custo-benefício a médio/longo prazo. A robotização usada na pintura tem a capacidade de manipulação, são robôs com muita flexibilidade e as suas características principais são o controlo de trajetórias, os movimentos rápidos e a baixa repetibilidade, substituindo a mão de obra num trabalho repetitivo e de risco (De & Taucita1, n.d.).

Um sistema mais robotizado permite em termos técnicos uma maior gama de produtos produzidos; um aumento da precisão, robustez, rapidez, uniformidade e suporte a ambientes hostis, incrementando os índices de qualidade e de peças rejeitadas. Os fatores económicos vantajosos consistem no uso eficiente de unidades de produção intensiva, no aumento de produtividade e na redução do tempo de preparação da fabricação. Em termos do impacto na qualidade de trabalho permite a diminuição do número de acidentes, o afastamento de contacto dos trabalhadores com substâncias perigosas para a saúde e diminuição de movimentos repetitivos que também causam efeitos indesejados no bem-estar (De & Taucita1, n.d.). A redução das tarefas realizadas por operadores em deterioramento dos sistemas robotizados aumenta a eficiência da unidade e aliado à redução da mão de obra, também baixa consequentemente os custos de operação.

O processo usado na pintura é um processo por spray, onde recorrendo a uma pistola de ar o revestimento líquido é direcionado sobre o objeto a pintar. Há diferentes sistemas inseridos neste processo, nomeadamente o electrostático que é o processo usado na Toyota. Ele caracteriza-se por as partículas do revestimento e o produto a ser revestido possuem cargas eléctricas de sinal oposto, o que provoca uma atração de cargas e consequentemente permite uma pintura mais uniforme. No entanto, estes processos levam à contaminação do ar o que potencializa problemas de respiração; o ruído constante provocado pela pistola provoca a longo

prazo problemas de audição ao operador; o perigo de explosão existente pela utilização de tintas e diluentes normalmente inflamáveis e que com o ar em pequenas partículas, formam uma atmosfera potencialmente explosiva; e por último; o ambiente cancerígeno causado pela composição dos revestimentos usados (Almeida, 2007).

Os sistemas robotizados são uma forma de automatização e uma solução flexível sendo que não são necessárias grandes mudanças no chão de fábrica e são equipamentos rentáveis em diferentes tarefas. Este sistema é utilizado na indústria automóvel, onde a trajetória de pintura implementada num controlador consegue ser utilizada durante anos até que o modelo do chassis que é pintado seja substituído por uma nova versão.

A I4.0 rege-se pela adoção nos processos industriais de diversas técnicas, tecnologias e equipamentos em constante inovação para o aumento da eficiência, fiabilidade e previsibilidade, e deste modo, atender à concorrência existente no mercado produzindo o produto com a melhor qualidade ao menor custo possível (Pedro Santos Ferreira et al., 2018).

As vantagens da automatização industrial consistem principalmente (Pedro Santos Ferreira et al., 2018):

- na melhoria da produtividade;
- na redução do custo de produção uma vez que usando equipamentos automáticos diminui-se a mão-de-obra humana, reduzindo os custos com pessoal e, consequentemente, o custo de produção;
- na redução de níveis de produtos com defeito e de desperdícios de tintas, diluentes e outros componentes;
- no aumento da Qualidade do Produto visto que em trabalhos repetitivos realizados por operadores é quase impossível manter os níveis de qualidade sempre elevados;
- na melhoria das condições de trabalho dos operadores, já que são postos de trabalho pouco ergonómicos e nocivos para a saúde;
- aumento da fiabilidade do processo, já que diversas operações são complexas para um operador humano, mas são facilmente executadas por um sistema automatizado.

Os robots de pintura são uma mais valia devido às suas características, todavia, também há pontos menos fortes, como o alto custo inicial (Pedro Santos Ferreira et al., 2018).

Para perceção da viabilidade económica desta medida foi utilizado como base um estudo realizado na empresa OGMA – Indústria Aeronáutica de Portugal que tinha como objetivo estimar o impacto e calcular a viabilidade da implementação de um sistema automático para a pintura de aeronaves (Pedro Santos Ferreira et al., 2018).

Na escolha do robô, os critérios serão os mesmos, a necessidade de flexibilidade para poder adaptar outros modelos que possam aparecer no futuro, um sistema o mais autónomo possível e tecnicamente evoluída de modo a se manter atual durante vários anos e, por último, a solução

tem de cumprir todos os requisitos necessários para obter todas as certificações fundamentais. Como por exemplo, devido aos solventes na tinta todos os componentes devem ter certificado para regulamentação anti explosiva ATEX, que é expressamente obrigatória nestes equipamentos. Para além disto, o sistema terá de respeitar as dimensões do modelo que é fabricado. Os componentes do robot serão compostos por uma plataforma, braço robótico (sendo necessário considerar que são precisos um de cada lado de modo à pintura de realizar de forma igual e simultânea dos dois lados), barra elevatória, torre de elevação, suporte de barra, controlador do braço robótico, tanque de tinta e motor de elevação. É necessário também ter em consideração que a pistola terá de ser compatível com o braço robótico (Pedro Santos Ferreira et al., 2018).

Assim, os valores a ser considerados estão indicados na tabela 3.

*Tabela 3 - Custos diretos do Robot da Pintura no caso da OGMA (fonte: (Pedro Santos Ferreira et al., 2018)*

	<b>Robot Pintura</b>
<b>Estrutura Robótica</b>	86600€
<b>Equipamento de operação</b>	55000€
<b>Outras considerações</b>	86600€-173200€
<b>Total</b>	228200€ - 314800€

Em relação ao impacto que este sistema terá no tempo de operação chegou-se a valores de menos 64% na aplicação do primário e 86% na tinta de acabamento, sendo que no processo total estes valores significavam apenas uma melhoria de 5%. A otimização de gastos em tinta verificou-se que podia ultrapassar os 50%. Se o investimento for mínimo calculou-se que o retorno de investimento podia acontecer em 8 anos, e se fosse máximo em 10 anos, sendo que foi assumido um tempo de vida útil de 10 anos para o sistema robótico (Pedro Santos Ferreira et al., 2018).

Pode-se concluir que o investimento inicial é elevado, mas pode resultar em benefícios significativos ao longo dos anos, como, por exemplo, redução de custos operacionais e aumento da eficiência. O tempo de retorno do investimento é considerável.

A estratégia é viável tecnicamente, mas possui desafios consideráveis e um planeamento cuidadoso para garantir a manutenção ou melhoria de resultados. Esta estratégia representa uma inovação considerável e importante para a empresa, alinhada com os princípios da sustentabilidade, tecnologia e com potencial para melhorias futuras.

### 3.5.3. Instalação de sistema de coletores solares para auxiliar aquecimento da cabine de pintura

O sistema de aquecimento da cabine de pintura usa como fonte de energia térmica a queima de gás propano e a sua substituição pelo uso de energias renováveis como fonte de energia é uma ferramenta da economia circular, que garante a sustentabilidade. As cabines de pintura usam como fonte de energia térmica a queima de gás propano para aquecimento, o que se traduz em consumos de energia elevados, e nesse sentido, o uso de energias renováveis ou recuperação de energia são soluções mais interessantes. As emissões de CO<sub>2</sub> são o problema mais significativo (Santos & Máximo, n.d.). O uso de recursos renováveis respeita todos os princípios da economia circular.

Nos dias de hoje a inovação deve ser algo que caracterize uma empresa para, neste sentido, ganhar vantagem competitiva, criando valor económico e consequentemente definir-se como viável no seu setor. Uma organização utilize energias renováveis, que são energias limpas, inesgotáveis, seguras e não poluentes, nomeadamente a energia fotovoltaica gera automaticamente vantagem competitiva uma vez que é uma maneira inovadora de se produzir através da combinação de recursos disponíveis (Neto, 2010). Esta é então uma estratégia inovadora que possui espaço para melhoria contínua no sentido de no futuro se poder aumentar o uso da energia solar noutros processos da empresa.

O consumo de combustíveis fósseis e a forte dependência dos mesmos está a levar à sua escassez e é um grave problema quando se fala de sustentabilidade uma vez que são dos principais culpados por uma pegada negativa no aquecimento global e alterações climáticas. O uso de fontes de energia renováveis é necessário ao desenvolvimento sustentável e imprescindível para diminuir drasticamente o impacto ambiental das emissões de gases com efeito de estufa ao mesmo tempo que satisfaz as necessidades energéticas e económicas. (Gomes, n.d.).

Para análise da viabilidade económica foi utilizada a dissertação “*Estudo de soluções energéticas para a cabine de pintura automóvel*” realizada na Caetano Auto Algarve S.A, em Faro. Neste estudo é também utilizado a par dos coletores um recuperador de calor e os custos deste investimento estão apresentados na Tabela 4 (Santos & Máximo, n.d.).

Tabela 4 - Estudo económico da solução proposta (fonte: (Santos & Máximo, n.d.))

<b>Período analisado (Vida útil)</b>	20 anos
<b>Investimento inicial</b>	15.700€
<b>Retorno</b>	7 anos
<b>VAL</b>	9.020,38€
<b>TIR</b>	16,65%

Os coletores solares são um sistema que convertem a luz solar em calor e o estudo demonstrou que ficaríamos apenas dependentes do gás propano para o aquecimento da cabine, nos meses de inverno (novembro a janeiro). No entanto, a instalação de um recuperador de calor, iria permitir que a dependência nos meses de inverno passasse a ser praticamente zero. (Santos & Máximo, n.d.).

As vantagens que esta solução apresentou foram a diminuição considerável da dependência de combustível fóssil auxiliar; a energia disponível no Verão exceder a necessária e por isso puder ser aplicada noutra parte da empresa e possuir um VAL e TIR interessantes. Esta estratégia demonstrou-se um bom investimento, ao mesmo tempo que contribuiu para a melhoria significativa das emissões de dióxido de carbono (Santos & Máximo, n.d.).

O investimento inicial é relativamente baixo para a vida útil do sistema, a diminuição dos custos que irá resultar desta estratégia é muito significativa e possui um tempo de retorno razoável. Tecnicamente a estratégia é viável, os desafios financeiros são menores do que a estratégia 2 e mantém a qualidade do processo.

### 3.6. Avaliação dos critérios

Os critérios equacionados tratam-se de critérios qualitativos e, para uma melhor compreensão da avaliação realizada, serão traduzidos numa escala de avaliação numérica. Será usada a escala de Saaty, de 1 a 9 e a avaliação está apresentada na tabela seguinte.

*Tabela 5 - Avaliação dos Critérios através de uma escala numérica*

	<b>Viabilidade Técnica</b>	<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Viabilidade económica</b>	<b>Inovação</b>	<b>Impacto na Segurança e Saúde</b>
<b>Estratégia 1</b>	9	5	9	5	9
<b>Estratégia 2</b>	5	5	3	9	7
<b>Estratégia 3</b>	7	7	5	7	3



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, é demonstrado detalhadamente todo o processo de aplicação do método AHP, bem como os seus resultados e explicação.

### 4.1. Aplicação do Método AHP

Neste subcapítulo será então aplicado o método AHP, seguindo-se, mostrando-se e explicando-se todos os passos já anteriormente descritos aplicados ao caso de estudo.

#### 4.1.1. Hierarquia

Depois de definidos os critérios, é então necessário a construção da árvore hierárquica para um melhor entendimento do caso em estudo (Figura 7).

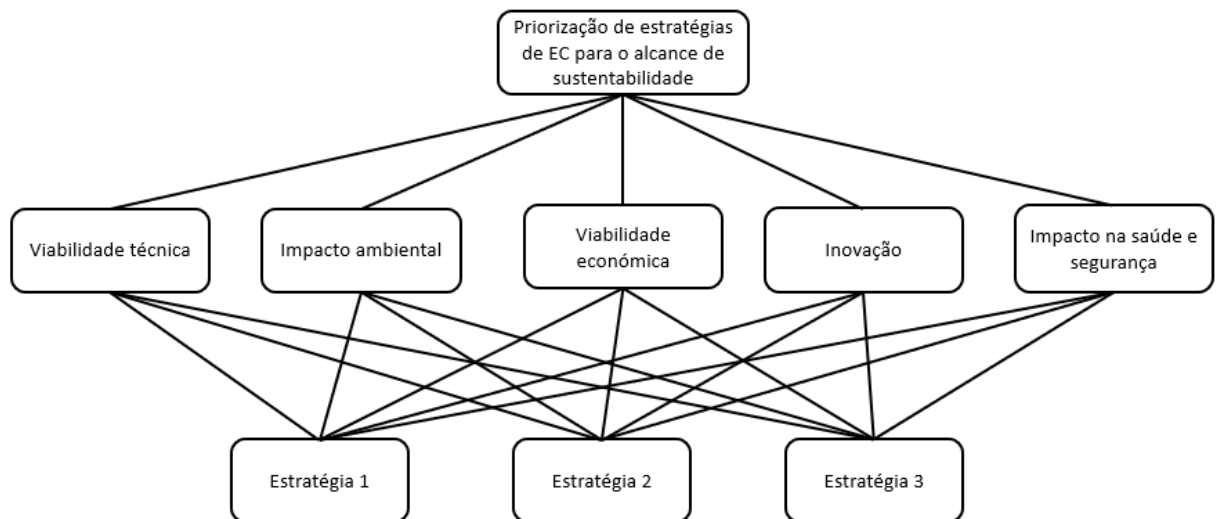


Figura 7 - Árvore Hierárquica AHP

Como referido anteriormente, o primeiro nível hierárquico diz então respeito ao objetivo, priorizar um conjunto de estratégias de sustentabilidade; o nível intermédio diz respeito aos critérios e por último o terceiro nível refere-se às alternativas, neste caso, às estratégias.

#### 4.1.2. Matriz de Preferência do Critérios

Assim, depois de se ter realizado a árvore hierárquica, é agora necessário fazer a comparação de critérios par a par. Esta comparação foi realizada com base em avaliações feitas pela Direção de Operações da TCAP Ovar, onde primeiramente a Direção definiu a importância de cada critério e decidiu que tanto o critério de viabilidade económica como o da segurança e saúde de

trabalhadores seriam de extrema importância e teriam o mesmo peso. O critério da inovação e a viabilidade técnica foram considerados igualmente importantes, mas não tão importantes quanto o impacto ambiental.

A realização da matriz de preferência de critérios (Tabela 6) foi então realizada através da importância definida pelos tomadores de decisão obtida por meio de reuniões, como referido anteriormente, de forma verbal, e traduzida na escala de intensidade de 9 pontos de Saaty.

Tabela 6 - Matriz de Preferência dos Critérios

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>Prioridade</b>
<b>C1</b>	1	1/3	1/7	1	1/7	4,8%
<b>C2</b>	3	1	1/5	3	1/5	11,0%
<b>C3</b>	7	5	1	7	1	39,7%
<b>C4</b>	1	1/3	1/7	1	1/7	4,8%
<b>C5</b>	7	5	1	7	1	39,7%
<b>Soma</b>	19	11,6666	2,4856	19	2,4856	

O cálculo do peso relativo de cada critério foi realizado no software disponível pela *Spicelogic*. Os pesos resultantes para cada critério com base nas comparações par a par são então 39,7% para o critério viabilidade econômica bem como, o critério segurança e saúde, de seguida o impacto ambiental com 11,3%, e, por último, o critério inovação e viabilidade técnica possuem o peso de 4,8%.

Depois de calculados os pesos relativos é então necessário calcular a razão de consistência (RC), que permite confirmar se os tomadores de decisão foram consistentes nas suas avaliações.

O software utilizado também forneceu o valor do RC, que possui um valor de 2,1%, ou seja, é inferior a 10% e por isso podemos concluir que há coerência e consistência na tomada de decisão.

De seguida, no *excell*, foi calculada a matriz normalizada dos critérios, para se obter o valor médio, apresentado na tabela seguinte.

Tabela 7 - Matriz Normalizada e Valor Médio para cada critério

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>Valor médio</b>
<b>C1</b>	0,0526	0,0286	0,0575	0,0526	0,0575	0,0498
<b>C2</b>	0,1579	0,0857	0,0805	0,1579	0,0805	0,1125
<b>C3</b>	0,3684	0,4286	0,4023	0,3684	0,4023	0,3940
<b>C4</b>	0,0526	0,0286	0,0575	0,0526	0,0575	0,0498
<b>C5</b>	0,3684	0,4286	0,4023	0,3684	0,4023	0,3940

### 4.1.3. Cálculo das Matrizes de Comparação das Alternativas para cada critério

Agora é necessário realizar a comparação par a par de cada alternativa no terceiro nível hierárquico para cada critério do segundo nível hierárquico. O presente caso de estudo é definido por cinco critérios, o que conseqüentemente se traduz no cálculo de cinco matrizes. As comparações foram realizadas com base na escala fundamental de Saaty que varia de 1 a 9, anteriormente explicada.

As matrizes calculadas estão apresentadas de seguida nas tabelas 8 a 12, para os critérios definidos, viabilidade técnica, impacto ambiental, viabilidade económica, inovação e saúde e segurança, respetivamente. Esta comparação também é baseada na avaliação dos tomadores de decisão e foi utilizado o mesmo software.

*Tabela 8 - Matriz de comparação do Critério Viabilidade Técnica*

<b>Viabilidade Técnica</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>
<b>E1</b>	<b>1</b>	9	3
<b>E2</b>	1/9	<b>1</b>	1/5
<b>E3</b>	1/3	5	<b>1</b>
<b>Total</b>	1,4444	15	4,2

*Tabela 9 - Matriz de comparação do Impacto Ambiental*

<b>Impacto Ambiental</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>
<b>E1</b>	<b>1</b>	1	1/5
<b>E2</b>	1	<b>1</b>	1/5
<b>E3</b>	5	5	<b>1</b>
<b>Total</b>	7	7	1,4

Tabela 10 - Matriz de comparação do Critério Viabilidade Económica

<b>Viabilidade Económica</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>
<b>E1</b>	<b>1</b>	9	3
<b>E2</b>	1/9	<b>1</b>	1/5
<b>E3</b>	1/3	5	<b>1</b>
<b>Total</b>	1,4444	15	4,2

Tabela 11 - Matriz de comparação do Critério Inovação

<b>Inovação</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>
<b>E1</b>	<b>1</b>	1/9	1/5
<b>E2</b>	9	<b>1</b>	3
<b>E3</b>	5	1/3	<b>1</b>
<b>Total</b>	15	1,4444	4,2

Tabela 12 - Matriz de comparação do Critério Segurança e Saúde dos Trabalhadores

<b>Segurança e Saúde</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>
<b>E1</b>	<b>1</b>	1	7
<b>E2</b>	1	<b>1</b>	7
<b>E3</b>	1/7	1/7	<b>1</b>
<b>Total</b>	2,1429	2,1429	15

Os valores obtidos na comparação par a par apresentada nas tabelas 8 a 12 reflete a classificação realizada em conjunto com os tomadores de decisão. De seguida, são apresentadas as matrizes denormalização para cada critério, nas tabelas 13 a 17.

Tabela 13 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Viabilidade Técnica

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>Valor Médio</b>
<b>E1</b>	0,6923	0,6	0,7143	0,6689
<b>E2</b>	0,0769	0,0667	0,0476	0,0637
<b>E3</b>	0,2308	0,3333	0,2381	0,2674

Tabela 14 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Impacto Ambiental

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>Valor Médio</b>
<b>E1</b>	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429
<b>E2</b>	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429
<b>E3</b>	0,7143	0,7143	0,7143	0,7143

Tabela 15 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Viabilidade Econômica

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>Valor Médio</b>
<b>E1</b>	0,6923	0,6	0,7143	0,6689
<b>E2</b>	0,0769	0,0667	0,0476	0,0637
<b>E3</b>	0,2307	0,3333	0,2381	0,2674

Tabela 16 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Inovação

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>Valor Médio</b>
<b>E1</b>	0,0667	0,0769	0,0476	0,0637
<b>E2</b>	0,6	0,6923	0,7143	0,6689
<b>E3</b>	0,3333	0,2308	0,2381	0,2674

Tabela 17 - Matriz Normalizada e Valor Médio do Critério Segurança e Saúde dos Trabalhadores

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>Valor Médio</b>
<b>E1</b>	0,4667	0,4667	0,4667	0,4667
<b>E2</b>	0,4667	0,4667	0,4667	0,4667
<b>E3</b>	0,0667	0,0667	0,0667	0,0667

#### 4.1.4. Razão de Coerência dos Critérios

O cálculo do índice de coerência para cada um dos critérios valida as avaliações realizadas pelos tomadores de decisão e demonstra se estas foram coerentes e consistentes. A razão de coerência para cada critério está demonstrada na tabela seguinte e foram calculados no mesmo *software* anteriormente referido.

Tabela 18 - Razão de Coerência

	<b>Viabilidade técnica</b>	<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Viabilidade económica</b>	<b>Inovação</b>	<b>Impacto na Segurança e Saúde</b>
<b>CR</b>	2,30%	0,00%	2,30%	3,00%	0,00%

Podemos concluir que as avaliações realizadas pelos tomadores de decisão foram coerentes uma vez que todos os índices se encontram inferiores a 10%.

#### 4.1.5. Discussão de Resultados

Neste subcapítulo apresenta-se o último passo da aplicação do método AHP. Para se determinar o ranking das estratégias, utilizam-se os valores médios obtidos em cada critério para cada medida (colunas “Valor Médio” das tabelas 13 a 17) e o valor médio obtido para cada critério (coluna “Valor Médio” da Tabela 7). O valor final é a média ponderada de cada critério com a respetiva ponderação permitindo assim calcular o valor final da relevância de cada estratégia.

Tabela 19 - Cálculo do Valor Final

	Viabilidade Técnica	Impacto ambiental	Viabilidade económica	Inovação	Saúde e segurança	Valor final
<b>E1</b>	0,6689	0,1429	0,6689	0,0637	0,4667	<b>0,4999</b>
<b>E2</b>	0,0637	0,1429	0,0637	0,6689	0,4667	<b>0,2615</b>
<b>E3</b>	0,2674	0,7143	0,2674	0,2674	0,0667	<b>0,2386</b>
<b>Ponderação</b>	0,0497	0,1125	0,3940	0,0497	0,3940	

Como se pode observar dos resultados obtidos, a estratégia 1 teve 0,4999 pontos enquanto que a estratégia 2 teve 0,2615 e, por fim, a estratégia 3 obteve 0,2386 pontos. É então possível concluir que a medida mais vantajosa, de acordo com os critérios do caso de estudo é medida da adoção de um diluente de base aquosa.

A estratégia 1 foi a que teve melhor avaliação no critério Viabilidade económica um dos mais relevantes a par com a Saúde e Segurança dos Trabalhadores onde esta estratégia também teve uma avaliação elevada a par com a estratégia 2. Apesar da relevância do critério Viabilidade Técnica não ser muito elevada a estratégia 1 também teve uma boa avaliação. No critério inovação a estratégia ficou aquém, no entanto, ele era dos critérios menos relevantes. Em relação às estratégias 2 e 3 elas mostraram ter um valor final próximo. A estratégia 3 foi a que teve melhor pontuação teve a melhor avaliação no Impacto Ambiental, no entanto este critério não possuía uma ponderação elevada. O mesmo aconteceu na estratégia 2, que ficou significativamente melhor posicionada no critério Inovação, mas este era a par da Viabilidade Técnica, o critério menos relevante.

## 4.2. Análise de Sensibilidade

A análise sensibilidade tem como objetivo definir qual será a variação do peso de determinado critério, que fará com que a alternativa que era “a escolhida”, passe a não ser selecionada. A mesma foi realizada no *excel*.

De seguida faremos a análise de sensibilidade para cada um dos critérios.

### Impacto da variação da importância do critério Viabilidade Técnica

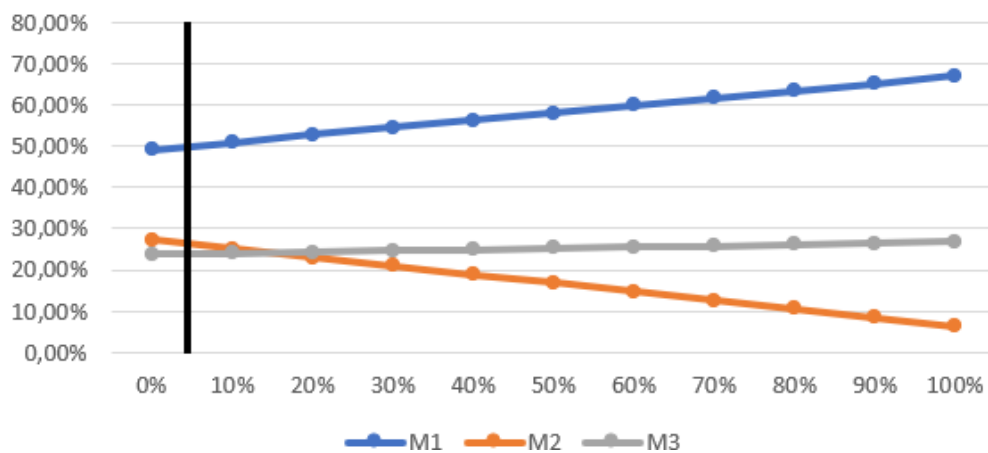


Figura 8 - Impacto da variação da importância do critério Viabilidade Técnica

Na Figura 8, podemos observar que para o critério viabilidade técnica com o peso atual de 4,97%, representado pela linha preta vertical, a alternativa escolhida é a estratégia 1. Independentemente da variação da importância do critério a escolha será sempre a estratégia 1.

### Impacto da variação da importância do critério Impacto Ambiental

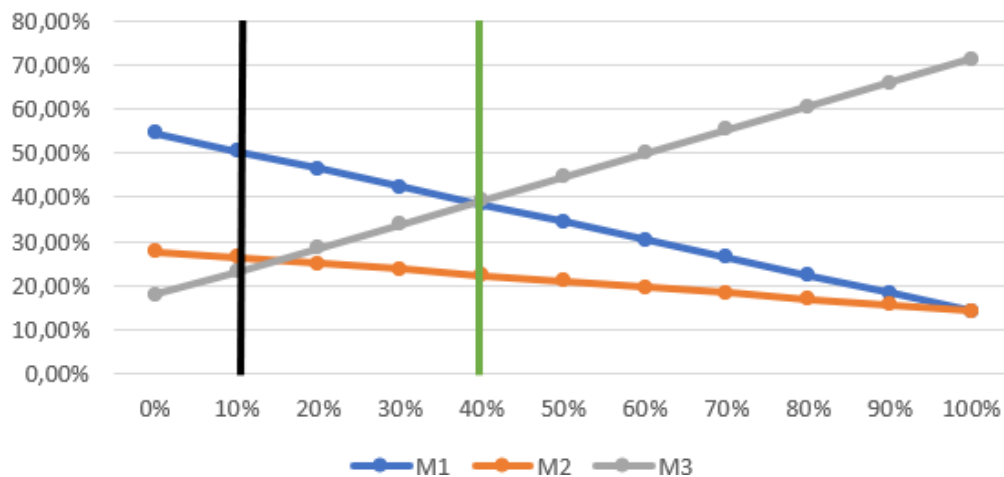


Figura 9 - Impacto da variação da importância do critério Impacto Ambiental

Na figura 9, podemos observar que para o critério Impacto Ambiental com a importância de 11,25% (linha preta vertical) a estratégia escolhida é a 1. Aumento o peso do critério para cerca de 40% a estratégia escolhida passaria a ser a estratégia 3, representada pela linha verde vertical.

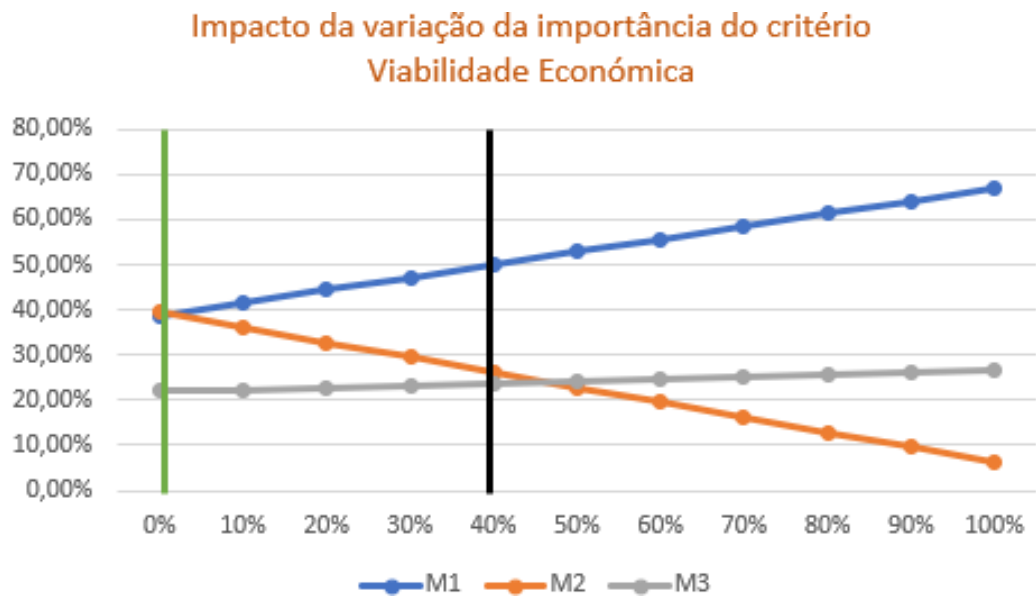


Figura 10 - Impacto da variação da importância do critério Viabilidade Económica

Na figura 10, podemos observar que para o critério Viabilidade Económica com o peso de 39,4% a estratégia escolhida é também a 1. No entanto, ao diminuir a importância do critério para cerca de 1% a escolha iguala as estratégias 1 e 2, e num valor ínfimo de menos de 1% a estratégia escolhida é a 2.

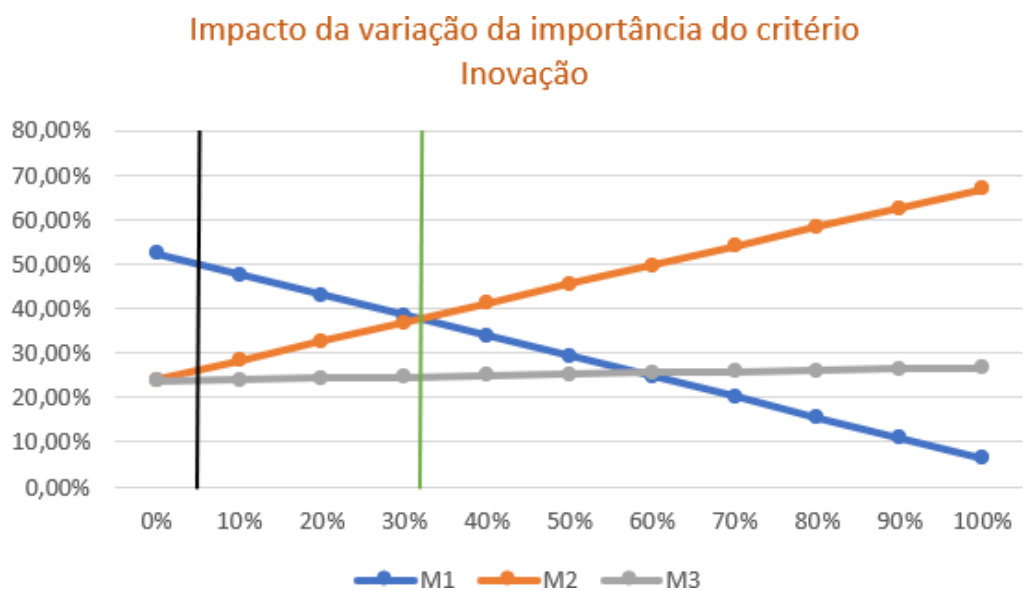


Figura 11 - Impacto da variação da importância do critério Inovação

Na figura 11, podemos observar que para o critério Inovação com o peso de 4,97% a estratégia escolhida é novamente a 1. Quando a importância do critério sobe para cerca de 35% a escolha cai sob a estratégia 2.

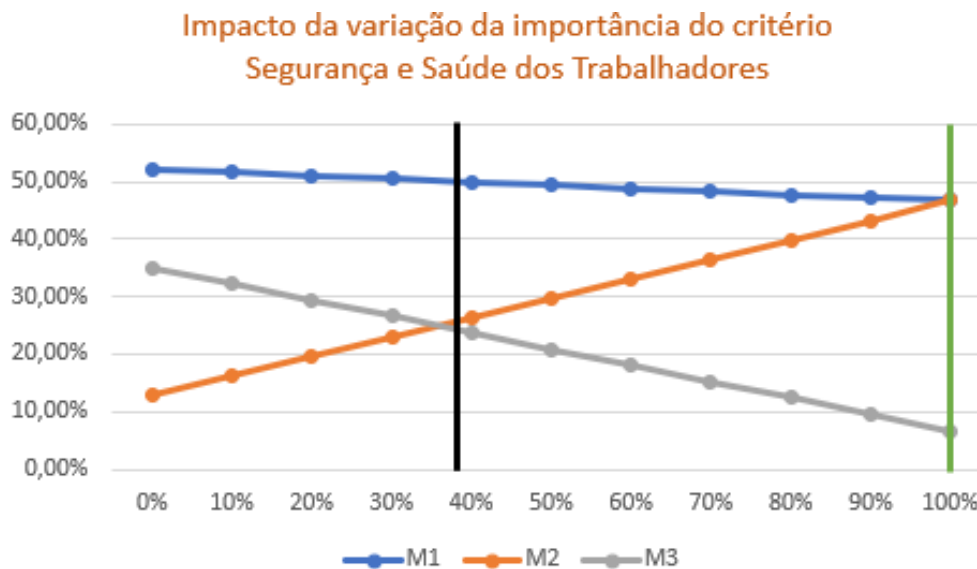


Figura 12 -Impacto da variação da importância do critério Segurança e Saúde dos Trabalhadores

Por fim, na figura 12, podemos observar que para o critério Segurança e Saúde dos Trabalhadores com a importância de 39,4% a estratégia escolhida é a 1, e apenas se a sua importância fosse 100% é que a estratégia 2 poderia igual a estratégia 1.

A análise de sensibilidade permitiu concluir que o resultado do *ranking* é sólido e consistente. O mesmo só sofreria alterações se a opinião dos decisores mudasse de forma significativa.

## 5. CONCLUSÃO

Neste quinto e último capítulo, serão apresentadas as conclusões retiradas com esta dissertação, bem como as limitações encontradas ao longo da concretização da mesma.

### 5.1. Conclusões finais

Desde que o conceito de economia circular surgiu tornou-se uma ferramenta para o alcance da sustentabilidade e está agora fortemente presente nos processos da indústria e nos hábitos de consumo.

Os métodos que implementam a metodologia multicritério podem ser uma ferramenta importante para a implementação de práticas de economia circular na conquista da sustentabilidade uma vez que tem a capacidade de ter consideração um elevado número de aspetos. O método utilizado para implementação no caso de estudo foi o método AHP por ser um método frequentemente usado e ser suportado por *software*. As estratégias que foram equacionadas demonstraram que possuem impacto na economia circular da empresa e garantem uma melhor sustentabilidade, através da diminuição de gastos de recursos, de um impacto positivo nos trabalhadores, adoção de estratégias que tornam os processos mais eficientes, diminuição da poluição e uso de energias renováveis.

O *ranking* obtido no método AHP permitiu concluir que a melhor estratégia foi a “Substituição do diluente de limpeza com base solvente por diluente de base aquosa” que obteve 49,99 pontos. Seguindo-se a “Adoção de um sistema de pintura robotizado” com 26,15 pontos e, por último, a “Instalação de sistema de coletores solares para auxiliar aquecimento da cabine de pintura” com 23,65 pontos. A estratégia 1 teve a melhor pontuação de forma significativa e para o resultado ser outro a importância atribuída aos critérios teria de ser alterada também de forma significativa. Isto permite concluir que os resultados finais são sólidos e consistentes como comprovam os valores obtidos nas razões de coerência. Todas as razões de coerência foram bem inferiores ao valor de 10%.

O processo de decisão é complexo e quando se trata do alcance da sustentabilidade, neste caso pelo meio de implementação de estratégias de economia circular, e com um grande número de critérios a ter em conta, este processo provou ser mais fácil com o auxílio da metodologia multicritério. Em suma, os resultados obtidos irão auxiliar a empresa na perceção do impacto das estratégias de económica circular equacionadas sendo que a metodologia multicritério foi aplicada com sucesso e permitiu avaliar as estratégias de modo a garantir maior sustentabilidade para a empresa.

### 5.2. Limitações e trabalhos futuros

Uma das limitações encontradas foi na avaliação do critério Viabilidade Económica, esta foi baseada em documentos de literatura, em estudos no mesmo contexto de indústria.

Para trabalhos futuros seria interessante considerar estratégias de economia circular

referentes a outros setores. Também seria interessante utilizar a metodologia multicritério para selecionar a melhor alternativa quando se decidir implementar a estratégia. Por exemplo, na estratégia “Substituição do diluente de limpeza com base solvente por diluente de base aquosa”, ser agora aplicada a metodologia de modo a suportar a escolha do melhor fornecedor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.egy.2022.07.079>
- Arruda, E. H., Melatto, R. A. P. B., Levy, W., & Conti, D. de M. (2021). Circular economy: A brief literature review (2015–2020). *Sustainable Operations and Computers*, 2, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.05.001>
- Auer, H., Patt, A., del Granado, P. C., Peiró, L. T., & Fambri, G. (2022). Modelling climate neutrality for the European Green Deal. In *Energy* (Vol. 239). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122249>
- Balogh, W. R., St-Pierre, L., & Di Pippo, S. (2017). Towards a results-based management approach for capacity-building in space science, technology and applications to support the implementation of the 2030 agenda for sustainable development. *Acta Astronautica*, 139, 385–389. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.07.029>
- 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>
- Bianchi, M., & Cordella, M. (2023). Does circular economy mitigate the extraction of natural resources? Empirical evidence based on analysis of 28 European economies over the past decade. *Ecological Economics*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107607>
- Bigerna, S., Bollino, C. A., & Micheli, S. (2016). Renewable energy scenarios for costs reductions in the European Union. *Renewable Energy*, 96, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.024>
- Blum, N. U., Haupt, M., & Bening, C. R. (2020). Why “Circular” doesn’t always mean “Sustainable.” In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 162). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105042>
- Bongers, A., & Casas, P. (2022). The circular economy and the optimal recycling rate: A macroeconomic approach. *Ecological Economics*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107504>
- Brändström, J., & Saidani, M. (2022). Comparison between circularity metrics and LCA: A case study on circular economy strategies. *Journal of Cleaner Production*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133537>
- Burak, S., Samanlıoğlu, F., & Ülker, D. (2022). Evaluation of irrigation methods in Söke Plain with HF-AHP-PROMETHEE II hybrid MCDM method. *Agricultural Water Management*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107810>
- Calisto Friant, M., Vermeulen, W. J. V., & Salomone, R. (2021). Analysing European Union circular economy policies: words versus actions. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.001>

- Chai, J., Liu, J. N. K., & Ngai, E. W. T. (2013). Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature. *Expert Systems with Applications*, 40(10), 3872–3885. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.040>
- Chiaroni, D., Fraccascia, L., Giannoccaro, I., & Urbinati, A. (2022). Enabling factors for the diffusion of circular economy and their impacts on sustainability. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200101>
- Cristina, M., & Ribeiro, A. (2015). *Mestrado em Engenharia Química Gestão de solventes nas atividades de revestimento e formulação de tintas*.
- D’Adamo, I., Gastaldi, M., & Morone, P. (2022). Economic sustainable development goals: Assessments and perspectives in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131730>
- Dantas, T. E. T., de-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., Rodriguez, C. M. T., & Soares, S. R. (2021). How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. In *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 26, pp. 213–227). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>
- De, F., & Taucita<sup>1</sup>, M. (n.d.). *PRESENÇA DE ROBÔS DE PINTURA NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA*.
- de Moraes, L., Garcia, R., Ensslin, L., da Conceição, M. J., & de Carvalho, S. M. (2010). The multicriteria analysis for construction of benchmarks to support the Clinical Engineering in the Healthcare Technology Management. *European Journal of Operational Research*, 200(2), 607–615. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.018>
- de Souza Junior, H. R. A., Dantas, T. E. T., Zanghelini, G. M., Cherubini, E., & Soares, S. R. (2020). Measuring the environmental performance of a circular system: Emergy and LCA approach on a recycle polystyrene system. *Science of the Total Environment*, 726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138111>
- Dhouib, D. (2014). An extension of MACBETH method for a fuzzy environment to analyze alternatives in reverse logistics for automobile tire wastes. *Omega (United Kingdom)*, 42(1), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.003>
- Diaz, A., Reyes, T., & Baumgartner, R. J. (2022). Implementing circular economy strategies during product development. *Resources, Conservation and Recycling*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106344>
- Dutra Rosado Pinto de Almeida Pintura Robotizada com Reconhecimento, R. (2007). *FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO*.
- Eisenreich, A., Füller, J., Stuchtey, M., & Gimenez-Jimenez, D. (2022). Toward a circular value chain: Impact of the circular economy on a company’s value chain processes. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 378). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134375>
- El Mokri, A., Kafa, N., Dafaoui, E., El Mhamedi, A., & Berrado, A. (2016). Evaluating outsourcing risks in the pharmaceutical supply chain: Case of a multi-criteria combined fuzzy AHP-PROMETHEE approach. *IFAC-PapersOnLine*, 49(28), 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.020>

- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 143, pp. 757–768). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Gomes, A. (n.d.). *Instituto Politécnico de Viseu Ana Lúcia Costa Gomes Viabilidade Económica de Painéis Fotovoltaicos na ESTGV-A Abordagem através de Opções Reais*.
- Haines, A., & Scheelbeek, P. (2020). European Green Deal: a major opportunity for health improvement. In *The Lancet* (Vol. 395, Issue 10233, pp. 1327–1329). Lancet Publishing Group. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30109-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30109-4)
- Heun, M. K., & Brockway, P. E. (2019). Meeting 2030 primary energy and economic growth goals: Mission impossible? *Applied Energy*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.255>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 127, pp. 221–232). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Knäble, D., de Quevedo Puente, E., Pérez-Cornejo, C., & Baumgärtler, T. (2022). The impact of the circular economy on sustainable development: A European panel data approach. *Sustainable Production and Consumption*, 34, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.09.016>
- Kozlov, V., & Norek, T. (2021). Towards objective multi-criteria drone evaluation based on VIKOR and COMET methods. *Procedia Computer Science*, 192, 4522–4531. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.230>
- Marisa, J., & Gomes, S. (n.d.). *Joana Marisa da Silva Gomes*.
- Nazlı Köseoğlu, M. (2022). From the ideal to the reality: How to operationalise an impactful Circular Economy transition? In *Geoforum* (Vol. 128, pp. 213–216). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.12.009>
- Neto, J. C. (2010). *A ENERGIA SOLAR COMO UMA VANTAGEM COMPETITIVA EM EMPRESAS INDUSTRIAIS DA AMAZÔNIA. GANHOS DE EFICIÊNCIA DA EMPRESA E PREFERÊNCIAS DO CONSUMIDOR*.
- Opferkuch, K., Caeiro, S., Salomone, R., & Ramos, T. B. (2022). Circular economy disclosure in corporate sustainability reports: The case of European companies in sustainability rankings. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 436–456. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.003>
- Paradowski, B., & Sařabun, W. (2021). Are the results of MCDA methods reliable? Selection of materials for thermal energy storage. *Procedia Computer Science*, 192, 1313–1322. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.135>
- Pearman, A. D. (2009a). *Multi-Criteria Analysis: A Manual*. [www.communities.gov.uk](http://www.communities.gov.uk) Pearman, A. D. (2009b). *Multi-Criteria Analysis: A Manual*. [www.communities.gov.uk](http://www.communities.gov.uk)

- Pedro Ferreira Maria Marques, F., Presidente, J., Luís Rebelo da Silva Neves Sousa Orientador, A., António Baptista Branco Vogais, F., & Paulo Janeiro Gomes Ferreira, J. (2013). *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil*.
- Pedro Santos Ferreira, J., Szolnoky Ramos Pinto Cunha Paulo Miguel Nogueira Peças Júri Presidente, F., José Parracho Lau Orientador, F., Szolnoky Ramos Pinto Cunha Vogais, F., & Cláudia Sofia Tavares Magalhães António Manuel Relógio Ribeiro, E. (2018). *Estudo do Impacto da Automatização do Sistema de Pintura e Despintura de Aeronaves Engenharia Aeroespacial*.
- Pradere, B., Mallet, R., de La Taille, A., Bladou, F., Prunet, D., Beurrier, S., Bardet, F., Game, X., Fournier, G., Lechevallier, E., Meria, P., Matillon, X., Polguer, T., Abid, N., De Graeve, B., Kassab, D., Mejean, A., Misrai, V., & Pinar, U. (2022). Climate-smart Actions in the Operating Theatre for Improving Sustainability Practices: A Systematic Review. In *European Urology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2022.01.027>
- Santos, M., & Máximo, S. (n.d.). *UNIVERSIDADE DO ALGARVE-INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA "Study of energy solutions for automotive spray booths."*
- Schögl, J. P., Stumpf, L., & Baumgartner, R. J. (2020). The narrative of sustainability and circular economy - A longitudinal review of two decades of research. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 163). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105073>
- Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G. A., Chen, W. Q., Dewulf, J., Eggert, R., van Ellen, L., Gauss, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hirohata, A., Hofmann-Antenbrink, M., Kosmol, J., Le Gleuher, M., Grohol, M., Ku, A., Lee, M. H., Liu, G., ... Wäger, P. A. (2020). A review of methods and data to determine raw material criticality. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 155). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617>
- Shekhovtsov, A., & Salabun, W. (2020). A comparative case study of the VIKOR and TOPSIS rankings similarity. *Procedia Computer Science*, 176, 3730–3740. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.09.014>
- Steffenello, R. C. (n.d.). *UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA CENTRO DE TECNOLOGIA CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*.
- 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>
- Tóthová, D., & Heglasová, M. (2022). Measuring the environmental sustainability of 2030 Agenda implementation in EU countries: How do different assessment methods affect results? *Journal of Environmental Management*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116152>
- Triantaphyllou, E., & Mann, S. H. (1995). Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: Some challenges Medical Decision Making. Emphasis on shared decision making (SDM) View project The rank reversal problem in multi-criteria decision

- making (MCDM) View project USING THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS FOR DECISION MAKING IN ENGINEERING APPLICATIONS: SOME CHALLENGES. *Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, 2(1), 35–44.  
<https://www.researchgate.net/publication/241416054>
- 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>
- van Vuuren, D. P., Zimm, C., Busch, S., Kriegler, E., Leininger, J., Messner, D., Nakicenovic, N., Rockstrom, J., Riahi, K., Sperling, F., Bosetti, V., Cornell, S., Gaffney, O., Lucas, P. L., Popp, A., Ruhe, C., von Schiller, A., Schmidt, J. O., & Soergel, B. (2022). Defining a sustainable development target space for 2030 and 2050. In *One Earth* (Vol. 5, Issue 2, pp. 142–156). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.003>
- Wang, X., Li, Y., Xu, Z., & Luo, Y. (2022). Nested information representation of multi-dimensional decision: An improved PROMETHEE method based on NPLTSs. *Information Sciences*, 607, 1224–1244. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.06.053>
- Ycesan, Enver., ACM Digital Library., & ACM Special Interest Group on Simulation and Modeling. (2010). *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. Winter Simulation Conference.
- Yelmikheiev, M., & Norek, T. (2021). Comparison of MCDA methods based on distance to reference objects - A simple study case. *Procedia Computer Science*, 192, 4972–4979. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.275>



