



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE - CENTRO TECNOLÓGICO CTC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Paulo Vitor dos Santos Gonçalves

**Modelo multicritério híbrido para escolha de resinas de polietileno tereftalato por meio
da avaliação de rotas químicas e com base nos aspectos da Economia Circular**

Florianópolis

2025

Paulo Vitor dos Santos Gonçalves

Modelo multicritério híbrido para escolha de resinas de polietileno tereftalato por meio da avaliação de rotas químicas e com base nos aspectos da Economia Circular

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dra. Lucila Maria de Souza Campos
Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Mayerle

Florianópolis-SC

2025

Gonçalves, Paulo Vitor dos Santos

Modelo multicritério híbrido para escolha de resinas de polietileno tereftalato por meio da avaliação de rotas químicas e com base nos aspectos da Economia Circular / Paulo Vitor dos Santos Gonçalves ; orientador, Lucila Maria de Souza Campos, coorientador, Sérgio Fernando Mayerle, 2025.

165 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Economia Circular. 3. Polímeros. 4. Multicritério. I. Campos, Lucila Maria de Souza. II. Mayerle, Sérgio Fernando. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. IV. Título.

Paulo Vitor dos Santos Gonçalves

**Modelo multicritério híbrido para escolha de resinas de polietileno tereftalato por meio da
avaliação de rotas químicas e com base nos aspectos da Economia Circular**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado, em 25 de abril de 2025, por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Danielle Costa Moraes, Dr.(a)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.(a) Larissa Nardini Carli, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Marina Bouzon, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado
para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof.(a) Lucila Maria de Souza Campos, Dr.(a)
Orientadora

Florianópolis, 2025.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à Deus por me conceder o dom da vida, conduzir meus passos e permitir ter sabedoria e discernimento para desenvolver a minha pesquisa. Ele é o alicerce, fonte de paz e luz, que sustenta meu caminho e permite trilhar da melhor forma esta jornada conhecida como vida.

Aos meus pais, Carlos e Carol, os quais sempre estiveram comigo, disponibilizando todo o suporte necessário para que eu pudesse crescer e me desenvolver como pessoa. Sempre com carinho, disciplina e zelo, me educaram e ensinaram os caminhos corretos, apoiando todos os meus passos e escolhas realizadas. São a base para o meu sucesso e merecedores de todos os louros por cada etapa vencida em minha vida. Amo vocês e deixo aqui registrada a minha eterna gratidão.

Ao meu filho, Lucca Pietro, fonte de energia e propulsor de me fazer buscar um futuro melhor e estável. Em que ele possa crescer, mantendo sua doçura e sorriso, de maneira segura e cercado por todo amor e carinho. Amo você, Pepeto.

À minha companheira de vida, Carla Albuquerque, que me incentiva e me mantém firme no meu propósito de vida. Sempre compreensiva com a dificuldade desse processo de escrita acadêmica, cuida e mantém a ordem em nossas vidas. Atenciosa e dedicada, me impulsiona a ser a minha melhor versão e me proporciona uma rotina leve perante todas as dificuldades enfrentadas diariamente. Eu amo você.

Às minhas irmãs e irmãos, Sonayra, Sonaly, Aline, Ingrid, Vinícius e Felipe que sempre acreditaram no meu potencial e me incentivam a vencer mais e mais. Obrigado por serem minha família. Ao meu tio Reginaldo, que sempre esperou por este dia, mas hoje descansa ao lado do Pai, mas tenho certeza de que está orgulhoso de onde estiver. Obrigado por tanto, tio.

À minha orientadora Profa. Dra. Lucila Campos por toda paciência, ternura e diálogo durante esse longo processo de elaboração deste trabalho. Sempre exigente, disciplinada e compreensiva, virtudes essas que me ajudaram e permitiram desenvolver a pesquisa da melhor forma possível. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Sérgio Mayerle. Com um olhar crítico e minucioso, trouxe contribuições relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

À banca de defesa, composta pelas professoras Dra. Marina Bouzon, Dra. Larissa Nardini Carli e Dra. Danielle Costa Moraes. Agradeço a gentileza e disponibilidade de aceitarem participar da banca e por todas as valiosas sugestões que enriqueceram esse trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por me proporcionar a oportunidade de adquirir conhecimento e exercer este curso. E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

Aos meus amigos do LGAA, por parceria e apoio durante esse período de convivência no laboratório. E aos meus amigos do IEL/SC por me motivarem a finalizar mais esta jornada. Aos meus amigos de longas datas, que mesmo distante, sempre me incentivaram e me apoiaram. Com vocês o esforço do labor e da pesquisa se tornou menos solitário e mais leve.

E a todos que sempre acreditaram, me incentivaram e contribuíram de alguma forma durante este processo. Obrigado!

RESUMO

A poluição gerada por polímeros descartados é um problema global, impactando negativamente o meio ambiente em diversas etapas, como fabricação, extração de matéria-prima, descarte e reciclabilidade. A Economia Circular (EC) surge como um modelo capaz de mitigar esses impactos e aprimorar o setor de polímeros. Este estudo tem como objetivo propor um modelo de decisão multicritério (MCDM) que auxilie na escolha da melhor resina PET por meio da mensuração das rotas químicas com base nos conceitos da EC. Por meio de uma metodologia de pesquisa que integrou o *Design Thinking* (DT) com uma abordagem híbrida multicritério, combinando o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e a *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) sob lógica *fuzzy*, a investigação buscou incorporar de maneira estruturada e integrada a avaliação de múltiplos critérios. O método *fuzzy* AHP foi empregado para determinar os pesos relativos dos critérios e classificá-los, enquanto o método *fuzzy* TOPSIS foi utilizado com o intuito de reduzir as lacunas entre os valores de desempenho reais das alternativas, possibilitando uma avaliação abrangente do PET. Dois grupos de especialistas foram consultados: um focado na produção de resinas PET e outro na circularidade dos polímeros. A abordagem permitiu uma análise detalhada de três tecnologias de produção de resina PET, considerando critérios econômicos, ambientais e técnicos, além de doze subcritérios relacionados à EC. Os resultados indicaram quais resinas melhor atendem aos critérios da EC, demonstrando que a rota química baseada em ácido tereftálico purificado (TPA) de material virgem foi a mais alinhada com os princípios da EC, seguida pela rota de produção com biomassa, e, por último, pela rota química baseada em dimetil tereftalato (DMT) de material virgem. A necessidade de potencializar a escalabilidade e a qualidade das rotas mais circulares foi destacada para atender à crescente demanda por PET e reduzir a dependência de rotas tradicionais. A abordagem híbrida revelou-se mais eficaz e robusta do que a avaliação por um único indicador, auxiliando os decisores na escolha de rotas de produção mais sustentáveis. A ferramenta desenvolvida demonstrou-se intuitiva e útil para a indústria que busca migrar do modelo linear para o circular, permitindo a seleção de materiais PET com melhor desempenho em termos de EC e circularidade. Além disso, pode ser combinada com métodos mais complexos, como a análise do ciclo de vida das resinas, sugerindo novos estudos para aprofundar a temática.

Palavras-chave: Economia circular, Multicritério, Polímeros, PET, FTOPSIS, FAHP.

ABSTRACT

The pollution generated by discarded polymers is a global issue, negatively impacting the environment at various stages, including manufacturing, raw material extraction, disposal, and recyclability. The Circular Economy (CE) emerges as a model capable of mitigating these impacts and improving the polymer sector. This study aims to propose a multi-criteria decision-making (MCDM) model to assist in selecting the best PET resin by measuring chemical production routes based on CE principles. Through a research methodology that integrated Design Thinking (DT) with a hybrid multi-criteria approach, combining the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) under fuzzy logic, the study sought to incorporate a structured and integrated evaluation of multiple criteria. The fuzzy AHP method was used to determine the relative weights of the criteria and rank them, while the fuzzy TOPSIS method was applied to reduce gaps between the actual performance values of the alternatives, enabling a comprehensive assessment of PET. Two groups of experts were consulted: one focused on PET resin production and the other on polymer circularity. The approach allowed for a detailed analysis of three PET resin production technologies, considering economic, environmental, and technical criteria, along with twelve CE-related sub-criteria. The results indicated which resins best align with CE principles, revealing that the chemical route based on virgin terephthalic acid (TPA) was the most consistent with CE objectives, followed by the biomass-based production route, and, lastly, the chemical route based on virgin dimethyl terephthalate (DMT). The need to enhance the scalability and quality of more circular routes was highlighted to meet the growing demand for PET while reducing reliance on traditional processes. The hybrid approach proved to be more effective and robust than evaluation using a single indicator, supporting decision-makers in selecting more sustainable production routes. The developed tool demonstrated ease of use and practical utility for industries seeking to transition from a linear to a circular model, allowing for the selection of PET materials with superior CE and circularity performance. Furthermore, it can be combined with more complex methods, such as life cycle analysis (LCA) of resins, suggesting further studies to deepen the discussion.

Keywords: Circular Economy, Multi-criteria, Polymers, PET, FTOPSIS, FAHP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Código dos diferentes polímeros e suas estruturas.	15
Figura 2 – Fluxograma processo de produção de resina de PET.....	19
Figura 3 – Métodos de Preparação do PET.	21
Figura 4 – Diagrama Borboleta do sistema de Economia Circular adaptado de EMF.....	32
Figura 5 – <i>Framework</i> da EC.	34
Figura 6 – Resumo sobre a EC.	36
Figura 7 – Mapa conceitual da relação da EC com os métodos MCDM conforme as duas rodadas de avaliação.	58
Figura 8 – Modelo <i>Fuzzy</i> AHP-TOPSIS para mensuração e avaliação dos polímeros conforme os aspectos da EC.	67
Figura 9 – Representação gráfica do Número Triangular Fuzzy.....	69
Figura 10 – Representação hierárquica de um problema de decisão AHP.....	71
Figura 11 – Matriz de comparação genérica	73
Figura 12 – Estrutura hierárquica do modelo para avaliação e seleção da rota circular para a elaboração de resina de PET.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos processos de origem sustentável para a produção dos monômeros utilizados na síntese de PET.	47
Tabela 2 – Propriedades físico-químicas e mecânicas da resina de PET com base no banco de dados da CES Seletor.	48
Tabela 3 – Consumo de energia e de água para as rotas químicas DMT e TPA.....	48
Tabela 4 – Critérios de inclusão e exclusão para a revisão sistemática	55
Tabela 5 – Processo completo de seleção e triagem de artigos na 1ª rodada de avaliação	55
Tabela 6 – Processo completo de seleção e triagem de artigos na 2ª rodada de avaliação	56
Tabela 7 – Valores do Índice Randômico de acordo com o tamanho n da matriz	74
Tabela 8 – Critérios de decisão para escolha de resinas mais circulares.....	81
Tabela 9 – Variáveis linguísticas para aplicação do método FAHP	81
Tabela 10 – Dados quantitativos para os Subcritérios do Eixo Econômico.....	87
Tabela 11 – Dados quantitativos para os Subcritérios do Eixo Ambiental	87
Tabela 12 – Dados quantitativos para os Subcritérios do Eixo Técnico	87
Tabela 13 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os critérios conforme o especialista técnico 1.	90
Tabela 14 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os critérios conforme o especialista técnico 2.	90
Tabela 15 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os critérios conforme o especialista técnico 3.	90
Tabela 16 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista técnico 1	90
Tabela 17 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista técnico 2	91
Tabela 18 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista técnico 3	91
Tabela 19 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista técnico 1	92
Tabela 20 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista técnico 2	92
Tabela 21 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista técnico 3	93
Tabela 22 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista técnico 1	93

Tabela 23 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista técnico 2	93
Tabela 24 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista técnico 3	94
Tabela 25 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> integrada para os critérios conforme os decisores especialistas técnicos	94
Tabela 26 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> integrada para os subcritérios do eixo econômico conforme os decisores especialistas técnicos	95
Tabela 27 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> integrada para os subcritérios do eixo ambiental conforme os decisores especialistas técnicos	95
Tabela 28 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> integrada para os subcritérios do eixo técnico conforme os decisores especialistas técnicos	95
Tabela 29 – Peso dos critérios estabelecido pelo método <i>Fuzzy</i> AHP para os especialistas técnicos	95
Tabela 30 – Peso dos subcritérios estabelecido pelo método <i>Fuzzy</i> AHP para os especialistas técnicos	96
Tabela 31 – Matriz de decisão <i>fuzzy</i> das resinas de PET com relação aos subcritérios de cada eixo	97
Tabela 32 – Peso total dos subcritérios oriundos do método <i>fuzzy</i> AHP	97
Tabela 33 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método FAHP.....	98
Tabela 34 – Matriz de distância positiva e negativa para os especialistas técnicos	99
Tabela 35 – Determinação de $Di +$ e $Di -$ e CC_i e a ordem das alternativas conforme os especialistas técnicos	99
Tabela 36 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os critérios conforme o especialista em circularidade 1	100
Tabela 37 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os critérios conforme o especialista em circularidade 2	100
Tabela 38 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os critérios conforme o especialista em circularidade 3	100
Tabela 39 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista em circularidade 1	101
Tabela 40 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista em circularidade 2.....	101

Tabela 41 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista em circularidade 3	102
Tabela 42 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista em circularidade 1	102
Tabela 43 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista em circularidade 2	103
Tabela 44 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista em circularidade 3	103
Tabela 45 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista em circularidade 1	104
Tabela 46 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista em circularidade 2	104
Tabela 47 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista em circularidade 3	104
Tabela 48 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> integrada para os critérios conforme os decisores especialistas em circularidade	105
Tabela 49 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> integrada para os subcritérios do eixo econômico conforme os decisores especialistas em circularidade	105
Tabela 50 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> integrada para os subcritérios do eixo ambiental conforme os decisores especialistas em circularidade	105
Tabela 51 – Matriz de comparação <i>fuzzy</i> integrada para os subcritérios do eixo técnico conforme os decisores especialistas em circularidade	106
Tabela 52 – Peso dos critérios estabelecido pelo método <i>Fuzzy</i> AHP para os especialistas em circularidade	106
Tabela 53 – Peso dos subcritérios estabelecido pelo método <i>Fuzzy</i> AHP para os especialistas em circularidade	106
Tabela 54 – Matriz de decisão <i>fuzzy</i> das resinas de PET com relação aos subcritérios de cada eixo com relação aos especialistas em circularidade	107
Tabela 55 – Peso total dos subcritérios oriundos do método <i>fuzzy</i> AHP	108
Tabela 56 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método FAHP	108
Tabela 57 – Matriz de distância positiva e negativa para os especialistas em circularidade ..	109
Tabela 58 – Determinação de $D_i +$ e $D_i -$ e CC_i e a ordem das alternativas conforme os especialistas em circularidade	110
Tabela 59 – Pesos normalizados para os critérios e subcritérios conforme os especialistas ..	111

Tabela 60. Verificação da viabilidade de aplicação do modelo multicritério proposto com a indústria de resina PET.....	112
Tabela 61. Resumo dos artigos elaborados e relação com os objetivos específicos	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição dos conceitos pretéritos à EC	28
Quadro 2 – Revisões de literatura sobre Economia Circular.....	30
Quadro 3 – Descrição dos Métodos MCDM.....	41
Quadro 4 – Detalhes da pesquisa e as etapas de elaboração	52
Quadro 5 – Escala de Saaty	72
Quadro 6 – Eixos e critérios para a mensuração das resinas PET	86

LISTA DE SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria de Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
ACV	<i>Avaliação de Cilo de Vida</i>
EC	Economia Circular
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Translating Reality</i>
EMF	Ellen MacArthur Foundation
F-AHP	<i>Fuzzy Analytical Hierarchy Process</i>
F-TOPSIS	<i>Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
MAUA	<i>Multi-Attribute Utility Analysis</i>
MCDM	<i>Multi Criteria Decision Method</i>
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Cloreto de Polivinila
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>
SIP	Sociedade da Indústria de Plástico
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
WPM	<i>Weighted Product Model</i>
WSM	<i>Weighted Sum Model</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo geral	7
1.2.2 Objetivos específicos	7
1.3 Justificativa	7
1.4 Delimitação da Pesquisa	10
1.5 Estrutura do Trabalho	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 Polímeros	13
2.2 Processo Produtivo do PET	17
2.2.1 A Resina PET no contexto da Engenharia de Produção	17
2.2.2 Processo de produção de resina PET	19
2.2.3 Etapa I: Pré-polimerização	20
2.2.4 Etapa II: Policondensação	23
2.2.5 Etapa (III): Polimerização em Estado Sólido	25
2.3 Economia Circular	26
2.4 Design Thinking	38
2.5 Métodos de Decisão Multicritérios	39
2.6 Métodos MCDM e Critérios para Seleção de Materiais	43
2.7 Resinas de PET e critérios alinhados com a Economia Circular	45
2.8 Considerações finais sobre a fundamentação teórica	49
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	51
3.1 Etapa I – Motivação	54
3.1.1 Etapas I.1 e I.2: Análise teórica, identificação do problema e definição dos objetivos	54
3.2 Etapa II - Conceitualização e Desenvolvimento	59
3.2.1 Etapa II.1: Seleção dos Critérios e Alternativas	60
3.2.2 Etapa II.2: Aplicabilidade do modelo híbrido <i>Fuzzy</i> AHP mensuração das rotas de produção	62
3.3 Etapa III – Validação dos Resultados	62
3.3.1 Etapa III.1: Aplicabilidade do modelo híbrido <i>Fuzzy</i> TOPSIS para mensuração das rotas de produção e avaliação dos resultados	63
3.3.2 Etapa III.2: Validação da escolha da resina PET por meio da abordagem híbrida com a indústria	63
4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO MULTICRITÉRIO HÍBRIDO	65
4.1 Conjunto e Lógica <i>Fuzzy</i>	68
4.2 Variáveis Linguísticas	70

4.3 <i>Fuzzy</i> AHP	70
4.4 <i>Fuzzy</i> TOPSIS	75
4.5 Definição dos critérios de decisão.....	80
4.5.1 Descrição dos Subcritérios	82
4.5.2 Coleta de dados referentes aos critérios	86
5. RESULTADOS DA APLICABILIDADE DO MODELO	89
5.1 Utilização do método FAHP com os técnicos especialistas em resina	89
5.2 Utilização do método FTOPSIS com os especialistas técnicos em resina	96
5.3 Utilização do método FAHP com os especialistas em circularidade	100
5.4 Utilização do método FTOPSIS para os especialistas em circularidade.....	107
5.5 Definição de pesos normalizados com base na abordagem híbrida com base nos especialistas	110
5.6 Validação com a indústria de produção de resina PET	112
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	117
6.1 Análise dos critérios e subcritérios utilizados na seleção de resinas PET	117
6.2 Identificação da rota química para síntese de resina PET	120
6.3 Implicações práticas e gerenciais	124
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
7.1 Limitações do estudo.....	130
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	131
REFERÊNCIAS	133
APÊNDICE I.....	153
APÊNDICE II	158
APÊNDICE III.....	160
ANEXO A – Artigo 1 publicado na revista Environmental Science and Pollution.....	165

1. INTRODUÇÃO

Este primeiro capítulo apresenta a contextualização da utilização de polímeros no mundo atual e as problemáticas associadas à geração de resíduos oriundos deste material. Além disso, serão destacadas a importância da circularidade e da avaliação dos impactos relacionados aos polímeros e a relevância dos métodos multicritérios para a seleção de polímeros, sob a ótica da Economia Circular, no processo de design do produto. Esta seção também detalha os objetivos, a justificativa e delimitação do tema, bem como a estrutura do trabalho.

1.1 Contextualização

O termo “plástico”, na linguagem comum, refere-se a polímeros sintéticos os quais são onipresentes na sociedade moderna (Thiounn; Smith, 2020). Os polímeros são macromoléculas compostas por unidades estruturais repetidas conhecidas como monômeros com propriedades únicas. Eles podem ser divididos em termorrígidos (que solidificam após o aquecimento e são comumente utilizados em automóveis e materiais de construção) e, termoplásticos (que derretem quando expostos ao calor e retornam à dureza quando resfriados e são utilizados na indústria médica, de embalagens, entre outras) (Kumar, 2018).

Devido à versatilidade, baixo custo e facilidade de fabricação, as aplicações dos plásticos são extensas e por isso a sua produção vem crescendo continuamente ao longo de meio século (Gu *et al.*, 2017). Apesar do surgimento do primeiro polímero sintético ter sido em 1907, denominado de baquelite, a expansão da produção global de plástico iniciou-se na década de 1950 (Geyer; Jambeck; Law, 2017). A partir desta década, a produção global cresceu 200 vezes e registrou, no ano de 2023, cerca de 400 milhões de toneladas (Ritchie; Roser, 2018; Plastics Europe, 2024). De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria de Plástico (ABIPLAST), em 2023 o Brasil produziu 7,04 milhões de toneladas deste material (ABIPLAST, 2023).

Essa produção foi acelerada pela indústria de embalagens, a qual representa uma participação em 26% do uso geral dos plásticos (Kumar, 2018). A intensificação está associada à aplicação de embalagens descartáveis pela indústria, a qual provocou uma mudança global na matriz de embalagens reutilizáveis para as de uso único, considerado de ciclo curto (Geyer; Jambeck; Law, 2017). No Brasil, por exemplo, 35% do uso dos plásticos é considerado para o uso de ciclo curto, liderado pelo setor de embalagens para alimentos e

bebidas (ABIPLAST, 2023). Como resultado, o uso exacerbado do plástico acarretou impactos ambientais adversos associados com sua produção e principalmente com seu descarte (Liang *et al.*, 2021). Estima-se que entre os anos de 1950 e 2015 já foram gerados 6,3 bilhões de toneladas de resíduos plástico no mundo, onde apenas 9% deste montante foi reciclado e mais de 80% continuam acumulado em aterros sanitários e no meio ambiente (Brooks; Wang; Jambeck, 2018). No Brasil, somente no ano de 2020, foram descartadas 13,35 milhões de toneladas de plástico (ABRELPE, 2020), valor que representa 17% dos resíduos sólidos urbanos descartados no país no mesmo ano.

Segundo Lau *et al.* (2020), a poluição gerada por polímeros descartados no ambiente pode ser vista como um problema global. Quando este resíduo atinge o meio ambiente, permanece por centena de anos devido a sua durabilidade (Barnes *et al.*, 2009) e como são materiais constantemente utilizados no setor de embalagens e apresentarem massa relativamente baixo são passíveis de serem transportados por longas distâncias seja por vias aéreas ou pelos corpos hídricos (Bucci; Tulio; Rochman, 2020).

Quando expostos ao sol e/ou ação das ondas de radiação solares, os resíduos plásticos são divididos em partículas muito menores, transformando-se em microplásticos (diâmetro do plástico menor que 5 mm) (Andrady, 2015). Ao longo do tempo, esses detritos plásticos se acumulam nos ambientes aquáticos e terrestres. A literatura indica a presença dos detritos em áreas de agricultura (RILLIG; INGRAFFIA; DE SOUZA, 2017), no solo (Hurley; Nizzeto, 2018), nas estradas (Kole *et al.*, 2017), lagos e riachos de água doce (Dris *et al.*, 2015), no oceano (Erni-Cassola *et al.*, 2019), em recife de corais (Lamb *et al.*, 2018), nos sedimentos marinhos (Woodall *et al.*, 2014) e até mesmo no gelo marinho ártico (Obbard *et al.*, 2014), uma das áreas mais inóspitas do planeta.

Esses impactos estão relacionados com as características químicas e físicas dos polímeros mais utilizados para a fabricação dos produtos. No setor industrial, os termoplásticos representam 80% do plástico utilizado para o consumo (Al-Salem *et al.*, 2009) e são classificados em diferentes polímeros com características específicas. De acordo com a Sociedade da Indústria do Plástico (SIP) e com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os principais termoplásticos são classificados por códigos de 1 a 6 que representam, respectivamente: polietileno tereftalato (PET, código 1), polietileno de alta densidade (HDPE ou PEAD, código 2), cloreto de polivinila (PVC, código 3), polietileno de baixa densidade (LDPE ou PEBD, código 4), polipropileno (PP, código 5), poliestireno (PS, código 6) e 7 para outros como o policarbonato (Rahimi; García, 2017; ABNT, 2008).

Nesse contexto, a variedade de polímeros relaciona-se com diferentes impactos, seja no processo de extração de matéria prima, de fabricação, de descarte ou de reciclabilidade. O PET, por exemplo, é amplamente utilizado para elaboração de garrafas plásticas e fibras têxteis. Por conta disso gera elevado consumo de água no processo de síntese e um amplo volume de resíduos com seu descarte (Malik *et al.*, 2017). O HDPE necessita de um consumo elevado de energia para ser produzido e libera compostos de trióxido de antimônio, reforçando para que seja utilizado apenas uma vez. A descartabilidade relacionada ao uso único potencializa a geração de resíduos com risco de contaminação (Nursyamsi; Indrawan; Theresa, 2018; Agarski *et al.*, 2019). LDPE, PP, PVC e PS são misturados no processo de fabricação com um conjunto de aditivos tais como antioxidantes, colorantes e estabilizadores que podem trazer impactos ao fim do seu ciclo de vida (Sogancioglu; Yel; Ahmetli, 2017). Ademais, todos estes produtos são derivados do petróleo, um recurso natural finito com potencial para degradar o meio ambiente durante a sua extração.

Nota-se que as especificidades e a complexa composição dos polímeros refletem na taxa de reciclagem deles. De acordo com Rahimi e García (2017), os tipos de plásticos com maior taxa de reciclagem são o PET (19,5%), HDPE (10%) e LDPE (5%). Enquanto os outros (PP, PS e PVC) representam menos de 1% de tudo que foi reciclado. Pode-se afirmar que a complexa composição, o modelo atual de produção e consumo e a quantidade exacerbada de resíduos dificultam a reciclagem destes produtos, diminuindo a reciclabilidade inerente aos polímeros e tornando a cadeia do plástico responsável por gerar impactos ambientais, sociais e econômicos. Os impactos sociais estão relacionados com a diminuição de emprego e receita oriundos dos mercados secundários proporcionados pela reciclagem.

Dessa forma, Payne, McKeown e Jones (2019) e Rabnawaz *et al.* (2017) ressaltam que a produção de polímeros pautadas nas reservas de combustível fóssil é insustentável. Para Lieder e Rashid (2016), o fato de ser insustentável reflete nos impactos ambientais causados e aumenta a pressão sobre a indústria, ressaltando ser crucial para o desempenho deste setor, a existência de uma relação harmônica entre o elo ambiental e o industrial. Assim, a Economia Circular pode ser vista como um modelo importante para reduzir estes aspectos negativos e aprimorar o setor de polímeros (Huysman *et al.*, 2017), já que esse modelo e suas práticas no setor de polímeros não apenas reduzem a dependência de recursos virgens, mas também incentivam o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias que prolongam o ciclo de vida dos produtos, reduzem o consumo dos recursos e melhoram o desempenho ambiental das cadeias de valor (Geyer et al., 2017).

Esse modelo econômico visa criar sistemas regenerativos e circulares, gerar menos impacto com o emprego de estratégias que agreguem valor e façam os componentes e materiais serem utilizados no seu mais alto grau de eficiência, reduzindo desperdícios de energia e recursos (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Bocken *et al.*, 2017). A manutenção do valor dos componentes e materiais perpassa pela extensão do ciclo de vida dos produtos através de estratégias que visam o uso eficiente e o reaproveitamento, o reuso, a remanufatura e a reciclagem (Bocken *et al.*, 2017). Ademais, Bocken *et al.* (2016) ressaltam a importância de se integrar as questões da circularidade no estágio de elaboração do produto, uma vez que os recursos utilizados, a infraestrutura e as estratégias se relacionam com as demais etapas que envolvem a implementação da EC em toda a cadeia de valor.

No setor de polímeros, o design dos produtos precisa otimizar desde o processo de produção para a escolha do polímero, seus aditivos, sua cor, sua forma e outros diversos critérios para atender aspectos importantes para os consumidores (EASAC, 2020). Esses critérios influenciam na circularidade dos polímeros, refletem na sua reciclabilidade e na mudança do pensamento linear atual para um sistema menos impactante, regenerativo e que considere critérios de fim de vida no processo de elaboração. Nesse sentido, novas ferramentas que auxiliem na decisão por escolhas de resinas mais eficientes e pautadas em critérios preponderantes para a economia circular, a circularidade dos produtos e redução dos impactos devem ser incorporadas no processo de fabricação de polímeros.

Dito isto, surgem as perguntas de pesquisa que norteiam esse trabalho: Quais aspectos da EC devem ser considerados durante o processo de síntese de produtos plásticos para reduzir os impactos associados ao processo de produção do PET? Como comparar as diferentes rotas de produção da resina com base na seleção de indicadores e critérios pautados no conceito da EC para gerar resinas de PET mais circulares? Como comparar o nível de circularidade entre as variedades de resinas e seus processos distintos de polimerização por meio de suas rotas químicas?

Neste contexto, a presente pesquisa almejou propor uma metodologia integrada que ofereça uma visão holística dos aspectos da economia circular (EC) relacionados à resina PET durante sua fase de elaboração, com foco em apoiar a seleção de tecnologias de produção mais circulares e com menores impactos ambientais. A pesquisa integrou e adaptou o Design Thinking (DT) com uma abordagem multicritério híbrida, buscando formular uma metodologia abrangente que concilia a flexibilidade investigativa e de solução de problemas típica do DT com a estrutura analítica e rigorosa dos processos de tomada de decisão multicritérios. Tal integração visou identificar e hierarquizar os critérios relevantes para a

produção de resinas, alinhados aos princípios da EC e validados por especialistas da área. Ao moldar uma abordagem multicritério para um cenário disruptivo, a pesquisa propôs uma inovação metodológica que amplifica a capacidade de decisão estratégica, orientada pela sustentabilidade e pela circularidade no desenvolvimento de materiais. E, desta forma, auxiliar o setor de polímeros a lidar com a maior complexidade de tomada de decisão no cenário atual, que é caracterizado por uma crescente demanda por soluções alinhadas às exigências de responsabilidade ambiental e eficiência de recursos. A aplicação da abordagem multicritério permite integrar diferentes dimensões, como os aspectos ambientais, técnicos e econômicos, possibilitando uma avaliação mais holística das alternativas disponíveis.

A metodologia multicritério é particularmente relevante no contexto do PET, dada a pressão regulatória e de mercado para aumentar as taxas de reciclagem e reduzir a dependência de matérias-primas virgens (Geyer et al., 2017). Ao fornecer uma ferramenta de suporte à decisão baseada em dados robustos e na expertise de especialistas, a pesquisa auxilia na otimização do processo de elaboração de resinas e na transição mais acelerada para práticas circulares, contribuindo para a mitigação dos impactos negativos associados à produção e ao descarte de polímeros convencionais.

Ressalta-se ainda que a avaliação da circularidade do plástico pode contribuir para aumentar o valor dos recursos dos materiais plásticos, minimizar os impactos climáticos, reduzir a poluição e a deposição de resíduo e assegurar a eficiência global dos recursos (Geyer; Jambeck; Law, 2017). Contudo, essa circularidade deve ser acompanhada pela colaboração de diferentes atores, tanto internos quanto externos, da cadeia de valor do setor de síntese de polímero (Karayılan *et al.*, 2021).

De acordo com Karayılan *et al.* (2021), para a consolidação da circularidade do setor de polímeros é necessário que o quadro político avance sistematicamente, uma vez que pouco se sabe sobre medidas que fomentem a implementação da circularidade dos plásticos e que mais estudos sobre a aplicação prática e mensuração das estratégias e aspectos da EC sejam desenvolvidas, principalmente no que tange a respeito da simbiose industrial e do design do produto plástico mais circular. Lisiecki *et al.* (2023) concordam com a visão anterior e destacam ainda as métricas de circularidade e métodos de avaliação quantitativos que existem, como as avaliações de ciclo de vida (ACV) (ISO, 2006a; 2006b), requerem majoritariamente grande quantidade de dados, enquanto outras abordagens mais simples, como indicadores de taxa de reciclagem podem não representar toda a complexidade dos desafios e barreiras associados às iniciativas destinadas a aumentar a circularidade dos plásticos.

Nessa perspectiva, o modelo multicritério, desenvolvido nesta pesquisa, corrobora para que os especialistas na circularidade de polímeros consigam utilizar um conjunto de critérios para avaliar, sob a ótica da EC, como os elementos de design do produto e síntese da resina de PET se alinham com os principais fatores preponderantes para os novos modelos de negócios circulares. Dessa forma, obtêm-se uma ferramenta que dialoga tanto com o olhar do especialista no processo produtivo de síntese da resina PET quanto com o ponto de vista dos especialistas em EC, que entendem sob a circularidade dos polímeros. Com isto, a pesquisa busca atuar diretamente na formulação de uma ferramenta que potencialize a tomada de decisão no contexto industrial, que por conta de suas peculiaridades e dinâmicas do processo produtivo, exige métodos de análise que conciliem desempenho técnico, viabilidade econômica e impacto ambiental.

Ainda que haja um avanço considerável na literatura sobre métricas e diretrizes gerais para a implementação da economia circular, observa-se uma lacuna significativa no desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão que integrem de forma sistemática os princípios da EC às especificidades técnicas da indústria de síntese de resinas PET. A ausência de modelos decisórios adaptados à realidade dos processos químicos e às particularidades dos materiais poliméricos dificulta a operacionalização da circularidade em escala industrial. Nesse contexto, a presente pesquisa contribui ao propor um modelo estruturado, orientado por múltiplos critérios, que responde à demanda por instrumentos analíticos robustos e aplicáveis à seleção de rotas produtivas mais circulares. Essa abordagem, ao considerar simultaneamente fatores da EC, supre uma carência metodológica identificada na interseção entre a engenharia de produção e os estudos relacionados ao modelo econômico circular, promovendo uma base mais sólida para decisões pautadas na EC no setor de polímeros.

Assim, o modelo é relevante para a avaliação abrangente dos elementos relacionados à circularidade do PET. Essa abordagem busca ultrapassar a simplicidade de um único indicador, permitindo a incorporação de uma variedade de fatores no processo de avaliação, proporcionando uma perspectiva mais robusta e completa. Dessa forma, espera-se que seja possível auxiliar os especialistas em circularidade de polímeros a mensurar os aspectos da EC em processos produtivos e, corroborar, para que a cadeia de produção de PET seja desenvolvida com base na EC, uma vez que é possível a avaliação do processo produtivo, propor melhorias e construir um cenário cada vez mais favorável para a circularidade plástica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Propor um modelo multicritério híbrido pautado na lógica *fuzzy* que auxilie na escolha da melhor resina PET por meio da mensuração das rotas químicas com base nos conceitos da EC.

1.2.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos foram definidos para auxiliar no alcance do objetivo geral:

- a) Definir as características e os critérios do modelo MCDM, considerando os dados qualitativos e quantitativos das rotas de produção da resina PET;
- b) Desenvolver o modelo MCDM e testar a sua aplicabilidade com base em dados reais com relação às resinas PET e a sua forma de produção;
- c) Identificar como os aspectos da economia circular corroboram para a seleção do método de síntese do PET e na tomada de decisão;
- d) Mensurar o desempenho das rotas químicas de produção de resinas PET por meio de uma abordagem multicritério híbrida baseada na lógica *fuzzy*, considerando os princípios da economia circular.

1.3 Justificativa

Conforme definido no objetivo desta tese, a abordagem proposta proporciona uma visão integral dos critérios de circularidade referentes às principais rotas de polimerização utilizadas para elaboração do PET e elucida quais destes podem ser considerados circulares sob o ponto de vista de design do polímero quando avaliado por um especialista em circularidade de polímeros. Consequentemente, o método auxilia os decisores que consomem os materiais feitos a partir da resina PET a escolher processos de produção mais circulares. Assim, o modelo desenvolvido deve colaborar para que os especialistas em circularidade de polímeros e os técnicos de produção, como no caso do PET, possuam uma ferramenta de decisão capaz de indicar como as rotas químicas se comportam sob o olhar da Economia

Circular, auxiliando a discussão para a transição do modelo econômico atual para um modelo circular.

A relevância desta pesquisa está associada à importância dos polímeros para o setor industrial e econômico em uma escala global, uma vez que por conta de suas propriedades, esses materiais estão presentes em quase todos os tipos de produtos comerciais (Liang *et al.*, 2021; Klemes; Fan; Jiang, 2021). Todo esse destaque acarreta crescentes investimentos no setor de petroquímicos e na produção acelerada de plásticos virgens (para Grabiél *et al.* 2022, os plásticos virgens, também referenciados como primários, são produzidos a partir da extração primária de petroquímicos) (Borrelle *et al.*, 2020). Entretanto, apesar da sua importância comprovada para o mundo atual, os polímeros representam uma preocupante fonte de poluição ambiental, seja no processo de produção, na fase de uso ou em seu descarte como resíduo (Sheldon; Norton, 2020).

Os impactos atrelados ao uso de materiais feitos à base de resinas plásticas se refletem nas políticas e planos de ações de vários países (Borrelle *et al.*, 2020). Essas legislações visam criar instrumentos para gerenciar melhor e reduzir impactos associados com os resíduos plásticos. Os instrumentos legais são pautados na criação de taxas incidentes sobre a utilização ou descarte, incentivo na redução ao consumo de embalagens plásticas e proibições do uso destas em ambientes comerciais como supermercados, incentivo a reciclagem e uso de polímeros biodegradáveis (Lam *et al.*, 2018).

Contudo, nota-se que as medidas focam nas questões relacionadas ao uso e pós-uso desses produtos, demonstrando a ausência de estratégias que visem auxiliar a elaboração de produtos plásticos mais circulares, com o intuito de reduzir impactos ao longo do seu ciclo de vida e, consequentemente, corroborar para a mitigação dos impactos relacionados ao uso e descarte. Nesse contexto, justifica-se o objetivo e principal contribuição desta pesquisa no que tange à proposição de um modelo que mensure as rotas químicas para a elaboração da resina PET com base nos conceitos da EC; uma vez que adotar a EC desde a concepção da resina pode refletir positivamente nos produtos de PET, ao passo que auxilia que sejam priorizados os critérios relevantes para a aplicação desse modelo econômico.

Esse modelo deve ser pautado em diferentes critérios que corroborem para a circularidade desses produtos e do setor. Ressalta-se que a circularidade é inerente ao conceito da EC, que estabelece um sistema econômico direcionado para a redução do consumo de recursos, diminuição de desperdícios e resíduos gerados (Geissdoerfer *et al.*, 2017). A EC tornou-se um importante campo de pesquisa acadêmica com um grande aumento no número de artigos e periódicos que abordam esse tema nos últimos anos. As empresas também estão

cada vez mais conscientes das oportunidades prometidas por esse modelo e começaram a perceber seu potencial de valor (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Geissdoerfer *et al.* 2017).

No entanto, vários estudos (Haas *et al.* 2015; Elia *et al.* 2017; Alamerew; Brissaud, 2019; Alamerew *et al.* 2020) apontaram que enquanto o conceito de EC está sendo amplamente explorado em diferentes contextos, a definição de ferramentas, critérios e métodos de análise que possam avaliar diferentes aspectos dos sistemas circulares e o nível de circularidade ainda estão em falta na literatura. Para Linder, Sarasini e van Loon (2017) e Wu e Wu (2012), os aspectos referentes a questões que envolvem sistemas circulares e o nível de circularidade necessitam de ferramentas que lidem com problemas complexos e multidimensionais que requerem a integração de vários critérios e indicadores. Assim, a incorporação de métodos quantitativos nas diversas etapas do processo de produção surge como uma prática fundamental para a tomada de decisões sustentáveis, sobretudo diante dos desafios de padronização que permeiam a escolha de materiais, o design e os cenários de fim de vida, conforme apontado por Güngör *et al.* (2025).

Nesse contexto, a utilização de Métodos de Decisão Multicritério ou MCDM (do acrônimo em inglês *multicriteria decision making methods*) para a avaliação de questões que envolvem a circularidade e a sustentabilidade estão cada vez mais em evidência (Garcia-Bernabeu *et al.*, 2020; Özkan; Dengiz; Turan, 2019). Esses MCDM foram desenvolvidos para construir modelos que ajudem os decisores a identificar e selecionar as melhores alternativas quando deparados com um problema de decisão complexo com múltiplos objetivos e critérios (Bachér *et al.*, 2018). Ademais, alguns estudos já utilizaram os MCDM para a seleção de materiais com base em um conjunto de critérios conflitantes relevantes para o processo de manufatura, aumentando a eficiência do desempenho e produtividade (Nikouei; Mosaffa; Amiri, 2021; Yadav, 2021; Kumar; Jagadish; Ray, 2014).

Apesar disso, dentro desta perspectiva, a literatura relacionada à seleção de polímeros utilizando MCDM com base em critérios relevantes para EC e que abordem sobre a circularidade dos produtos vem se mostrando ainda escassa. Mestre e Cooper (2017) já alertavam sobre essa carência, ressaltando que apesar do conceito da EC estar em evidência, abordagens práticas envolvendo as etapas de elaboração do produto continuam ausentes e necessitando de mais investigações. Dessa forma, a discussão dos critérios relativos a EC na etapa de elaboração das resinas PET por meio de um MCDM pode ser vista como uma ferramenta prática, capaz de contribuir para a lacuna supracitada identificada por Mestre e Cooper (2017).

Assim, acredita-se que a aplicação de um MCDM ao contexto da síntese das resinas PET, capaz de identificar os critérios associados às diferentes rotas de produção em consonância com os princípios da EC, torna-se ainda mais pertinente quando considerada a relevância crescente da temática na agenda científica e industrial. E somado aos impactos associados com o uso e descarte dos produtos plásticos, reflete a importância da construção desta abordagem teórico-prática para auxiliar os decisores a identificar e selecionar processos de produção e produtos mais circulares e que reduzam os impactos, desde o estágio de síntese, e que corrobora para o desenvolvimento da literatura sobre o tema. Ademais, essa avaliação surge como uma alternativa que combina diferentes indicadores, dando robustez ao modelo, mas ainda assim com complexidade menor se comparado a outros processos como a ACV, elucidando a objetividade do modelo proposto e como ele pode auxiliar aos especialistas em EC para polímeros a avaliar sob o olhar da circularidade a polimerização do PET.

1.4 Delimitação da Pesquisa

Esta pesquisa visa propor uma abordagem que integra o DT com um modelo multicritério híbrido pautado na lógica *fuzzy* que mensure as rotas químicas para a síntese da resina PET com base nos aspectos da Economia Circular. Essa seleção deve se pautar no processo de produção do PET que envolve diferentes formas de polimerização e compostos químicos para a síntese das resinas. As formas de síntese das resinas PET abordam características de consumo de energia, matéria-prima e água relevantes e que são fundamentais para o conceito da EC e para os aspectos que tangem a engenharia de produção. A utilização de uma abordagem integrada do DT com o multicritério se adequa a este contexto devido ser um conjunto metodológico que sintetiza a complexidade de problemáticas como esta que abordam variáveis, delimitando adequadamente o contexto e justificando a escolha. O escopo se resume a resina PET devido ao fato desta ser uma resina commodities amplamente utilizado pelo setor industrial de embalagens, sendo considerado um dos principais termoplásticos. Os demais tipos de polímeros não farão parte do escopo desta pesquisa, uma vez que o foco será aplicado ao PET, conforme supracitado. Por fim, ressalta-se que o estudo não analisa o ciclo de vida do PET como um todo, se concentrando na etapa de síntese conforme o escopo e delimitação desta pesquisa.

1.5 Estrutura do Trabalho

Neste trabalho, a principal questão de pesquisa foi a construção de um modelo que mensure as rotas químicas para a síntese da resina PET com base nos conceitos da EC. Para responder a esta questão, a tese foi dividida em oito capítulos. O Capítulo 1 introduziu a contextualização geral do tópico sob investigação, os objetivos, explica a justificativa que motivou a realização da pesquisa, apresenta a delimitação e a estrutura do trabalho. Com esse capítulo objetivou-se contextualizar o leitor sobre a temática e sua importância.

O Capítulo 2 revisou a literatura sobre os principais temas envolvidos no estudo, buscando apontar lacunas existentes e dar suporte teórico para a realização do estudo como um todo. Os conceitos discutidos neste capítulo abordaram as características gerais sobre os polímeros com ênfase no processo de produção do PET e suas rotas químicas, os princípios e aspectos da EC, os métodos de decisão multicritério e a forma que abordam a seleção de materiais.

O Capítulo 3 descreveu as etapas metodológicas aplicadas no estudo, principalmente no que tange a integração do DT com a abordagem multicritério. Apresentou como a proposta foi construída e como o trabalho foi desenvolvido. O capítulo 3 descreveu também o procedimento passo a passo, os tipos de dados utilizados e como foram coletados e analisados, para compor o modelo de decisão multicritério.

O Capítulo 4 apresentou a proposta de desenvolvimento do método multicritério que auxiliou na escolha da resina PET por meio da avaliação das rotas químicas com base nos aspectos circulares. Esse modelo foi pautado em uma abordagem híbrida envolvendo a técnica AHP-TOPSIS sob a lógica *fuzzy*. Destaca-se que o método *Fuzzy* AHP (FAHP) foi utilizado para determinar os pesos de preferência de avaliação. Enquanto o método *Fuzzy* TOPSIS (FTOPSIS) foi implementado para ranquear as rotas químicas para produção da resina e elencar os principais critérios para avaliar a circularidade do PET, respeitando os critérios e pesos adotados e com base na rota química adotada.

O Capítulo 4 apresentou ainda as características dos critérios elencados para compor o modelo de abordagem multicritério aplicada neste estudo. Foram descritos com base na literatura o total de 12 subcritérios para os três eixos principais de avaliação: Ambiental, Técnico e Econômico. Esses eixos representaram os critérios de mensuração com base nos aspectos da EC das rotas químicas de produção das resinas PET. O cenário de decisão foi construído com o intuito de proporcionar visões complementares no processo de aplicação da abordagem MCDM, uma vez que os decisores que atuam diretamente no processo de

fabricação de polímeros e os que são especialistas na circularidade destes mesmos materiais proporcionaram olhares sob perspectivas diferentes e complexas no processo de seleção do tipo de rota química que alimenta a fabricação destes materiais. Com isto, um modelo MCDM foi construído. Modelo este que possa auxiliar no processo de decisão quantitativo e que viabilize a escolha e a produção de produtos plásticos em consonância com os aspectos circulares, fomentando, assim, a principal contribuição deste estudo para o setor.

Posteriormente, após os decisores terem sido consultados e o MCDM ter sido aplicado, estruturou-se o Capítulo 5 para discorrer os resultados da aplicação do modelo. Este capítulo objetivou demonstrar a aplicabilidade do modelo híbrido de decisão multicritério, composto pelas abordagens FAHP e FTOPSIS, no contexto da mensuração de rotas químicas para a produção de resinas PET e a escolha da resina mais adequada para estes critérios. O modelo é estruturado em duas partes, permitindo uma análise segmentada das contribuições dos seis especialistas previamente descritos, os quais colaboraram na aplicação do método multicritério. Apresenta-se ainda o Capítulo 6, com a discussão dos resultados, sobretudo com relação à literatura e modelos multicritérios pré-existentes, bem como as implicações gerenciais e práticas. E, por fim, o Capítulo 7 é apresentado, para finalizar o trabalho, com conclusões, limitações da pesquisa e recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a revisão de literatura conduzida neste estudo. As seções 2.1 e 2.2 destacam as características gerais dos polímeros. Na seção 2.3 estão presentes os princípios e aspectos da Economia Circular. A Seção 2.4 possui foco nos métodos MCDM e suas principais características. A Seção 2.5 analisa, sob o ponto de vista teórico, como os métodos MCDM são utilizados para a seleção dos materiais. A Seção 2.6 estabelece, com base na literatura, a relação entre os critérios das diferentes rotas químicas de produção de resinas PET e seu alinhamento com os princípios da Economia Circular.

2.1 Polímeros

Os polímeros são materiais considerados importantes para a economia moderna devido ao baixo custo de produção desses materiais e suas propriedades funcionais variadas (Kumar, 2018). Os materiais poliméricos englobam uma série de propriedades químicas e físicas totalmente dependente de suas longas cadeias químicas de ligação. Ademais, os polímeros podem ser de origem natural (denominados biopolímeros) ou sintéticos. Os biopolímeros são definidos como polímeros de base biológica, biodegradáveis ou ambos e apresentam propriedades semelhantes aos plásticos sintéticos convencionais (Payne; Mckeown; Jones, 2019). Enquanto os polímeros sintéticos são obtidos, normalmente, a partir de monômeros químicos, muitas vezes derivados de combustíveis fósseis, em cadeias de unidades repetidas. (Geyer; Jambeck; Law, 2017).

Os biopolímeros podem ocorrer naturalmente em moléculas como ácido desoxirribonucleico biodegradável ou amido, bem como celulose e quitina mais persistentes ao meio ambiente. Microrganismos capazes de degradar esses polímeros naturais evoluíram ao longo do tempo (Hale *et al.*, 2020). Em contrapartida, para Hale *et al.* (2020), os polímeros sintéticos, por conta de sua composição e por serem objetos mais “novos” a serem produzidos e descartados no meio ambiente, apresentam, em sua maioria, uma grande resistência à biodegradação.

A produção em escala comercial de polímeros sintéticos começou por volta de 1950 e devido ao seu crescimento excepcional, alcançou, no ano de 2022, uma produção global anual de aproximadamente 400,3 milhões de toneladas (Ritchie; Roser, 2018; PLASTICS EUROPE, 2024). Caso a taxa atual de crescimento seja mantida, espera-se que essa produção comercial de plásticos aumente nos próximos 20 anos e alcance valores superiores a 600 milhões de toneladas (Kumar, 2018). Este sucesso impressionante dos plásticos é

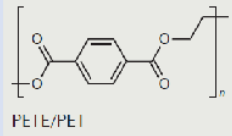
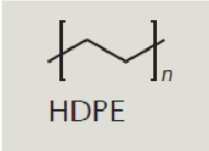
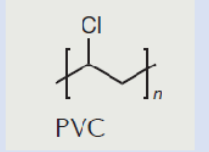
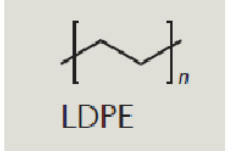
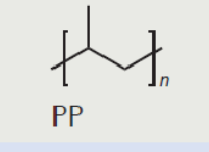
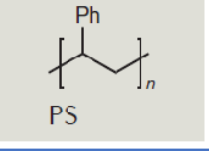
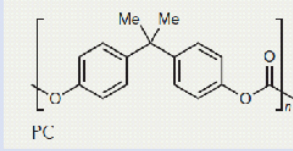
incomparável em relação a quaisquer materiais concorrentes usados em embalagens ou construção, as duas principais áreas de aplicação dos plásticos (Lebreton; Andrady, 2019).

Além disso, tal fenômeno ocorre devido aos atributos dos polímeros sintéticos, os quais suplantaram muitos materiais de origem natural na sociedade moderna (Lebreton; Andrady, 2019), tais como a borracha natural e o algodão que foram suplantados por fibras sintéticas de poli-isopreno e poliéster, por exemplo. As aplicações incluem recipientes de alimentos e bebidas de uso único, isolamento térmico, móveis domésticos e de trabalho, dispositivos elétricos e eletrônicos, interiores de veículos, brinquedos, tecidos, revestimentos de superfície e até mesmo dispositivos médicos por exemplo, articulações artificiais, incubadoras, bolsas de fluido intravenoso (IV), e dispositivos de administração de medicamentos (Hale *et al.*, 2020).

O design dos plásticos determina suas propriedades e adequação às aplicações desejadas. Os produtos acabados podem ser homogêneos em termos de polímero constituinte ou conter diferentes tipos de mistura ou reação cruzada para atingir as características desejadas (Hale *et al.*, 2020). O design desses produtos também pode ser modificado por aditivos orgânicos ou inorgânicos que usados para alterar propriedades como cor, flexibilidade, resistência a chamas e a radiação ultravioleta (Hale *et al.*, 2020). Essas modificações no processo de elaboração constituem em uma variedade de polímeros que se concentram na categoria dos termoplásticos e são classificados como PET, HDPE, PVC, LDPE, PP e PS, conforme destacado na Seção 1.1. A estrutura química, os principais usos e outras informações podem ser vistas na Figura 1.

Dentre esses polímeros, deve-se dar destaque para o PET, considerado um dos principais polímeros termoplásticos comumente mais utilizado pela indústria na elaboração de inúmeros produtos devido este tipo de termoplástico ser transparente, apresentar boas propriedades mecânicas e boa estabilidade dimensional sob carga variável (Sulyman; Haponiuk; Formela, 2016). No Brasil, apesar de representar apenas cerca de 6,2% da resina termoplásticas consumida, tem sua principal aplicação voltada para a indústria de embalagens, registrando 71% do seu uso neste setor (ABIPLAST, 2023; Romão; Spinacé; Paoli, 2009). Por conta disso, é uma das principais resinas presentes no mercado de produtos plásticos utilizada no setor industrial de embalagens, monopolizando mercados de garrafas para bebidas (Nistico, 2020).

Figura 1 – Código dos diferentes polímeros e suas estruturas.

Código SPI	Nome completo	Estrutura química	Principais usos	Densidade (g/cm³)
1	Polietileno tereftalato	 PETE/PEI	Garrafas descartáveis para bebidas, medicamentos e muitos outros produtos de consumo	1,38 a 1,40
2	Polietileno de alta densidade	 HDPE	Recipientes mais duráveis, como os de detergente, alvejante, xampu ou óleo de motor	0,93 a 0,97
3	Policloreto de vinila	 PVC	Tubulações, cabos, móveis de jardim, cercas e forro de carpete	1,10 a 1,45
4	Polietileno de baixa densidade	 LDPE	Sacos de plástico, películas de embrulho, tabuleiros e componentes informáticos	0,91 a 0,94
5	Polipropileno	 PP	Tampas de garrafas, recipientes de alimentos reutilizáveis e peças de automóveis	0,90 a 0,92
6	Poliestireno	 PS	Utensílios de plástico, embalagens de amendoim e isopor (EPS)	1,04 a 1,11; 0,016 a 0,64 (EPS)
7	Outros como por exemplo o policarbonato	 PC	Filmes de barreira multicamadas, escovas de dentes, alguns recipientes para alimentos, CDs e DVDs	Varia

Fonte: Adaptado de Rahimi e García (2017).

O PET pertence à família de poliéster que é uma ampla categoria de polímeros caracterizada por possuir funcionalidades de ésteres dentro das principais cadeias macromoleculares (Nistico, 2020). Esse tipo de poliéster pode ser sintetizado a partir de diferentes compostos químicos e com maneiras diferentes de elaboração (Krishnan; Kulkarni, 2008). A prática mais comum para a síntese desse polímero envolve o uso de etileno glicol (EG) e ácido tereftálico (AT) ou tereftalato de dimetila (DMT), que são monômeros obtidos a partir da derivação do óleo bruto. De acordo com Nistico (2020), Fakirov (2002) e Krishnan e Kulkarni (2008), as plantas de produção inicialmente eram mais pautadas nas rotas de utilização de DMT devido ao AT ser difícil de se conseguir em estado mais puro para

produção. Contudo, os métodos de purificação do ácido tereftálico evoluíram e a utilização da rota de AT é cada vez mais seguida para a produção do PET. Outras formas de processamento químicos para a obtenção desses monômeros como a reciclagem do PET, utilização de biomassa e a conversão do etanol podem ser vistos na literatura como novas rotas de obtenção e fabricação de PET (Nistico, 2020; Pang *et al.*, 2016; Jankauskaite; Macijaukas; Lygaitis, 2008).

Essas rotas de processamento pautadas nos monômeros DMT e AT demandam quantidades de energia, água e de matéria primas diferentes que variam de acordo com o tamanho das empresas destinadas a fabricação de PET em escala comercial (Alkaya; Demirer, 2015; Sarda *et al.*, 2022). Vale ressaltar ainda que os processamentos envolvem a purificação da matéria prima para a obtenção dos monômeros e a utilização destes no segmento de polimerização, gerando emissões de gases do efeito estufa, sobrecarga no estoque de recurso natural e produtos que dificultam a reciclabilidade quando há níveis de impureza no produto (Alkaya; Demirer, 2015; Sarda *et al.*, 2022; Simon, 2019).

Essas peculiaridades evidenciam a complexidade dos processos de polimerização e influenciam na circularidade desses produtos. Vilaplana e Karlsson (2008) destacam que o processo de design desses produtos deve considerar não só as questões que influenciam na performance dos produtos plásticos durante o período de uso, mas também precisa ponderar o processo de produção que são complexos desde a extração da matéria-prima para a síntese dos polímeros. Com isto, evidencia-se a necessidade de se avaliar os processos de elaboração do PET sob óticas que envolvam diminuição dos impactos e a recuperação dos recursos e que resulte em produtos mais circulares, uma vez que a otimização desta etapa impacta diretamente nos demais elos que compõem o ciclo completo da vida útil do PET.

Desta forma, conforme ressaltam Payne, McKeown e Jones (2019), a aplicação dos aspectos da Economia Circular na produção de polímeros, como no caso do PET, é capaz de contribuir para a redução da poluição no processo de design do produto, manter os produtos em circulação por mais tempo, retendo o valor do material em uso e preservar e regenerar os recursos naturais com a redução da geração de resíduos e otimização do uso de matéria-prima para a polimerização. A Seção 2.3 aprofundará mais sobre o conceito da EC, seus aspectos e a relação deste com o design dos polímeros.

2.2 Processo Produtivo do PET

Este subtópico aborda em detalhe sobre a produção da resina PET e os aspectos que norteiam esse tipo de produção, destacando sua relação com a EC e a importância de se avaliar a produção de polímeros a partir da síntese da sua resina.

2.2.1 A Resina PET no contexto da Engenharia de Produção

A engenharia de produção exerce um papel fundamental na otimização dos processos de fabricação de resinas de PET, envolvendo o planejamento e a gestão de recursos produtivos para maximizar a eficiência e a sustentabilidade (Landolfi et al., 2024). No cenário da produção de PET, os princípios da engenharia de produção são aplicados para analisar o ciclo de vida do produto, desde a seleção de matérias-primas até a fabricação, distribuição e disposição final. Esse enfoque abrangente permite não apenas a otimização dos recursos utilizados, mas também a minimização dos impactos ambientais, um tema central na atual transição para uma economia circular (Teke et al., 2024).

Atualmente, estima-se uma produção global de 24,8 milhões de toneladas de resina de PET oriundos de fonte primária base de materiais virgens (ABIPLAST, 2023), correspondendo a um terço da produção de poliéster no mundo, principalmente na utilização para embalagens e recipientes (Weissmann, 2024). No Brasil, a produção de resina PET é estimada em 485 mil toneladas advindos de matéria-prima virgem, impulsionado pela versatilidade desse tipo de resina, potencializando sua produção (ABIPLAST, 2023). Esse número reflete ainda o papel significativo do PET na produção industrial brasileira de embalagens, que é considerada a segunda maior produtora do setor, contribuindo com cerca de 35% da produção total de embalagens (Cavalcante et al., 2019).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2024), as principais indústrias de fabricação de resina PET estão instaladas em Minas Gerais e no complexo Industrial Portuário de Suape, em Pernambuco. Essas indústrias de resina PET se organizam em grandes petroquímicas produtoras com plantas de produção de ácido tereftálico (TPA) e de PET que estabelecem processos de produção contínuos, garantindo a produção em larga escala com qualidade e eficiência para atender a demanda do mercado interno (ABIPLAST, 2023). O processo de produção da resina é explicado detalhadamente nos próximos subtópicos.

Contudo, essas fábricas enfrentam dificuldades inerentes ao processo de produção da resina que impactam diretamente na sua competitividade. Dentre esses desafios, destacam-se os problemas econômicos, técnicos e ambientais tais como: custo da matéria-prima (Tullo,

2023), complexidade no controle das propriedades técnicas das resinas e o alto consumo energético e emissões significativas de CO₂ (Bunke et al., 2024). Ademais, as indústrias de produção de resina PET enfrentam dificuldades logísticas (Trevisanuto et al., 2019) que dificultam o processo de reciclagem, prejudicando a recuperação de materiais de pós-consumo e o fomento da cadeia reversa, aumentando o desperdício ambiental. A reciclagem da resina PET depende também de avanços tecnológicos e de escalabilidade para atingir patamares de produção que subsidiem integralmente a produção global e no mercado brasileiro (ABIPLAST, 2023).

Nesse contexto, nota-se a relevância do monitoramento dos parâmetros operacionais no processo de polimerização da produção da resina PET nas indústrias. Aspectos como o controle da temperatura, pressão, da matéria-prima e dos catalisadores utilizados afetam diretamente a qualidade da resina produzida, influenciando propriedades como viscosidade e cristalinidade (Di Lorenzo, 2024). Esses aspectos influenciam no rendimento do processo de produção da resina PET, incluindo a escolha da tecnologia de produção, no planejamento e na composição química da resina PET (Pecorale; Inzerillo; Salvadori, .2023).

Esses parâmetros e tecnologias de produção necessitam de ferramentas que mensurem seu desempenho e auxiliem na tomada de decisão, identificando oportunidades de melhorias em eficiência energética, consumo de água e reaproveitamento de resíduos, por exemplo. A integração dessas ferramentas possibilita uma produção mais sustentável, alinhada aos princípios da economia circular (Landolfi et al., 2024; Santos; Scavarda; Machado, 2024).

Nessa perspectiva, estudar a produção de resinas PET sob a ótica da engenharia de produção é relevante para compreender e implementar práticas relacionadas à EC que promovam a circularidade de materiais. A resina PET é amplamente utilizada em embalagens e produtos têxteis devido às suas propriedades mecânicas e de reciclabilidade, como já mencionado anteriormente. No entanto, os desafios relacionados ao consumo energético, utilização dos recursos, redução de custos e à emissão de gases de efeito estufa durante a produção deve ser mitigados (Wichaiutcha; Dutta; Chavalparit, 2023). O uso de metodologias multicritério para a seleção de rotas químicas alinhadas com a EC permite considerar uma ampla gama de critérios, como custo, impacto ambiental e viabilidade técnica, otimizando o processo de tomada de decisão.

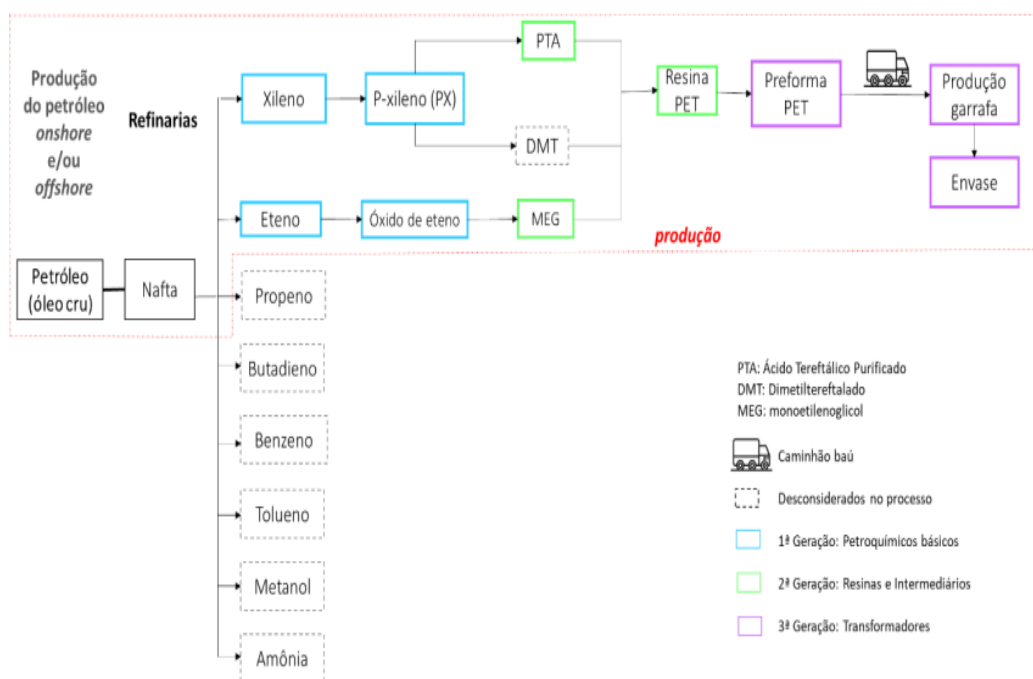
Em suma, a aplicação dos princípios da engenharia de produção na fabricação de resinas PET não apenas melhora a eficiência operacional, mas também reforça o compromisso com a sustentabilidade e a economia circular. Ao adotar abordagens integradas e ampla manipulação como a abordagem multicritério, a produção de resinas PET pode evoluir para

um modelo mais resiliente, sustentável e competitivo, atendendo às demandas de mercado e às pressões regulatórias para uma gestão mais responsável dos recursos naturais.

2.2.2 Processo de produção de resina PET

A produção de PET essencialmente aborda três estágios, dependendo de sua aplicação: (I) pré-polimerização, (II) policondensação e (III) polimerização no estado sólido (Romão; Spinacé; Paoli, 2009). Nessas etapas é importante controlar de forma apropriada as principais variáveis do processo, como o perfil dinâmico de temperaturas e o tipo e concentração do catalisador. O controle adequado dessas variáveis é fundamental para determinar a estrutura do polímero e, conseqüentemente, as propriedades e usos finais da resina (Soares Junior, 2010). Ademais, o item 2.7, que aborda sobre o alinhamento dos critérios da EC com a produção da resina de PET, abordará também algumas questões de processo que auxiliarão na compreensão da relevância de se melhorar a definição das resinas PET. Logo, essas variáveis podem influenciar no controle das características referentes à circularidade do produto. A Figura 2 ilustra de maneira resumida como ocorre o fluxo de produção da resina PET. Enquanto a Figura 3 explica em detalhe os três estágios de produção principais citados.

Figura 2 – Fluxograma processo de produção de resina de PET.



Fonte: Santos, 2022.

2.2.3 Etapa I: Pré-polimerização

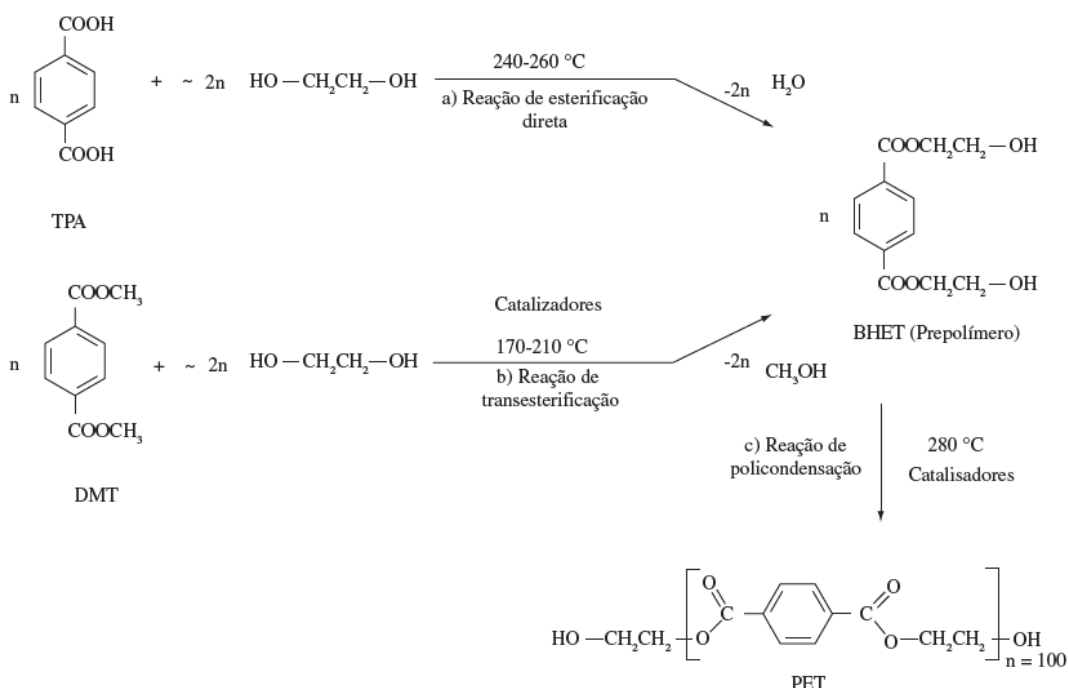
A Etapa (I), referente à pré-polimerização, consiste na fabricação do oligômero tereftalato de bis(2-hidroxietileno), BHET. Nela o poliéster pode ser fabricado por duas rotas distintas: a) esterificação direta; e b) transesterificação. A esterificação direta é obtida pela reação do TPA com etileno glicol (EG). Uma das principais diferenças na transesterificação é a substituição do monômero ácido tereftálico pelo éster tereftalato de dimetila (DMT).

A rota de transesterificação foi por muito tempo a rota preferida para a produção de BHET, devido à maior facilidade de se obter o DMT em um grau de pureza adequado ao processo, diferentemente da rota do TPA. Nesta etapa as reações são conduzidas na presença de um catalisador numa faixa de temperatura crescente que varia de 170 a 210 °C, com o metanol sendo removido continuamente. Ao final da reação são obtidos oligômeros com grau de polimerização entre 25 e 30 (Romão; Spinacé; Paoli, 2009).

Enquanto a rota de esterificação direta tornou-se mais atrativa recentemente devido a processos mais eficientes de purificação do TPA (Romão; Spinacé; Paoli, 2009). O TPA é produzido a partir da oxidação do para-xileno com ácido acético. Entretanto, o rendimento desta reação não é alto e são formadas impurezas como 4-carboxibenzaldeído (4-CBA). Como consequência, o grupo aldeído presente no 4-CBA age como um terminador de cadeia de polimerização de PET, o que dificulta a obtenção do grau de polimerização ($DP = 150$) desejável para fabricação de embalagens (Awaja; Pavel, 2005). Devido às similaridades entre as estruturas do TPA e do 4-CBA, o processo de separação é complexo. A partir da dissolução do TPA em água e posterior hidrogenação com um catalisador de Pd/C, esse problema foi totalmente contornado (Pernicone *et al.*, 1998).

Nessa rota de esterificação direta, a reação é heterogênea, autocatalítica (dispensando a adição de catalisadores) e realizada numa faixa de temperatura que vai de 240 a 260 °C. Ressalta-se que devido à dificuldade de solubilidade do TPA no EG, é preciso que essa rota atue em temperaturas mais elevadas do que na transesterificação e com excesso de EG, para que seja possível alcançar a solubilidade desejada do TPA (Romão; Spinacé; Paoli, 2009). Os esquemas das duas rotas distintas de pré-polimerização podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 – Métodos de Preparação do PET.



Ademais, destaca-se que o ácido tereftálico pode ser obtido a partir da oxidação do para-xileno, enquanto o etilenoglicol é usualmente sintetizado a partir do eteno, sendo ambos no Brasil produtos da indústria petroquímica (Garcia, 1997). O etilenoglicol, no entanto, pode ser também produzido com auxílio de catalisadores a partir do etanol e monóxido de carbono, oriundos de fontes renováveis. O etilenoglicol é um líquido incolor obtido do etileno, e o ácido tereftálico é um sólido cristalino obtido do xileno. Quando aquecidos juntos sob a influência de catalisadores químicos, o etileno glicol e o ácido tereftálico produzem PET na forma de uma massa fundida e viscosa que pode ser transformada diretamente em fibras ou solidificada para posterior processamento como plástico (Gregersen, 2023).

Em termos químicos, o etileno glicol é um diol, um álcool com uma estrutura molecular que contém dois grupos hidroxila (OH), e o ácido tereftálico é um ácido dicarboxílico aromático, um ácido com uma estrutura molecular que contém um anel aromático de seis membros (anel benzênico) e dois grupos carboxila (CO_2H). Sob a influência de calor e catalisadores, os grupos hidroxila e carboxila reagem para formar grupos éster ($\text{CO}-\text{O}$), que servem como ligações químicas que unem várias unidades de PET em polímeros de cadeia longa. A água e o metanol (no caso da rota por DMT) também são produzidos como um subproduto (Gregersen, 2023).

O método tradicional de produção PET reside no uso de EG e no ácido tereftálico (ou dimetil éster, denominado DMT) derivados do petróleo, através da refinaria tradicional

(Nistico, 2020). Portanto, para se definir critérios de avaliação do processo de produção de forma a construir uma abordagem mais circular para a elaboração de PET, é necessário conhecer um pouco mais sobre a obtenção desses dois monômeros preponderantes na produção das resinas PET.

O EG é produzido pelo etileno através da oxidação catalítica do etileno com o oxigênio na presença de prata suportada em alumina como catalisador, formando assim óxido de etileno (OE). Posteriormente, o procedimento mais simples consiste em realizar a reação de hidrólise do OE na presença de água em pH ácido, formando assim o EG. Outros procedimentos para a obtenção de EG podem ser citados na literatura (Han *et al.*, 2012; Nistico, 2020).

O ácido tereftálico (TPA) é amplamente produzido através do processo AMOCO (*American Oil Company*), que consiste na oxidação do para-xileno (isolado do processo de reforma catalítica do petróleo como BTX (fracção aromática) com oxigênio em meio de ácido acético na presença de um sistema catalítico corrosivo de Co-Mn-Br, enquanto o DMT é produzido através da esterificação do ácido tereftálico com metanol ou diretamente a partir do para-xileno, segundo um processo em várias etapas (processo Witten) que envolve uma oxidação preliminar de uma mistura de paraxileno e para-toluoato de metilo na presença de um catalisador de Co-Mn, e esterificação subsequente com metanol (Tomás; Bordado; Gomes, 2013).

Nistico (2020) destaca ainda que existem outras rotas químicas alternativas para a produção de EG e TPA (ou o DMT), como a exploração de biomassa. Essas diferentes formas aumentam a complexidade do processo de decisão para a escolha das rotas químicas de polimerização para a produção da resina de PET. Assim, evidencia-se a importância de se construir ferramentas que ponderem os critérios intrínsecos dessas rotas e do processo de polimerização da resina. Esses critérios, se avaliados sobre o olhar da Economia Circular, podem corroborar para melhorar o desempenho do processo de produção do PET com a presença de materiais que se adequem aos critérios circulares desde a sua concepção.

Segundo Krishinan e Kulkarni (2008), apesar de as rotas por DMT e por TPA ainda serem muito utilizadas, atualmente a TPA tem sido preterida com relação a outra para a produção da resina de PET. Segundo os autores, a rota TPA apresenta as seguintes vantagens com relação a utilização do caminho que combina o DMT com EG para a polimerização:

- TPA produz um rendimento maior de produção da resina (cerca de 15% maior com relação ao uso da rota DMT), devido a rápida taxa de esterificação e redução da massa da matéria prima com relação ao produto;

- O investimento para a construção de uma planta de polimerização com base na rota TPA é pelo menos 20% menor do que uma planta de produção pautada na rota DMT;
- O processo de polimerização pautado na rota TPA precisa de menos MEG se comparado com a rota DMT (1:15 contra 1:2). Portanto, menos EG é necessário durante o processo de policondensação (a ser explicado posteriormente), resultando em menos investimento para a recuperação de EG e sistema de reciclagem dos recursos. Isso diminui a energia utilizada e promove um sistema que reduz o uso dos recursos.
- O TPA é mais denso que o DMT e, conseqüentemente, requer menos espaço para ser armazenado quando comparado ao DMT;
- No processo TPA não há a liberação de metanol como um dos subprodutos da reação, enquanto no processo DMT ocorre a produção deste álcool. Contudo, o metanol é altamente inflamável e pode causar riscos para o sistema de produção de PET, exigindo que sejam instalados mecanismos de proteção contra explosões, onerando o processo de DMT;
- A rota TPA utiliza pequenas quantidades de catalisadores. Por conta disso, um polímero mais limpo é obtido como resultado do processo, gerando uma boa coloração para a resina e melhor clareza para as garrafas produzidas;
- Um maior peso molecular é alcançado com menos tempo no processo TPA.

Em contrapartida, o processo TPA apresenta algumas desvantagens. De acordo com Krishinan e Kulkarni (2008), a rota TPA é difícil de ser manuseada, visto que o TPA necessita de temperaturas mais elevadas para ser fundido e não é solúvel em solventes. Enquanto o DMT pode ser fundido à 140 °C e pode ser facilmente bombeado ou transferido na forma fundida. No caso do processo TPA, a reação ocorre em fase heterogênea devido à sua fraca solubilidade em MEG, levando a uma não uniformidade do produto de lote para lote. Por conseguinte, é necessária uma agitação eficiente durante a esterificação. Além disso, a rota via TPA apresenta maior propensão à formação de dietilenoglicol como subproduto da reação, dependendo das condições operacionais, do que a via DMT (Krishinan; Kulkarni, 2008).

2.2.4 Etapa II: Policondensação

Após as duas principais rotas de pré-polimerização descritas anteriormente (seja a esterificação direta do TPA com EG, ou a transesterificação do DMT com EG), que são

responsáveis pela formação do pré-polímero BHET, inicia-se a Etapa (II) denominada de Policondensação. A Policondensação é um processo em que o BHET continua a se condensar aumentando o seu peso molecular até a formação do polímero, sendo denominado de PET amorfo. Esse processo, quando utiliza a rota química de transesterificação, resulta em metanol como subproduto. Já quando advindo da rota de esterificação direta tem a água como subproduto.

Neste método, o BHET é gradualmente aquecido a 280 °C após a sua síntese na etapa de pré-polimerização, visto na Figura 2C. Durante o aquecimento a pressão interna do reator é reduzida para valores abaixo de $1,3 \times 10^2$ Pa e, consequentemente, o grau de polimerização é elevado para 100. O tempo reacional total (2 etapas preliminares) pode variar de 5 a 10 horas e o EG é obtido como subproduto (Romão; Spinacé; Paoli, 2009). Neste ponto, o polímero amorfo é retirado do polimerizador, resfriado, solidificado, granulado e então armazenado. Ressalta-se que nesta etapa, o polímero obtido não apresenta viscosidade intrínseca maior que $0,7 \text{ dl.g}^{-1}$.

Para alguns produtos, como as fibras têxteis, que não requerem elevados esforços mecânicos e propriedades reológicas intermediárias, essas duas etapas de síntese (pré-polimerização e policondensação) são suficientes (Romão; Spinacé; Paoli, 2009). Portanto, como o PET grau têxtil é obtido pelo processo que consiste em uma etapa a menos que na produção de PET grau garrafa, essa “grade” tem custo inferior (Romão; Spinacé; Paoli, 2009).

Na policondensação se obtém polímeros com massa molar em torno de $33.000 \text{ g.mol}^{-1}$, pois o aumento da viscosidade do material dificulta a difusão do EG e, consequentemente, reduz a taxa de reação. Nessas condições podem ocorrer reações de degradação que competem com a polimerização (Macdonald, 2002). Para se obter um polímero com elevada massa molar, é necessário realizar uma outra etapa, conhecida como polimerização em estado sólido. A polimerização no estado sólido é complementar a policondensação para a obtenção de PET para a aplicação de embalagens sopradas (garrafas), visto que esse tipo de aplicação requer um polímero com massa molecular elevado (acima de $30.000 \text{ g.mol}^{-1}$ e viscosidade intrínseca superior a $0,7 \text{ dl.g}^{-1}$).

Destaca-se que a viscosidade intrínseca é importante para o processo de polimerização e para o produto, principalmente para uma futura reciclagem do mesmo. Uma vez que o maior nível de viscosidade atrelado a produção de garrafas PET permite que a resina desse polímero seja aplicada para outras finalidades como a elaboração de fibras têxteis que exigem uma viscosidade intrínseca menor. Isso corrobora para a circularidade do produto, uma vez que

viabiliza a sua reutilização em mais alto grau mesmo com a diminuição de viscosidade da resina original (Noronha, 2004).

2.2.5 Etapa (III): Polimerização em Estado Sólido

Posteriormente as fases de pré-polimerização e policondensação, inicia-se a Etapa (III) polimerização ou policondensação no estado sólido (SSP). A reação da SSP é feita a uma temperatura entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão. Ela é utilizada para a produção de PET com alta massa molar ($>30.000 \text{ g.mol}^{-1}$). O PET produzido por SSP, é utilizado em artefatos processados por injeção-sopro, como as embalagens para bebidas carbonatadas. A SSP é realizada a 220-230 °C por um período entre 10 e 30 horas. O aspecto mais importante da SSP, é aumentar o grau de cristalinidade do material em um intervalo de tempo curto sob alto vácuo ou com um sistema de atmosfera inerte sob agitação, evitando assim o processo de sinterização, no qual as partículas começam a aderir umas às outras. Quando isso acontece, os flakes grudam nas paredes do reator podendo danificá-lo (Romão; Spinacé; Paoli, 2009).

Nesse contexto, o PET obtido após essas etapas é um polímero cristalino e tem suas características dependentes do grau de cristalinidade que atinge após a transformação empregada aos monômeros (Garcia, 1997). Quanto maior o grau de cristalinidade, maior a rigidez (menor resistência ao impacto), maior resistência térmica e menor transparência. Sendo estas características importantes para a resina e devem ser consideradas durante o processo de polimerização.

Após o processo de síntese da resina, a fabricação de garrafas PET considera ainda mais três etapas sequências: a secagem da resina, a injeção de uma pré-forma e o sopro da embalagem (Khan *et al.*, 2017). A secagem é fundamental para evitar a degradação da resina durante o ciclo térmico da injeção, que acarretaria na redução do peso molecular do polímero (comprometendo sua resistência mecânica, fator que pode influenciar no produto ao longo de toda sua cadeia, inclusive na sua posterior reciclagem) (Garcia, 1997). Posteriormente, para a injeção da pré-forma, a resina é aquecida a temperaturas da ordem de 270 °C, injetada nas cavidades do molde e resfriada muito rapidamente de forma a manter a estrutura molecular predominantemente na forma amorfa (baixo grau de cristalinidade).

Sequencialmente, ocorre o processo de sopro, uma tecnologia dedicada a obtenção de peças ocas de paredes finas, usualmente empregado na fabricação de garrafas e que popularizou o uso da resina de PET. Esta etapa de sopro da embalagem geralmente ocorre a uma temperatura de 90 a 100 °C. Destaca-se ainda que o processo de sopro é regido por novas

tecnologias e equipamento, como o IBM (*injection blow moulding*) e IBSM (*injection stretch blow moulding*), que de acordo com Khan *et al.* (2017), são expressivas nos processos de fabricação de embalagens. A vantagem de utilização dessas tecnologias é a redução de resíduos durante o processo de produção das embalagens, reduzindo custos para a destinação correta desses descartes e influenciando no custo final das embalagens.

2.3 Economia Circular

Com o aumento do uso global de materiais primários, as questões relacionadas com a segurança do fornecimento desses materiais e os impactos ambientais associados à crescente demanda receberam maior atenção durante as últimas décadas (Wang *et al.*, 2020; Keijer; Bakker; Slootweg, 2019). Para Keijer, Bakker e Slootweg (2019) é evidente que o modelo linear, no qual os recursos são consumidos, transformados em produtos com valor agregado e degradados em resíduos, é o causador de várias crises globais, como mudanças climáticas, diminuição da biodiversidade e escassez energética. Logo, embora esse modelo tenha gerado riquezas materiais para as nações industrializadas desde a sua concepção no século XX, as fraquezas demonstradas pelo sistema linear no novo milênio indicam para um colapso num futuro próximo (Sariatli, 2017). Nesse sentido, há um consenso sobre a necessidade de se estabelecer uma transição gradual para um crescimento econômico mais sustentável capaz de resolver os desafios mencionados anteriormente (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Assim, intensifica-se o interesse com relação ao conceito da EC, no qual surge como uma alternativa ao sistema “pegar-produzir-dispor” da economia linear (Stahel, 2016). Diversos autores como Ghisellini *et al.* (2016), Andersen (2007), Geissdoerfer *et al.* (2017) e Pascale *et al.* (2021) apontam para Pearce e Turner (1989) como os principais economistas a introduzirem primeiramente o conceito de economia circular e analisarem a interdependência entre o meio ambiente e o sistema econômico. Eles investigaram as características lineares e abertas dos sistemas econômicos contemporâneos e descreveram como os recursos naturais influenciam a economia, fornecendo insumos para o processo de produção e consumo, bem como servindo como uma válvula de escape para resíduos produzidos por este sistema (Pearce; Turner, 1989).

De acordo com Geissdoerfer *et al.* (2017), os economistas supracitados foram influenciados pelo trabalho de Boulding (1966), que descreveu o planeta como um sistema fechado e circular com capacidade assimilativa limitada, e inferiu a partir disto que a economia e o meio ambiente deveriam coexistir em equilíbrio. Assim, para Boulding (1966), a ideia de economia como um sistema fechado é vista como um pré-requisito para a

manutenção da sustentabilidade (Ghisellini *et al.*, 2016). Pearce e Turner (1989) explicam ainda que a mudança de um sistema econômico aberto para o econômico circular pode ser visto como uma consequência da lei da termodinâmica (Georgescu-Roegen, 1971) que dita a degradação da matéria e energia.

Outros autores como Stahel e Reday (1981) apresentaram certas características da EC, com ênfase na economia industrial. Eles a conceituaram como uma economia de ciclos para descrever estratégias industriais que visem a prevenção da geração de resíduos, criação de empregos regionais, uso eficiente dos recursos e desmaterialização da economia industrial. Estas contribuições resultaram na compreensão contemporânea da EC e suas aplicações práticas em sistemas econômicos e processos industriais evoluíram para incorporar diferentes recursos e contribuições a partir de uma variedade desses conceitos que compartilham a ideia de ciclos fechados (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Nesta perspectiva, a EC é derivada de um conjunto de conceitos importantes. Para diversos autores (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Weetman, 2021; Linder; Sarasini; van Loon, 2017) a EC tem como fonte os conceitos de cradle to cradle (McDonough; Braungart; 2010), capitalismo natural (Hawken *et al.*, 2013), economia de desempenho (Stahel, 2010), design regenerativo (Lyle, 1996), ecologia industrial (Graedel; Allenby, 1995), biomimética (Benyus, 2002) e economia azul (Pauli, 2010). O Quadro 1 descreve um pouco mais sobre cada um desses conceitos pretéritos à EC.

Quadro 1 – Descrição dos conceitos pretéritos à EC

Conceitos	Descrição	Autor
<i>Cradle to Cradle</i>	Objetiva a criação de um sistema produtivo circular, em que não há o conceito de rejeito. Neste conceito tudo é nutriente para um novo ciclo, assim, os resíduos são configurados como nutrientes que circulam em ciclos contínuos	McDanough e Braungart (2010)
Capitalismo Natural	Refere-se aos estoques de ativos naturais, incluindo solo, ar, água e todos os seres vivos. O objetivo é a conservação de recursos através de processos de fabricação mais efetivos, a reutilização de materiais encontrados em sistemas naturais, a mudança de valores de quantidade para a qualidade e a investir em capital natural.	Hawken <i>et al.</i> (2013)
Economia de Desempenho	A indústria tem por foco a adoção de processo de reutilização e extensão da vida dos serviços como uma estratégia de prevenção de resíduos, criação regional de empregos e uso eficiente dos recursos como forma de desmaterializar a economia industrial	Stahel (2010)
Design Regenerativo	Processos que restauram, renovam ou revitalizam suas próprias fontes de energia e materiais. Desenvolvimento de produtos com novas matérias-primas, gerando sistemas sustentáveis que integram as necessidades da sociedade com a natureza.	Lyle (1996)
Ecologia Industrial	Para este conceito o ecossistema industrial não pode ser visto de maneira isolada do seu sistema circundante. É uma visão de sistema em que se busca otimizar o ciclo total de materiais no processo industrial, desde a matéria virgem, até o material acabado, componente, produto, e disposição final.	Graedel e Allenby, (1995)
Biomimética	Aborda as melhores ideias da natureza com o intuito de imitar projetos e processos para fornecer soluções inovadoras e sustentáveis para o desenvolvimento da indústria e da pesquisa	Benyus (2002)
Economia Azul	Destaca os benefícios na conexão e combinação de problemas ambientais aparentemente disparees com soluções científicas de código aberto, com base em seu ambiente local e características físicas e ecológicas	Pauli (2010)

Essas ideias ganharam força na formulação de políticas dentro dos principais centros econômicos como União Europeia, China e Japão e foram popularizadas por organizações não governamentais como Green Alliance e a Ellen MacArthur Foundation (EMF) (Linder; Sarasini; van Loon, 2017). Conforme ressalta Su *et al.* (2013), a formulação de políticas novas corroborou para o amadurecimento da EC. Para os autores, o ponto de partida para a implementação desse novo conceito iniciou-se em 1996, na Alemanha, acompanhado da promulgação de uma lei denominada “Lei do Ciclo Fechado de Substâncias e Gestão de Resíduos”. A Lei previa uma gestão dos resíduos em ciclo fechado e assegurava o descarte ambientalmente seguro e adequado.

Outro exemplo de destaque foi visto no Japão, onde seu governo desenvolveu uma estrutura abrangente para viabilizar a reciclagem. O governo japonês sancionou a “Lei Básica para a Constituição de uma Sociedade de Reciclagem”, a qual forneceu metas quantitativas para reciclagem e desmaterialização da sociedade japonesa (Su *et al.*, 2013). De acordo com Mathews e Tan (2016), essas leis da Alemanha e Japão despertaram interesse na China na década de 1990. Com isto, novas medidas de taxação, fiscalização e políticas indústrias foram elaboradas para introduzir a EC como um novo modelo de desenvolvimento para avançar para um modelo econômico mais sustentável (Su *et al.*, 2013; Mathews; Tan, 2016).

Esses exemplos demonstram o interesse de iniciativas de esferas diferentes em buscar alternativas para mitigar a exploração dos recursos através da reinserção dos resíduos no processo. Urbinati, Chiaroni e Chiesa (2017) destacam esse processo de elaborar sistemas fechados que reutilizam os recursos que seriam descartados como resíduos nos modelos lineares como uma das metas da EC. Esse modelo econômico tem ganhado popularidade em diferentes escalas devido à sua proposta de criar processos mais sustentáveis e que otimizem o uso de recursos como os resíduos sólidos, a energia e a água (Petit-Boix; Leipold, 2018).

Essa tendência de buscar por inovações circulares tem sido vista também na literatura, na qual o conceito de EC recebeu mais atenção da academia a partir de 2013 e um número crescente de revisões sobre o tópico (Quadro 2) foram elaboradas (Geissdoerfer *et al.*, 2020). Outro fator que demonstra o crescimento do interesse sobre o tema pode ser visto nas buscas online no mundo pelo termo “*circular economy*”, em que, segundo a ferramenta de livre acesso Google Trends da plataforma de buscas do Google (Google Trends, 2022), também se nota um aumento vertiginoso a partir de 2013, evidenciando a importância do tema de uma maneira geral.

Quadro 2 – Revisões de literatura sobre Economia Circular

Autores	Foco abordado
Andersen (2007)	Introdução aos princípios e abordagens fundamentais na economia ambiental relevantes para a EC
Su <i>et al.</i> (2013)	Análise do conceito e das pesquisas de EC na China
Ghisellini <i>et al.</i> (2016)	Análise da literatura sobre EC e a exploração da sua origem, princípios básicos, vantagens, desvantagens, modelagem e implementação
Lieder; Rashid (2016)	Análise da literatura sobre EC e a exploração de diferentes ideias relevantes para a EC e a sua recorrência no contexto de empresas manufatureiras;
Sauve <i>et al.</i> (2016)	Comparação dos conceitos de EC, ciências ambientais e desenvolvimento sustentável;
Geissdoerfer <i>et al.</i> (2017)	Comparação entre os conceitos de EC e sustentabilidade;
Blomsma; Brennan (2017)	Análise do surgimento e evolução do conceito de EC;
Murray <i>et al.</i> (2017)	Análise do conceito de EC a partir de uma perspectiva interdisciplinar;
Kirchherr <i>et al.</i> (2017)	Conceituação de EC através da revisão de 114 definições;
Merli <i>et al.</i> (2018)	Análise do fenômeno da EC e caracterização da literatura;
Turkeli <i>et al.</i> (2018)	Análise da evolução da pesquisa sobre EC na União Europeia e na China;
Homrich <i>et al.</i> (2018)	Análise de tendências e lacunas da literatura de EC;
Govindan; Hasanagic (2018)	Análise dos impulsionadores; barreiras e práticas relacionadas com a EC sob o ponto de vista da cadeia de suprimentos;
Padilla-Rivera <i>et al.</i> (2020)	Análise das pesquisas sobre EC e como elas consideram os aspectos sociais;
Rosa <i>et al.</i> (2020)	Análise do conceito de EC e a relação com a Indústria 4.0;
Suchek <i>et al.</i> (2021)	Mapeia os aspectos da EC e relaciona os mesmos com o conceito de inovação;
Pascale <i>et al.</i> (2021)	Análise de 61 indicadores que mensuram a EC e seus aspectos;
Zhu <i>et al.</i> (2022)	Aborda sobre os conceitos de design do produto na EC.
Muller; Delai; Alcantara (2024)	Relaciona o conceito da Economia Circular e suas práticas com a retenção e criação de valor na cadeia de produção

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

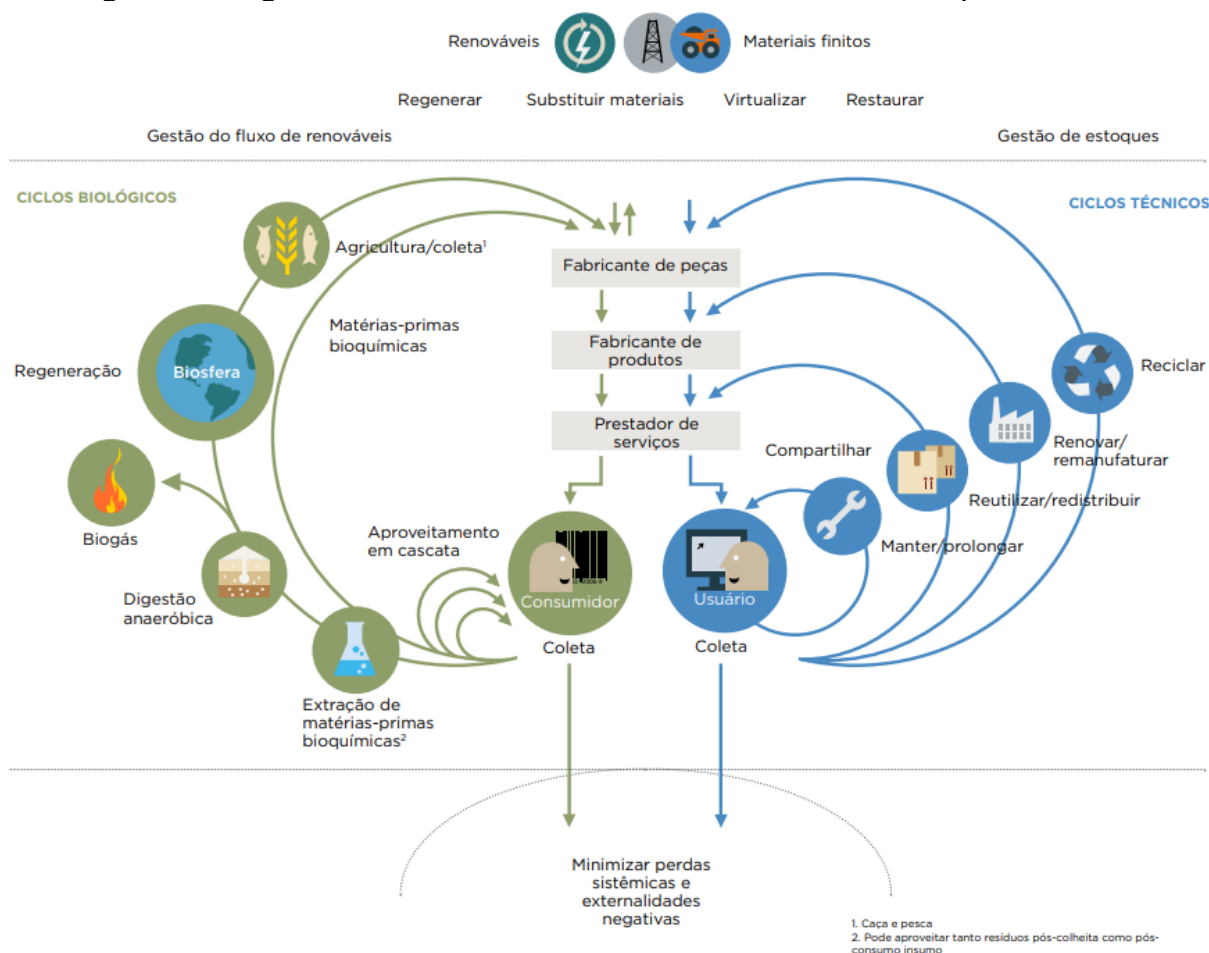
Essa gama de pesquisas sobre o tema resulta em uma série de definições, ao tempo que apontam diferentes pontos de vistas, reduzem as lacunas de pesquisa e aprimoram o conceito de EC. Nesse contexto, o conceito de EC foi frequentemente considerado como somente uma abordagem mais apropriada para a gestão de resíduos, resultando em um ponto de vista limitado (Ghisellini *et al.*, 2016). Para Lieder e Rashid (2016), ao estudar o estado da arte sobre o tema, essa perspectiva se alterou para uma definição mais atrelada à escassez dos

recursos, aos impactos ambientais causados pelo sistema atual e aos benefícios econômicos desse novo modelo circular.

Kirchherr *et al.* (2017) analisaram 114 definições de EC e delimitaram que uma definição ideal deste conceito precisa contemplar aspectos que envolvam a hierarquia dos resíduos (reduzir, reusar e reciclar), uma visão sistemática, qualidade ambiental e desenvolvimento econômico. Dessa forma, os autores definiram a EC como um sistema econômico que substitui o conceito de “fim de vida” com a redução, alternativamente reutilização, reciclagem e recuperação de materiais no processo de produção/distribuição e consumo. Em que a EC deva funcionar em uma visão sistêmica que contemple os níveis micro (produtos, empresas e consumidores), nível meso (parques eco industriais) e nível macro (cidade, região e nações), com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável, portanto, simultaneamente criando qualidade ambiental, desenvolvimento econômico e equidade social, em benefício das gerações atuais e futuras (Kirchherr *et al.*, 2017).

Nesse contexto, a EMF, fundada em 2010, surgiu como uma organização dedicada a promover e acelerar a transição global para a EC, sendo uma fundação amplamente reconhecida por seu papel central na definição e difusão dos princípios da EC (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Para a EMF a EC surgiu como um modelo econômico restaurativo e regenerativo com o intuito de manter os produtos, componentes e materiais em sua mais alta utilidade e valor em todos os momentos, distinguindo ciclos técnicos e biológicos (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Para elucidar sua visão, a EMF apresentou uma representação visual central para entender os fluxos de materiais dentro da EC, denominado de “Diagrama Borboleta”, conforme apresentado na Figura 4. Neste diagrama, a criação de valor nos ciclos técnicos, presentes no modelo circular econômico, reside na capacidade de preservar a mão de obra, energia e material e capital incorporados em formas mais elevadas de integridade do produto e componentes (Hopkinson *et al.*, 2018). Enquanto os ciclos biológicos são delineados para recuperar nutrientes biológicos dos produtos consumíveis e reinseri-los para a biosfera de maneira segura e assim construir capital natural, reduzindo desperdício e geração de resíduos (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Figura 4 – Diagrama Borboleta do sistema de Economia Circular adaptado de EMF.



Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2019)

Para otimizar o rendimento dos recursos e manter os produtos circulando é fundamental que os ciclos técnicos e biológicos sejam desenvolvidos e aprimorados (Ellen MacArthur Foundation, 2013). No ciclo técnico, os produtos são reutilizados, reparados, remanufaturados e reciclados. Enquanto no ciclo biológico, os materiais são devolvidos ao meio ambiente através de processos como compostagem e digestão anaeróbica. No entanto, para essa circulação entre ciclos técnico e biológicos ser efetiva, os componentes dos produtos devem ser separados adequadamente. Assim, torna-se essencial que o design dos produtos formule estratégias para elaborar cada vez mais produtos pautados na correta separação de componentes biológicos e técnicos e sua eventual circulação (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

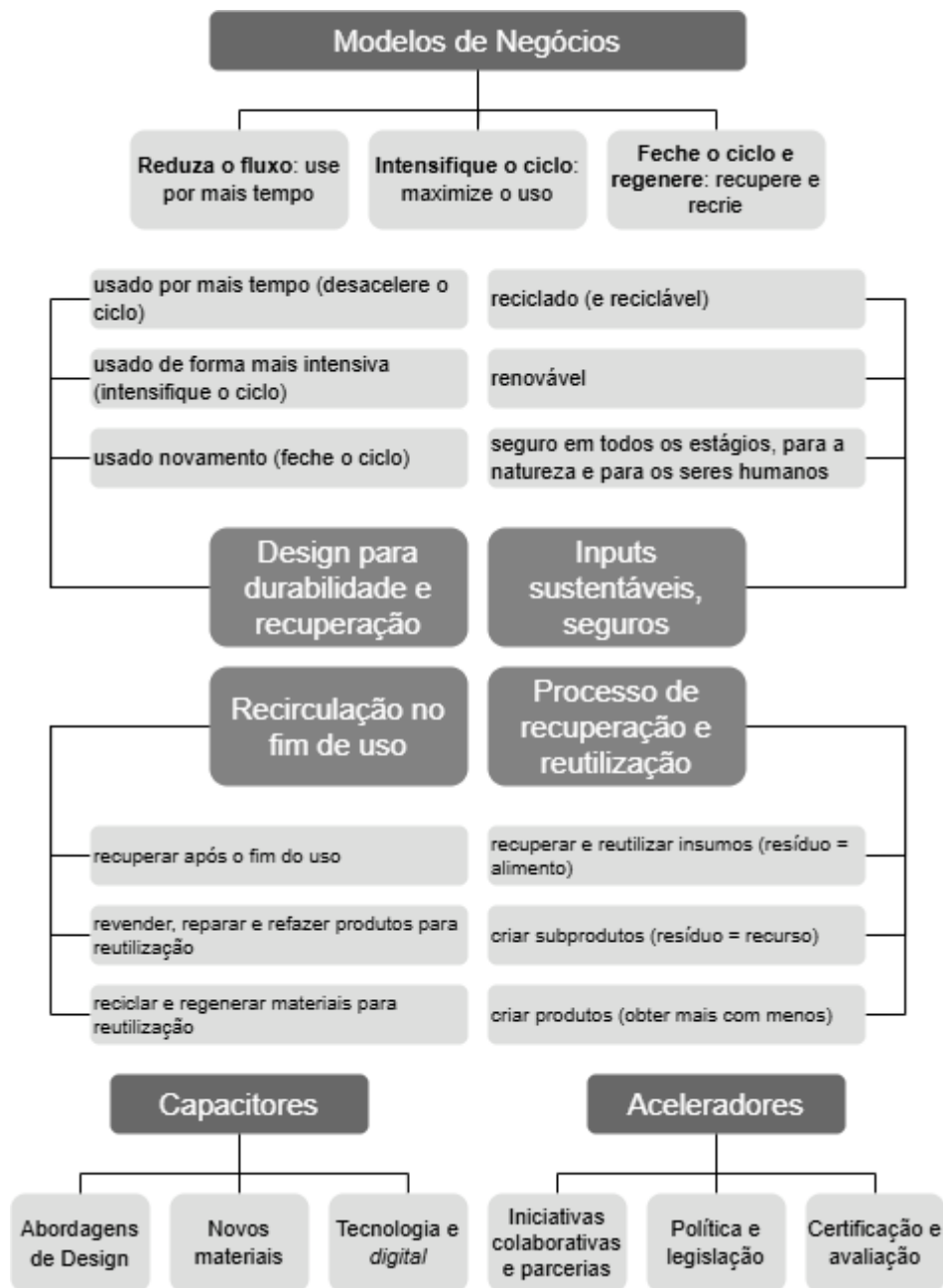
Conforme destaca a Figura 4, estes ciclos devem ser alimentados por sistemas de coletas eficientes, responsáveis por distribuir os recursos recuperados após o consumo dos recursos em forma de produto ou serviço. Destaca-se ainda que mesmo com separação

eficiente dos recursos em nutrientes técnicos e biológicos, apesar de indesejada, ainda há a geração de resíduos no sistema. Isto evidencia que a EC surge com ideia de eliminar a geração de resíduos, mas neste primeiro momento, busca a minimização ao máximo da geração de resíduos e poluição, e assim, tornar estes vazamentos de energia e recurso passíveis de serem absorvidos pelo ecossistema. Essa estrutura se mostra como uma das vantagens em relação ao sistema atual de economia, onde a sobrecarga de resíduos e poluição são evidentes e totalmente nocivos para o planeta como um todo.

De acordo com a EMF (2013), o diagrama borboleta (exibido na Figura 6) proporciona uma visão ampla da economia circular. Com base nesse diagrama, a EC é pautada em três princípios: (1) preservar e aprimorar o capital natural, controlando os estoques finitos e equilibrando fluxos de recursos renováveis; (2) otimizar o rendimento dos recursos circulando produtos, componentes e materiais em uso na mais alta utilidade; (3) promover a eficácia do sistema através da regeneração da natureza por meio dos processos naturais. Estas premissas visam configurar a economia circular como um sistema regenerativo no qual a entrada e o desperdício de recursos, emissão e vazamento de energia são minimizados através da construção de ciclos fechados dos elementos do sistema (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

Essa visão é reiterada por Bocken *et al.* (2016), os quais afirmam que a construção de sistemas circulares deve ser alinhada com estratégias que busquem além de estabelecer fluxos de energia e material em ciclos fechados, mas também desacelerar o uso dos recursos ao longo desses sistemas circulares e melhorar a eficiência dos recursos utilizando menos por produtos. Essas estratégias devem ser subsidiadas pelos princípios da EC. De acordo com Ghisellini *et al.* (2016), a EC é norteada por princípios como redução, reuso, reciclagem, reclassificação dos materiais em nutrientes técnicos e biológicos, uso de energia renovável e no design do produto.

Weetman (2021), pautada das principais abordagens descritas no Quadro 1, define a estrutura da EC em seis blocos: design para durabilidade e recuperação, inputs sustentáveis, seguros, recirculação no fim de uso, processo de recuperação e reutilização, modelos de negócio e capacitadores e aceleradores. Essa estrutura é ilustrada na Figura 5. Para a autora, o bloco do topo que contempla os modelos de negócios e relacionamentos circulares representa a maneira como as empresas projetam estruturas e estratégias a fim de promover a mudança para a economia circular. Os quatro blocos do meio constituem o fluxo central da estrutura, em que muitos desses fatores afetam diretamente o design da cadeia de suprimentos. O último bloco reforça os capacitadores internos e os aceleradores externos, que reforçam o apoio às estratégias de EC dos outros blocos.

Figura 5 – *Framework* da EC.

Fonte: Adaptado de Weetman (2021)

Weetman (2021) ressalta que os blocos que compõem o fluxo central, abrangendo o design para durabilidade e recuperação, inputs sustentáveis, seguros, recirculação no fim de uso e processo de recuperação e reutilização formam o que pode ser considerada de uma “cadeia de design e suprimentos”. Em que o design do produto, a especificação dos materiais e os inputs dos processos (produtos químicos, água, energia etc.) são o primeiro elo dessa cadeia e a cadeia de suprimentos precisa responder a esses elementos. Em que os esforços

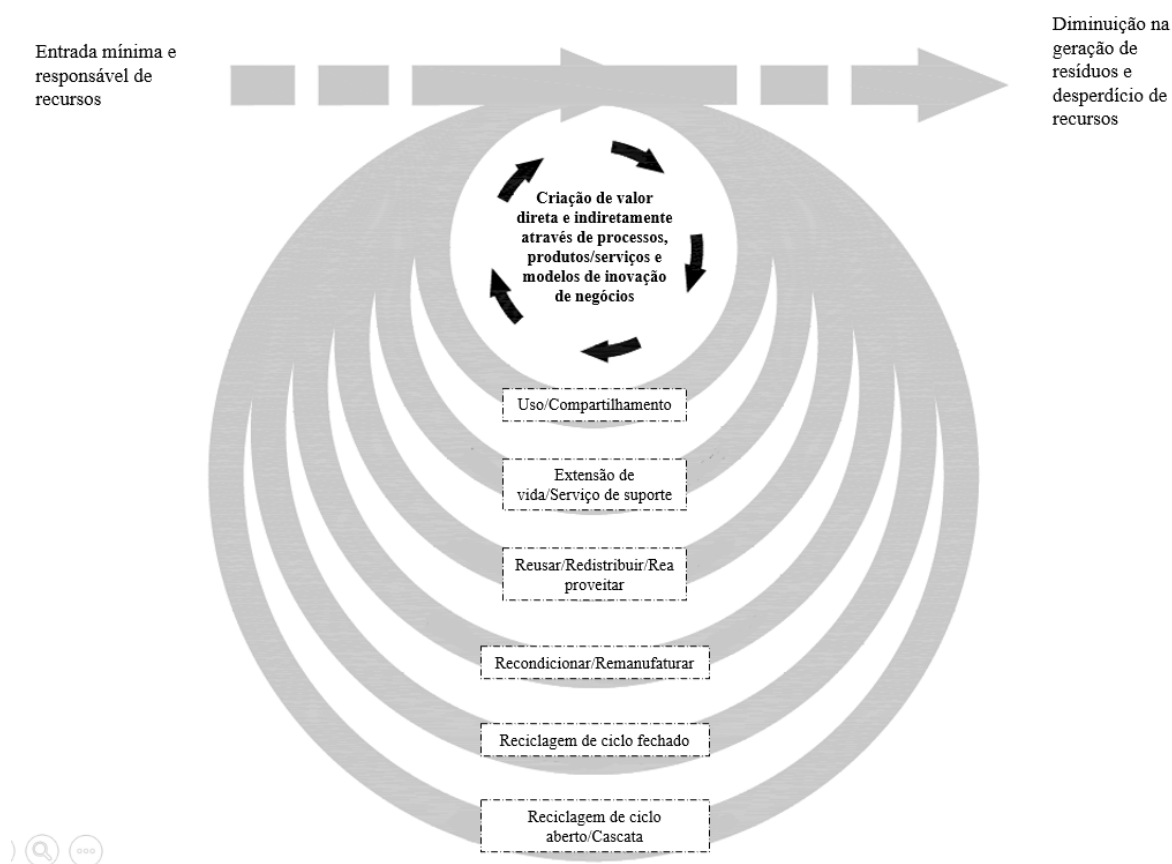
nesses blocos colaboram para a possibilidade dos estabelecimentos de fluxos circulares ao fim do processo, considerando processos de reutilização, remanufatura e reciclagem para agregar valor ao produto e prolongar sua vida útil.

Essa “cadeia de design e suprimentos” é fundamental para o modelo econômico circular, implicando na estratégia empresarial. De acordo com Weetman (2021), a cadeia formada por esses blocos centrais pode reduzir os custos operacionais; atenuar os riscos dos recursos; oferecer bens e serviços mais seguros; contribuir para a restauração do ecossistema; e fabricar produtos duráveis e bem desenhados. Assim, nota-se que essa estrutura da cadeia precisa ser suportada pelo bloco dos modelos de negócios. O modelo de negócio para a economia circular exige perspectivas diferentes e abordagens que desafiem os mecanismos comerciais a reter a propriedade do produto durante todo o ciclo de vida, se responsabilizando pelo desempenho, descobrindo novas maneiras de criar valor, pesquisando e utilizando materiais sustentáveis e novas tecnologias.

Esse conjunto do bloco central e dos modelos de negócios na estrutura proposta por Weetman (2021) necessitam dos capacitadores e aceleradores para desenvolver os modelos de negócios, produtos e serviços de economia circular. Esses capacitadores e aceleradores habilitam principalmente que as organizações pensem diferente para desenvolver suas estratégias e processos, como biomimética, química verde e pensamento sistêmico. Aliado ainda com a tecnologia e as inovações digitais que oferecem potencial para promover a economia circular, influenciando escolhas e melhorando a circulação.

Para a BS8001 (2017), uma norma publicada pela *British Standards Institution* e que se destina a ajudar organizações e indivíduos a implementarem práticas mais circulares e sustentáveis, a EC proporciona o uso dos recursos de maneira eficiente, assim como a preservação e regeneração do capital natural. Isto acontece devido a EC atuar na criação de valor de maneira indireta e direta através de modelos de negócio inovadores, produtos e serviços que são associados a estratégias de compartilhamento, extensão do ciclo de vida, reuso, remanufatura e reciclagem. Conforme a Figura 6, para a BS8001 (2017), a integração destes fatores supracitados diferencia a EC do modelo linear, pois gera a inserção mínima e responsável dos recursos naturais no sistema econômico e resulta em um baixo índice de perda em forma de rejeitos e energia.

Figura 6 – Resumo sobre a EC.



Fonte: Adaptado de BS8001 (2017)

Assim, a BS8001 (2017) ressalta que a implementação desses elementos da EC, presentes no diagrama da Figura 6, pode resultar em um novo conjunto de ideias para a inovação. Essas inovações promovem a circularidade dos recursos utilizados e geram benefícios econômicos. Logo, essas vantagens inerentes às atividades desenvolvidas no modelo econômico circular estão cada vez mais sendo reconhecidas e aceitas por governos no mundo todo e pelo setor industrial.

No entanto, para que esse conceito seja colocado em prática existe a necessidade de que novos modelos de negócio se desenvolvam e que consumidores responsáveis sejam moldados na sociedade (Kirchherr *et al.*, 2017). Nota-se, que o conceito de EC requer que os consumidores sejam mais ativos no processo de redução de consumo de produtos ou reinserção através do reuso e reciclagem, e assim, mudar a atitude de uma cultura passiva e descartável (Govindan; Hasanagic, 2018). E que as organizações desenvolvam esses novos modelos de negócio e se esforcem em maximizar o uso dos recursos e minimizar a geração de poluição. Isto deve ser fomentado pelo estabelecimento de uma cadeia industrial ecoeficiente

que mantenha o fluxo de materiais e energia em constante circulação (Govindan; Hasanagic, 2018).

Para Murray *et al.* (2017), a singularidade do conceito de EC surge a partir de duas ideias interconectadas: a economia de circuito fechado (*closed loop*) e o pensamento de se reelaborar o processo atual através do “*redesign*” dos processos produtivos. Esses novos designs com base no conceito de EC devem objetivar reduzir os resíduos, com o retorno de nutrientes para ciclos biológicos e a reciclagem de bens duráveis para ciclos técnicos, usando energia renovável para alimentar o sistema. Para outros autores como EMF (2013) e Bocken *et al.* (2016), é evidente que a aplicação do conceito de EC consolida o reuso e o melhor design dos produtos e processos de produção e, conseqüentemente, reduz significativamente o uso de materiais e a geração de resíduos. Logo, o conceito e os princípios da EC habilitam a criação de novos modelos de negócios e de produtos mais úteis e circulares, capazes de reduzir os impactos associados com consumo de recursos e energia, trazendo benefícios ao longo de toda a sua cadeia (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

De acordo com Bocken *et al.*, (2016), a integração de princípios e aspectos da EC na fase de elaboração dos produtos é fundamental, visto que é possível realizar modificações nas especificações, ajustar recursos, infraestruturas e demais atividades do projeto do produto para tornar a circularidade mais inerente ao processo. Essas modificações quando associadas com os demais aspectos, princípios e modelos de negócios circulares viabilizam a elaboração de estratégias que resultem na extensão do ciclo de vida dos produtos, na reciclabilidade destes em ciclos biológicos e técnicos e na facilidade de se reaproveitar componentes e produtos com remanufatura ou recondição (Bocken *et al.*, 2016).

No entanto, apesar da relevância da elaboração de produtos dentro dos aspectos da EC conforme estabelece o nível micro de implementação, ainda há a necessidade de se estabelecer metodologias e indicadores que mensuram os produtos e a circularidade neste nível (Bocken *et al.*, 2017; Linder *et al.*, 2017). Segundo Blomsma e Brennan (2017), os métodos de avaliação exercem um papel essencial na promoção de uma compreensão aprofundada do conceito de EC, bem como na sua integração com os princípios e aspectos que a fundamentam. No contexto brasileiro, visando atenuar a carência de metodologias específicas voltadas à operacionalização da EC, destaca-se o início da formulação do Plano Nacional de Economia Circular (PNEC) (BRASIL, 2025), cujo objetivo é orientar ações estratégicas para a transição rumo a um modelo econômico mais circular, inovador e competitivo. Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de avaliação capazes de lidar com problemas decisórios de natureza multicritério,

que subsidiem os tomadores de decisão na concepção de produtos mais alinhados aos preceitos da EC. A construção e aplicação dessas ferramentas são discutidas em maior profundidade no tópico seguinte.

2.4 Design Thinking

A importância do *Design Thinking* (DT) no contexto da EC e do desenvolvimento sustentável tem atraído um nível crescente de atenção da comunidade acadêmica. Especificamente, esse tipo de metodologia inovadora funciona para tornar os desafios complexos mais perceptíveis, melhorando assim a compreensão e auxiliando no processo de solução de problemas (Lin; Chu et al., 2024; Leal Filho et al., 2024; Brenner et al., 2016).

Nesse contexto, o DT se destaca como uma abordagem amplamente utilizada e impactante nas organizações para identificar os requisitos dos usuários nas etapas iniciais de um processo de inovação. O conceito foi introduzido pela primeira vez na Universidade de Stanford em 1957 (Leal Filho et al., 2024), consolidou-se ao longo das décadas de 1970 e 1980 e atingiu ampla notoriedade nos anos 1990, impulsionado pela fundação da IDEO, uma empresa referência em design e inovação (Cai et al., 2023; Tomlinson, 2018).

O DT denota uma abordagem centrada no ser-humano, colaborativa e inventiva para abordar problemas — que prioriza a identificação do problema em vez de simplesmente resolvê-lo — que ajuda a compreender indivíduos e potencialidades, formulando soluções que sejam inovadoras e aplicáveis (Frisk; Bannister, 2022). Sua aplicabilidade pode ocasionalmente se estender além da solução convencional de problemas, aventurando-se por desafios complexos (Bender-Salazar, 2023), como a aplicação com abordagens multicritérios (Frisk; Bannister, 2022) e auxiliando na promoção de soluções holísticas para a EC (Valusyte, 2023).

Dessa forma, o DT se constitui de uma abordagem sistêmica que adere uma estrutura para lidar com questões relacionadas ao design, colocando ênfase significativa na implementação de etapas articuladas no processo (Bender-Salazar, 2023). Nesse contexto, o termo design encapsula o aprimoramento das características ergonômicas, funcionais e estéticas de um determinado produto ou serviço para atender aos requisitos do usuário final, aumentando assim sua experiência de consumo, satisfação, conforto e segurança. Em essência, representa um paradigma que busca entregar produtos e serviços informados pelas demandas dos consumidores (Foster, 2021).

Nesse contexto, o DT está enraizado em cinco estágios principais: observar, definir, idealizar, prototipar e testar (Araujo, 2024). A etapa de observar corresponde a etapa principal

do DT centrada no contexto e no ser humano que participa do processo de decisão. Neste momento, obtêm-se o máximo de informação possível sobre a problemática, compreendendo as necessidades para se obter insights profundos (Vera et al., 2024). Na etapa de definição as informações coletadas durante o estágio anterior são analisadas para definir a declaração do problema, e assim definir os objetivos que norteiam a abordagem (Caballero et al., 2024). A etapa de idealização concentra, a partir da identificação do problema, as soluções e alternativas que podem atender ao objetivo (Rocha et al., 2024). O DT é composto também pela etapa de prototipagem em que as ideias geradas durante a ideação são transformadas em protótipos tangíveis. Os protótipos podem ser de baixa fidelidade (por exemplo, esboços) ou de alta fidelidade (por exemplo, modelos funcionais) (Guzmán-Coutiño, 2024). E na etapa de teste onde os protótipos gerados são testados com usuários reais para a obtenção de feedback, em que se utiliza este feedback para refinar ainda mais a solução (Araujo et al., 2024).

A partir dessas etapas inerentes ao DT, esta pesquisa adaptou as mesmas e as integrou junto ao método de decisão multicritério (discutido em profundidade no subtópico 2.5) para aprimorar o processo de tomada de decisão considerando diferentes domínios do conhecimento (Martins et al., 2020). O intuito dessa integração foi proporcionar uma solução mais abrangente que incentiva a exploração mais ampla das alternativas, envolvendo os decisores e considerando as diferentes perspectivas. As etapas da integração são abordadas no Capítulo 3, onde foram explicados a forma que se ocorreu os procedimentos metodológicos.

2.5 Métodos de Decisão Multicritérios

De acordo com Geissdoerfer *et al.* (2017), a economia circular estabelece uma relação condicional com a sustentabilidade; a EC é vista como um elemento importante para o desenvolvimento sustentável do sistema. Estudos recentes demonstram ainda a viabilidade em se utilizar métodos MCDM para se mensurar os aspectos de sustentabilidade (Diaz-Balteiro; González-Pachón; Romero, 2017; Kumar *et al.*, 2017). Nesse contexto, Gonçalves e Campos (2022) demonstraram em seu estudo que os métodos MCDM, além de resolver as questões relacionadas à sustentabilidade, também podem ser aplicados na resolução de problemas multicritérios relacionados aos aspectos e princípios da EC.

Os métodos MCDM compreendem um conjunto de métodos pautados em vários princípios matemáticos utilizados para resolver objetivos conflitantes (Niero; Kalbar, 2019). Essas técnicas multicritérios apresentam benefícios devido aos seus aspectos técnicos e estrutura que permitem a análise simultânea de fatores qualitativos e quantitativos com relação aos problemas de decisão (Alamerew; Brissaud, 2019). De acordo com Polatidis *et al.*,

(2006) e Almeida (2013), as principais abordagens MCDM podem ser classificadas como métodos baseados em funções de utilidade, métodos de superação (ou *outranking*) e métodos de programação.

Os métodos de superação utilizam a comparação de duas alternativas através da preferência dos tomadores de decisão. As técnicas baseadas em funções de utilidade agregam o desempenho de cada alternativa em um único critério para tomar a decisão. Os métodos de programação utilizam ferramentas computacionais para realizar as etapas de cálculo sucedidas por interações com tomadores de decisão para reduzir alternativas viáveis. Os dois primeiros grupos representam uma grande variedade de métodos de problemas discretos, enquanto o último está associado a métodos de problemas contínuos (Polatidis *et al.*, 2006; Almeida, 2013).

Esses métodos também podem ser diferenciados por conta de suas características de compensação, sendo divididos entre métodos compensatórios ou não compensatórios. Assim, a definição entre compensatório ou não compensatório é regada com base na relação entre os atributos, critérios e pesos que norteiam o problema e a permissão de *tradeoffs* entre eles (Xu; Yang, 2001). Dessa forma, nas técnicas compensatórias, o baixo desempenho de um determinado critério avaliado pode ser compensado pela performance de alto rendimento em algum outro critério (Banihabib; Hashemi-Madani; Forghani, 2017). O *Simple Additive Weighting* (SAW) (Hwang; Yoon, 1981), o *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) (Srdjevic; Medeiros; Faria, 2004), o *Analytical Hierarchy Process* (AHP) (Saaty, 1980), e o *Fuzzy AHP* (Banihabib; Shabestari, 2017; Yang; Ding; Hou, 2013) são alguns exemplos de técnicas multicritério compensatórias. Em contraste, as técnicas não-compensatórias significam que esses mesmos critérios com desempenho baixo não podem ser compensados por outros de desempenho satisfatório, e o desempenho agregado reflete este fato (Banihabib; Hashemi-Madani; Forghani, 2017). Um dos métodos mais difundidos dos não compensatórios é o *Elimination and Choice Translating Reality*, denominado ELECTRE III (Roy, 1968).

Velasquez e Hester (2013), Zavadskas *et al.* (2014) e Hwang e Yoon (1981) ao realizarem revisões de literatura sobre métodos MCDM, notaram que cada técnica tem suas vantagens e inadequações e não existe uma unanimidade que determine qual é a melhor técnica MCDM. Para Mousavi-Nasab e Sotoudeh-Anvari (2018), a seleção do método a ser utilizado deve considerar os diferentes critérios relacionados ao problema de decisão e assim, avaliar se a técnica é capaz de mensurar aquilo que se busca para a solução do problema. De acordo com Emovon e Oghenenyrovwho (2020), algumas das técnicas mais utilizadas para

resolver problemas multicritério são: o AHP, o *Weighted Sum Model* (WSM), o *Weighted Product Model* (WPM), o TOPSIS, o VIKOR, o PROMETHEE, o ELECTRE, e o *Multi-Attribute Utility Analysis* (MAUA). O Quadro 3 apresenta uma breve descrição sobre esses métodos mais utilizados, indicando o princípio de tomada de decisão, seus principais autores, ano de criação do método, além de seus méritos e deméritos.

Quadro 3 – Descrição dos Métodos MCDM

Métodos MCDM	Princípio do Método	Autor	Prós	Contra
AHP	A solução ideal é obtida com base no grau de importância dos critérios e alternativas. O problema é geralmente estruturado em formato hierárquico antes da classificação	Saaty (1980)	O AHP não necessita de ferramenta adicional para a determinação dos pesos dos critérios	A técnica se torna mais complicada com quantidades maiores de critérios e alternativas
TOPSIS	A técnica avalia a melhor alternativa aplicando distâncias para solução positiva e negativa	Hwang e Yoon (1981)	O processo é bastante simples e o procedimento de solução não muda independentemente do número de critérios de decisão e alternativas	A correlação entre os critérios não é considerada na avaliação da distância euclidiana. Além disso, a normalização vetorial pode ser necessário na resolução de problemas que são multidimensional
PROMETHEE	A ferramenta é um método de superação e resolve o problema de decisão com base na comparação de alternativas, considerando o desvio das alternativas em relação ao critério de decisão.	Brans e Vique (1985)	O processo não requer a normalização dos valores	O peso dos critérios precisa ser determinado utilizando outra ferramenta. Adicionalmente, as funções de preferência precisam ser definidas
ELECTRE	O método ELECTRE desenvolve uma solução baseada na definição da relação de superação entre duas alternativas ao mesmo tempo. Algumas das variantes da ferramenta são ELECTRE I e II	Roy (1968)	A técnica fornece uma solução mesmo com a ausência de alguns dados	Na ausência de software, a técnica é computacionalmente difícil devido à complexidade dos procedimentos de avaliação

Quadro 3 – Continuação.

Métodos MCDM	Princípio do Método	Autor	Prós	Contra
COPRAS	A técnica utiliza dependências diretas e proporcionais de significância e grau de utilidade das alternativas com respeito a critérios de decisão conflitantes para determinar a solução ótima	Zavadskas e Kaklauskas (1996)	O método é simples e eficaz em problemas de seleção de materiais	É bastante instável, pois a variação de dados pode resultar em mudança na classificação geral
VIKOR	A técnica determina a solução ótima comparando alternativas com respeito a medida de proximidade com a alternativa ideal	Opricovic e Tzeng (2007)	A abordagem é uma variedade atualizada do método TOPSIS	Diante de cenários conflitantes, a técnica pode se tornar complicada
MAUA	A técnica oferece um caminho para um trade-off sistemático entre os critérios de decisão para que a melhor alternativa seja escolhida entre várias alternativas.	Fishburn (1986) e Keeney (1969)	Ordem de preferência para alternativas são avaliados simultaneamente	O resultado do atributo de decisão é incerto
WSM	Nesta abordagem, a solução ótima é a aquele com o melhor valor da soma ponderada. Para critérios benéficos o melhor valor é o máximo enquanto para os critérios não benéficos o melhor valor é o mínimo.	Zadeh (1963)	O método matemático é simples e pode ser implementado sem auxílio de software	A técnica é normalmente adequada para problemas com o mesmo tipo de critério. Ou todos os critérios são benéficos ou todos os critérios não são benéficos
WPM	A técnica é muito semelhante ao WSM. A única diferença é que ao invés de usar a operação de adição aplicada no WSM, uma operação de multiplicação é realizada no WPM	Bridgman (1922)	O método matemático é simples e pode ser implementado sem auxílio de software	A abordagem é geralmente aplicável ao problema de decisão com o mesmo tipo de critério.

Conforme Mardani *et al.* (2015), a utilização dos métodos MCDM pode ser vista como uma maneira de lidar com problemas complexos dividindo-os em pequenas partes. Em que, após ponderar determinadas considerações e realizar julgamentos sobre esses pequenos componentes, essas partes são remontadas para apresentar uma imagem geral aos tomadores de decisão. Por conta dessas características, esses métodos (apresentados no Quadro 4) são considerados uma das metodologias mais utilizadas para tomada de decisão (Mardani *et al.*,

2015), sendo aplicadas em diversas áreas como energia (Kumar *et al.* 2017), sustentabilidade (Diaz-Balteiro; González-Pachón; Romero, 2017; Pereira *et al.*, 2022), seleção de métodos para reciclagem (Vinodh; Prasanna; Prakash, 2014), economia circular (Gonçalves; Campos, 2022) e também na seleção de materiais (Emovon; Oghenenyeroovwho, 2020; Mathiyazhagan *et al.*, 2019).

2.6 Métodos MCDM e Critérios para Seleção de Materiais

Diversos estudos utilizaram os métodos MCDM para a seleção de materiais, aspecto relevante para a elaboração desta pesquisa (Kumar; Jagadish; Ray, 2014; Mathiyazhagan *et al.*, 2019; Nikouei; Mosaffa; Amiri, 2021). De acordo com Mousavi-Nasab e Sotoudeh-Anvari (2018), a utilização de técnicas MCDM é viável para a seleção de materiais com base em critérios técnicos e de sustentabilidade, isto porque este tipo de seleção se configura como um problema complexo que tenta equilibrar pontos de compromisso entre fatores ambientais, sociais e econômicos. Como já mencionado anteriormente, a EC se relaciona diretamente com o conceito de sustentabilidade, sendo assim, consolidado um paralelo que permite a utilização dos métodos MCDM para a seleção de materiais com base nos aspectos da EC.

Nessa perspectiva, Emovon e Oghenenyeroovwho (2020) realizaram uma revisão de literatura sobre a aplicação de técnicas MCDM para a seleção de materiais e identificaram 55 estudos que utilizaram desta abordagem para avaliar diversos critérios. Os autores identificaram o critério de custo como o mais utilizado, destacando a associação deste com critérios técnicos referentes aos materiais de forma a compor ferramentas de decisão que ajudem os decisores a optar por produtos com ótimo desempenho e custo menor possível. Zhao *et al.* (2016) demonstraram ser possível utilizar uma abordagem MCDM híbrida com AHP para a seleção de um polímero com base no contexto do design sustentável. Os pesquisadores consideraram atributos econômicos, ambientais e sociais para a escolha dos critérios. Em que, o atributo econômico envolveu o critério de custo; o ambiental abordou critérios de consumo de energia e produção de resíduo sólido; e o social atribuiu critérios de reciclabilidade do material.

Mansor *et al.* (2014) utilizaram a associação do método AHP-TOPSIS para a seleção de um material automotivo termoplástico e elencou como importantes os aspectos de desempenho, custo, massa do material e condições de serviço. Esses aspectos envolveram critérios de coeficiente térmico de expansão, custo de matéria-prima, densidade, absorção de água e temperatura de deflexão térmica. Kiong *et al.* (2013) aplicou o método AHP para a

escolha de material que apresentasse menor impacto ambiental e utilizou como critérios a pegada de carbono, a energia total consumida, eutrofização da água e acidificação do ar.

Rahim *et al.* (2021) aplicaram um modelo integrado *Fuzzy* AHP-TOPSIS para a seleção de materiais em indústrias de manufatura. Os autores consideraram critérios qualitativos e quantitativos que abordaram os aspectos técnicos dos materiais como propriedades físicas e químicas; aspectos econômicos que abrangeram custo do material e de transporte; e aspectos ambientais como reciclabilidade e resíduos gerados. Nikouei, Mosaffa e Amiri (2021) utilizaram o método AHP-TOPSIS para a seleção de polímeros na aplicação industrial, elencando como principal foco do artigo a escolha de critérios técnicos como absorção de água e força de tração para o desempenho dos materiais em questão.

Esses estudos demonstram que os critérios para a seleção dos materiais estão inteiramente relacionados com o tipo de produto analisado e com o fator econômico da análise. Fatores como estes elucidam a ampla abrangência destes métodos de decisão e como eles se enquadram em diversas perspectivas. Emovon e Oghenenyerovwho (2020) acrescentam ainda que a possibilidade de se envolver diferentes critérios para a seleção dos materiais são consideradas uma tarefa difícil e conflituosa para os stakeholders envolvidos no processo de decisão. Essa difícil missão corrobora para a utilização de abordagens MCDM no intuito de se achar equilíbrio entre os critérios e se obter produtos com melhor desempenho.

Ademais, as abordagens MCDM utilizam perfeitamente critérios que retratam valores quantitativos e conseguem traduzir aspectos de avaliação qualitativos, aprimorando a seleção de materiais em etapas fundamentais como a parte de elaboração dos produtos. Com isto, relacionar os critérios utilizados nos métodos MCDM com conceitos da EC pode ser visto como uma estratégia interessante do ponto de vista da circularidade do produto e como forma de mudar o modelo atual econômico. Essa estratégia de seleção pode resultar na criação de novas dinâmicas na escolha dos materiais e assim resultar em produtos que abordam características que se encaixem no conceito da EC. Outro fator fundamental que corrobora para a utilização de abordagens MCDM para fomentar produtos pautados na EC é a fácil aplicação dos métodos. Isso facilita que os tomadores de decisão optem por escolher produtos que viabilizem, de certa forma, o estabelecimento de uma economia mais circular.

Com isto, nota-se que a aplicação dos métodos MCDM para seleção de materiais é uma técnica bastante difundida na literatura, sendo aplicada em diversos setores e com diferentes tipos de produtos, com destaque para os polímeros (Nikouei; Mosaffa; Amiri, 2021; Zhao *et al.*, 2016). Ressalta-se que os métodos AHP e TOPSIS supracitados são bastantes difundidos na literatura de seleção de materiais devido a facilidade de aplicação e por serem

efetivos na resolução de problemas com complexidades reais (Karimi *et al.*, 2011). Ademais, é possível a utilização destes métodos de maneira híbrida e complementar, uma vez que o método AHP viabiliza a determinação dos pesos dos critérios e fomenta a aplicação do método TOPSIS para a seleção das alternativas com melhor desempenho, identificando ainda quais destas alternativas está mais próxima da solução ideal positiva e a mais distante da solução negativa.

Por sua vez, os critérios para a composição das análises que fomentam a seleção dos materiais são variados e corroboram com a perspectiva de avaliação dos estudos. Isto possibilita a introdução dos aspectos da EC na aplicação do método MCDM para a seleção de polímeros, viabilizando uma análise circular e que agregue valor ao produto desde o momento de seleção do material e consequentemente nas demais etapas do seu ciclo de vida. A EC preconiza a eficácia do sistema e a otimização do rendimento dos recursos com o intuito de gerar, principalmente, benefícios econômicos e ambientais. Assim, o conceito da EC possibilita que os critérios elencados para a construção de uma abordagem MCDM que vise a seleção e avaliação de materiais (como por exemplo os polímeros) sejam direcionados para indicar aspectos que solidifique a eficiência dos materiais e a circularidade dos produtos, preservando o capital natural, reduzindo vazamentos de energia dos sistemas e estimulando a criação de sistemas com ciclos fechados.

Com isto, a aplicação dos conceitos da EC para a escolha de materiais com a utilização de ferramentas multicritérios podem ser vista como uma abordagem inovadora na literatura. Logo, a junção destes conceitos para a aplicação de uma nova abordagem colabora com a consolidação do modelo econômico circular que, apesar dos avanços, ainda carece de meios legítimos e robustos para mensurar aspectos de circularidade (Linder; Sarasini; van Loon, 2017; Mesa, 2023; Barrak *et al.*, 2024), justificando, portanto, a utilização destes conceitos para a seleção da resina PET, conforme estabelecido no objetivo deste estudo.

2.7 Resinas de PET e critérios alinhados com a Economia Circular

Como dito anteriormente, comercialmente o etileno glicol (EG) e o ácido tereftálico (TPA) ou tereftalato de dimetila (DMT) são produzidos do etileno ou para-xileno. Contudo, ressalta-se que existem diferentes rotas químicas derivadas de biomassa que podem ser exploradas para a produção de EG e DMT, e que consideram critérios alinhados com os preceitos da Economia Circular e podem ser mais sustentáveis (Nistico, 2020). Essa preocupação com a forma de produção da resina se dá por conta também das elevadas emissões de gases de efeito estufa e ao esgotamento dos combustíveis fósseis oriundos das

rotas tradicionais que exploram o etileno ou o para-xileno para a produção dos monômeros de PET (Pang *et al.*, 2016).

Para elucidar a compreensão da forma de produção dos monômeros de PET e entender melhor os critérios que compõem o processo de síntese do PET, deve-se destacar as formas de produção do EG, TPA e DMT por rotas diferentes das tradicionais que exploram somente os combustíveis fósseis. Nesse contexto, o EG pode ser obtido por quatro principais rotas (Pang *et al.*, 2016), denominadas: a conversão de etanol (por desidratação para a forma preliminar "bio"-etileno), glicerol e sorbitol (por hidrogenólise catalítica com sistemas catalíticos à base de Ru), ou outras biomassas lignocelulósicas (na presença de catalisadores Ru/Ni/W).

O TPA pode ser obtido, de acordo com a literatura (Pang *et al.*, 2016; Nistico, 2020), por sete vias consideradas “verdes”, sendo estas: (i) a síntese de para-xileno a partir de etileno de base biológica (reações complexas em várias etapas que envolvem trimerização, desproporção catalítica, reação de Diels-Alder e desidrogenação); (ii) 5-hidroximetilfurfural (HMF, através de hidrodessoxigenação e reações de Diels-Alder com etileno ou acroleína por meio de catalisadores de zeólito); (iii) ou isobutanol (através de desidratação em várias etapas, oligomerização e reações de desidrociclicização); (iv) seguida de oxidação em ácido tereftálico, a pirólise/reforma catalítica da biomassa (e posterior reforma BTX utilizando catalisadores de zeólito devidamente modificados) seguida de oxidação em ácido tereftálico; (v) bem como a síntese direta de ácido tereftálico a partir de isopreno e ácido acrílico (através do mecanismo de Diels-Alder seguido de reações de desidroaromatização e oxidação), (vi) limoneno (através da desidrogenação em para-cimeno e subsequente oxidação em ácido tereftálico), (vii) ou furfural (através de um mecanismo muito complexo em várias etapas que envolve seis reações, na presença de um catalisador homogêneo/corrosivo).

As principais vantagens e desvantagens da utilização de materiais oriundos de fontes diferentes do petróleo podem ser vistas na Tabela 1. Esses dados foram adaptados de Nistico (2020) e Pang *et al.* (2016).

Tabela 1 – Comparação dos processos de origem sustentável para a produção dos monômeros utilizados na síntese de PET.

Monômero	Matéria-prima	Rendimento	Seletividade	Pontos Críticos	Viabilidade
EG	Etanol	Alto	Alto	Custos elevados	Comercial
	Glicerol	Médio-Baixo	-	Matéria-prima limitada	-
	Sorbitol	Médio-Baixo	-	Matéria-prima limitada	Comercial
	Biomassa	Alto	Alto	Condições diluídas	Laboratório
Ácido Tereftálico	Etanol	Médio	Baixo	Alta dificuldade	Laboratório
	HMF	Alto	-	Custos elevados	Laboratório
	Isobutanol	Baixo	-	Custos elevados	Projeto Piloto
	Biomassa	Baixo	Baixo	-	Demonstração
	Isopreno / Ácido Acrílico	Alto	-	Matéria-prima limitada	Laboratório
	Limoneno	-	-	Matéria-prima limitada	-
	Furfural	Baixo	-	Alta dificuldade	Laboratório

Fonte: Adaptado de Nistico (2020) e Pang *et al.* (2016).

Conforme ilustrado na Tabela 1, a maioria dos processos apresenta várias criticidades (por exemplo, condições adversas, disponibilidade limitada de matéria-prima e alta custos de substratos brutos), tornando assim essas soluções técnicas ainda exploráveis apenas em escala de laboratório. Segundo os autores Nistico (2020) e Pang *et al.* (2016), a viabilidade industrial só foi alcançada no caso do EG com dois processos: a produção de EG a partir do etanol, graças à abundante disponibilidade de usinas de bioetanol no Brasil/Ásia (por exemplo, a produção de PlantBottle™ pela Coca-Cola Company) (Pang *et al.*, 2016; Khan *et al.*, 2017), bem como a produção de EG a partir de sorbitol na China, muito atraentes devido às vantagens econômicas proporcionadas pelo produto primário formado (ou seja, 1,2 propileno glicol). Em relação ao ácido tereftálico, apenas um processo atingiu o nível de produção em escala de demonstração: é o caso da biomassa tecnologia de pirólise/reforma para obter para-xileno (e subsequentemente ácido tereftálico) desenvolvido pela Virent Inc. (Wisconsin, EUA) para produzir bio-PET (Virent, 2023; Nistico, 2020).

Ressalta-se que a resina PET também deve ser caracterizada quanto às suas propriedades físico-químicas, térmicas e mecânicas. Nesse contexto, a resina de PET caracteriza-se por possuir alto peso molecular (entre 20.000 g.mol⁻¹ e 80.000 g.mol⁻¹), ponto de fusão (250 – 260 °C), cristalinidade (entre 10% e 60%) e viscosidade (entre 0,55 dL.g⁻¹ e 1 dL.g⁻¹). Desta forma, apresenta-se a Tabela 2, com uma comparação entre as principais propriedades físico-químicas, térmicas e mecânicas relevantes do PET em função do grau de

cristalização (ou seja, amorfo x semicristalino), de acordo com a base de dados CES (Granta Design, 2017).

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas e mecânicas da resina de PET com base no banco de dados da CES Seletor.

PET	Físico-química		Térmica						Mecânica		
	Densidade (g.cm ⁻³)	Transparência	Permeabilidade, 25 °C		T _g (°C)	T _m (°C)	T _{max} (°C)	T _{molde} (°C)	E (GPa)	σ _{max}	ε _b (%)
			O ₂	CO ₂							
Amorfo	1.29 - 1.39	Transparente	1.2-2.8	15.7	60-84	-	55-65	20-30	2.8-3.0	55-60	280-320
Semicristalino	1.37-1.40	Opaco	1.2-2.8	14.0	68-80	255-265	115-120	125-145	2.8-3.1	70-75	65-75

Fonte: Adaptado de Nistico (2020).

Destaca-se ainda a necessidade de se considerar como pontos fundamentais para produção da resina de PET o consumo de água e energia do processo. A Tabela 3 apresenta os dados de consumo desses recursos para as rotas DMT e TPA e a quantidade de efluentes geradas, paralelamente (Alkaya; Demirer, 2015).

Tabela 3 – Consumo de energia e de água para as rotas químicas DMT e TPA

Tipo de Resina	Rota de processamento	Total de água consumida (m ³ . ton ⁻¹ de produto)	Energia Consumida (GJ. ton ⁻¹ de produto)	Carga orgânica dos efluentes (kg. ton ⁻¹ de produto)	Referência
PET	DMT	0.1-2.2	2.5-7.4	8.0-16.0	Alkaya; Demirer, 2015
PET	TPA	0.4-10	2.1-4.5	2.0-16.0	

Fonte: Adaptado de Alkaya e Demirer, 2015.

Esse conjunto de características corroboram para a construção de uma visão circular com relação à produção da resina PET e dos seus produtos, como no caso das garrafas. No caso das garrafas, isso inclui o incentivo à reciclagem, a redução do consumo de recursos virgens, a reutilização de materiais, e a melhoria contínua dos processos de produção, visando minimizar o impacto ambiental. A implementação de práticas circulares contribui para a criação de cadeias de valor mais resilientes, eficientes e alinhadas aos princípios da EC, como a redução de resíduos e o fechamento de ciclos produtivos.

2.8 Considerações finais sobre a fundamentação teórica

Diante disso, evidenciou-se que a incorporação de práticas circulares na produção de resinas PET, especialmente no contexto escolha das rotas químicas, representa um avanço significativo rumo à transição para modelos produtivos mais circulares. O processo produtivo das resinas PET possui particularidades que o tornam altamente relevante para a engenharia de produção, sobretudo em razão de sua ampla utilização na cadeia industrial de embalagens e têxteis, e pela complexidade de suas rotas químicas. A engenharia de produção, enquanto campo voltado à eficiência, inovação e sustentabilidade dos sistemas produtivos, desempenha um papel estratégico na reconfiguração desses processos. Nesse contexto, compreender os fluxos produtivos, os insumos envolvidos e os *trade-offs* entre desempenho técnico, econômico e impacto ambiental é essencial para o aprimoramento das decisões gerenciais. A produção de resina PET, portanto, oferece um cenário fértil para a aplicação de métodos analíticos que promovam uma gestão mais integrada e compatível com os princípios da EC.

A EC, ao propor a reintegração de materiais ao ciclo produtivo, surge como uma diretriz fundamental para transformar a lógica de produção linear que domina o setor de polímeros. No caso da síntese de PET, essa mudança requer o redirecionamento dos processos para rotas mais eficientes, que considerem a redução do consumo de matérias-primas virgens, o aproveitamento de resíduos e a diminuição de emissões. A adoção dessa lógica exige, no entanto, ferramentas capazes de traduzir os princípios circulares em critérios operacionais, mensuráveis e aplicáveis no ambiente industrial. Assim, a EC deve ser tratada como uma referência prática para a reestruturação de processos industriais, consolidando a diretriz conceitual explorada neste modelo econômico.

Nesse sentido, os métodos multicritério se mostram particularmente adequados para lidar com a complexidade e multidimensionalidade envolvidas na síntese de resinas PET sob a perspectiva da economia circular. A possibilidade de incorporar simultaneamente critérios ambientais, econômicos e técnicos torna o MCDM uma ferramenta estratégica para orientar escolhas mais equilibradas e fundamentadas. Ao possibilitar a comparação estruturada entre diferentes rotas químicas, os modelos multicritério ajudam os decisores a visualizar os compromissos necessários entre eficiência produtiva e responsabilidade ambiental, promovendo a adoção de alternativas mais circulares com base em dados e preferências devidamente analisadas.

Por fim, destaca-se que a integração entre os fundamentos da engenharia de produção, os princípios da economia circular e o uso de métodos multicritério representa uma

abordagem metodológica robusta e promissora para enfrentar os desafios contemporâneos da indústria de polímeros. Assim, buscou-se preencher essa lacuna ao oferecer um modelo híbrido de decisão que articula essas dimensões de maneira coerente e aplicável. Ao sistematizar os critérios relevantes e considerar as percepções de especialistas com distintos perfis, a proposta metodológica viabiliza a construção de ferramentas mais eficazes para a tomada de decisão, alinhadas às exigências de circularidade, inovação e competitividade que caracterizam a lógica industrial. Nesse sentido, o próximo capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa, detalhando o delineamento da abordagem multicritério híbrida utilizada, os critérios selecionados, o processo de elicitação com especialistas e as etapas de aplicação dos métodos FAHP e FTOPSIS, os quais sustentam a estrutura decisória proposta.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo descreveu em detalhe o método de pesquisa e a forma que ele abordou a utilização do DT em associação com o modelo multicritério utilizado neste estudo. Esta abordagem teve por intuito integrar uma metodologia abrangente que combinou a investigação e resolução de problemas com os processos estruturados utilizados no modelo de tomada de decisão. Assim, essa integração permitiu analisar a teoria existente na área, definir a problemática e a sua ideiação, testar a aplicabilidade do modelo multicritério proposto e, validar a intenção da sua aplicação com representantes da indústria. Essa abordagem combinando o DT e a abordagem multicritério híbrida foram adaptadas de Martins et al. (2020) e Frisk e Bannister (2022).

Dessa forma, o capítulo foi dividido em três Etapas, compostas também por Sub-etapas conforme estabelecido pela abordagem DT, visando alcançar o objetivo principal. A partir das questões de pesquisa apresentadas na Seção 1.1, foram definidos os objetivos específicos, conforme abordado na Seção 1.2.2. Com isso, o método foi estruturado em fases distintas, cada uma voltada para atender a esses objetivos. O Quadro 4 ilustra a relação entre os objetivos específicos, as questões de pesquisa, as etapas do estudo e o que se esperava atingir em cada uma delas.

A integração dos métodos foi fundamentada em aspectos essenciais dessas metodologias, destacando-se a abordagem centrada no usuário e o caráter iterativo proporcionado pelo DT (Leal Filho *et al.*, 2024), alinhando-se ao objetivo principal deste estudo de proporcionar uma ferramenta para o decisor baseada nos conceitos da economia circular. Nesse contexto, a abordagem multicritério foi incorporada ao DT como um componente essencial, permitindo a estruturação do problema e aprimorando o processo de tomada de decisão, especialmente diante das incertezas inerentes a esse tipo de análise (Kar; Rai, 2024). A metodologia proposta foi organizada em três etapas, compostas por seis sub-etapas que orientaram sua aplicação, conforme descrito no Quadro 4, sendo esse desenho metodológico adaptado de Martins et al. (2020) e Frisk e Bannister (2022).

Quadro 4 – Detalhes da pesquisa e as etapas de elaboração

Questão de Pesquisa	Objetivo Específico	Etapa da Pesquisa com base no DT	Sub-etapas da Pesquisa com base no DT	Descrição das Etapas	Resultado Esperado
1) Quais aspectos da EC devem ser considerados durante o processo de síntese de produtos plásticos para reduzir os impactos associados ao processo de produção de PET?	a) Definir as características e os critérios do modelo MCDM, considerando os dados qualitativos e quantitativos das rotas de produção da resina PET	Etapa I – Motivação	Etapa I.1: Análise da Teoria e Identificação do Problema	Definir o problema central: necessidade de selecionar rotas químicas para produção de PET com base na EC	Visão geral sobre Métodos MCDM
	b) Desenvolver o modelo MCDM e testar a sua aplicabilidade com base em dados reais com relação às resinas PET e a sua forma de produção		Etapa I.2: Definição dos Objetivos	Estabelecer os objetivos específicos para selecionar rotas alinhadas com aspectos da EC	
2) Como comparar os diferentes processos de síntese com base na seleção de indicadores e critérios pautados no conceito da EC para gerar resinas de PET mais circulares?	c) Identificar como os aspectos da EC corroboram para a seleção do método de síntese do PET e na tomada de decisão	Etapa II - Conceitualização e Desenvolvimento	Etapa II.1: Seleção dos Critérios e Alternativas	Selecionar critérios relevantes para avaliar rotas químicas, considerando a opinião de especialistas e os princípios da EC	Proposição do Método

Quadro 4 – Continuação.

Questão de Pesquisa	Objetivo Específico	Etapa da Pesquisa com base no DT	Sub-etapas da Pesquisa com base no DT	Descrição das Etapas	Resultado Esperado
2) Como comparar os diferentes processos de síntese com base na seleção de indicadores e critérios pautados no conceito da EC para gerar resinas de PET mais circulares?	c) Identificar como os aspectos da EC corroboram para a seleção do método de síntese do PET e na tomada de decisão	Etapa II - Conceitualização e Desenvolvimento	Etapa II.2: Aplicação do Fuzzy AHP para Ponderação	Aplicar Fuzzy AHP para determinar pesos relativos dos critérios, priorizando aspectos mais importantes	Proposição do Método
		Etapa III – Validação dos Resultados	Etapa III.1: Avaliação com Fuzzy TOPSIS	Usar Fuzzy TOPSIS para calcular proximidade de cada rota em relação às soluções ideais;	Validação da aplicabilidade do método proposto com especialistas e análise dos resultados para identificar as rotas químicas alinhadas à EC
3) Como comparar o nível de circularidade entre as variedades de resinas e seus processos distintos de polimerização?	d) Mensurar o desempenho das rotas químicas de produção de resinas PET por meio de uma abordagem multicritério híbrida baseada na lógica <i>fuzzy</i> considerando os princípios da EC		Etapa III.2: Validação da resina PET selecionada com a indústria	Validar a escolha da resina com a Indústria.	Validação das resinas PET selecionadas com o método MCDM com a indústria

Cada uma dessas etapas apresentadas no Quadro 4 é detalhada a seguir. Assim, com o desenvolvimento das etapas metodológicas da pesquisa obteve-se uma estrutura coesa para uma possível futura aplicação do método de decisão multicritério. Com isto, o objetivo principal do estudo foi alcançado, o qual visou desenvolver um modelo de decisão multicritério que mensure as rotas químicas para a elaboração da resina PET com base nos conceitos da EC.

3.1 Etapa I – Motivação

A Etapa 1 foi subdividida em 2 sub-etapas. Seu objetivo foi estabelecer o contexto e a relevância do estudo, fundamentando a necessidade de aplicar métodos multicritério para abordar questões relacionadas à EC na produção de resinas PET. Inicialmente, identificou-se o problema central, que consiste em selecionar rotas químicas mais alinhadas aos princípios da EC, considerando seus impactos técnicos, econômicos e ambientais. Essa etapa também incluiu a definição clara dos objetivos do estudo, como avaliar a viabilidade de aplicar modelos multicritério para mensurar os aspectos da EC e identificar os critérios qualitativos e quantitativos mais relevantes para a análise. A revisão da literatura desempenhou um papel crucial aqui, fornecendo uma visão geral sobre os métodos multicritério de decisão (MCDM) e os critérios aplicados nesse contexto, fundamentando a pesquisa em bases teóricas sólidas.

3.1.1 Etapas I.1 e I.2: Análise teórica, identificação do problema e definição dos objetivos

A primeira Sub-etapa da Etapa I (Etapa I.1) consistiu na análise da teoria com o intuito de identificar o problema e posteriormente definir os objetivos específicos para a elaboração da tese. Nesse contexto, conduziu-se uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre os métodos de decisão multicritério e como eles se relacionam com a EC. A RSL foi elaborada a partir do protocolo e estágios de preparação sugeridos por Tranfield *et al* (2003). Foi realizada uma busca dos artigos nas bases científicas da Scopus e da ISI *Web of Science* com os termos chaves associados a três elementos principais: “*circular economy*”, “*indicators*”, e “*MCDM*”. As bases da Scopus e ISI *Web of Science* foram selecionadas devido ao seu uso dominante em mapeamento científico e ampla cobertura de periódicos de economia circular.

Por seguinte, o procedimento de busca descrito anteriormente mapeou um total de 166 artigos distribuídos entre as bases científicas na 1ª rodada de avaliação para a elaboração da RSL. Destes artigos mapeados, 84 artigos foram encontrados na *Scopus* e 82 foram obtidos na *ISI Web of Science*. Esse procedimento foi realizado de 9 a 11 de maio de 2021. Uma 2ª rodada de busca nas bases científicas foi feita posteriormente em janeiro de 2024 para

atualizar o conteúdo do mapa conceitual elaborado nessa etapa. Não foram utilizadas restrições cronológicas na seleção dos artigos. Sequencialmente, os dados referentes aos artigos foram extraídos e analisados com o auxílio do software *Mendeley*. Para refinar a busca, foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão descritos na Tabela 4, que foram utilizados nas duas rodadas de busca realizadas.

Para garantir a qualidade do material revisado, foram considerados apenas periódicos com revisão por pares. A inclusão foi restrita a artigos no idioma inglês. Os artigos selecionados foram apresentados em sua versão completa e na íntegra, sem restrições. O escopo foi restrito a estudos que abordam uma relação estrita com economia circular e técnicas de MCDM.

Tabela 4 – Critérios de inclusão e exclusão para a revisão sistemática

Inclusão	Exclusão
I1. Publicado em periódico revisado por pares	E1. Artigos duplicados
I2. Publicado somente em inglês	E2. Periódico sem revisão por pares, jornais de negócios, revistas atuais, conferências, livros e sites
I3. Os estudos devem ser artigos concluídos	E3. Estudos exclusivamente teóricos, revisão de literatura, revisão sistemática de literatura, revisão integrativa, estudos bibliométricos
I4. Estudos que abordam uma relação estrita com o foco do artigo	E4. Estudos que não abordem ferramentas multicritério cujo foco esteja alinhado com o escopo da pesquisa
	E5. Estudos que não utilizem um MCDM

Para a 1ª rodada de avaliação nas bases de conhecimento, após a seleção dos 166 artigos, foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão presentes na Tabela 4 para compor o conjunto final de estudos a serem analisados. O procedimento geral para a seleção dos artigos considerando os critérios descritos acima podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Processo completo de seleção e triagem de artigos na 1ª rodada de avaliação

Etapas	Procedimento	Critérios de Inclusão/Exclusão	Artigos Selecionados	Excluídos
Triagem	Aplicar filtros nas bases <i>Scopus</i> e <i>Web of Science</i>	I1; I2; e I3 E2	137	29
	Verificar artigos duplicados	E1	84	53
Elegibilidade	Leitura do título, resumo e palavras-chave	I4 E3; E4; e E5	54	30
	Leitura dos artigos na íntegra		49	5
Incluído	Artigos completos incluídos na análise qualitativa	-	49	-

Assim, após essa etapa, foram selecionados e avaliados um total de 49 artigos integralmente, buscando analisar a relação dos aspectos da EC e seus indicadores com os modelos de decisão multicritério. Essa 1ª rodada gerou a produção do artigo intitulado “*A systemic review for measuring circular economy with multi-criteria methods*”, cuja primeira página encontra-se apresentada no Anexo A. Além disso, a RSL contribuiu para a fundamentação teórica da tese, possibilitando um aprofundamento sobre como os métodos MCDM podem ser utilizados para lidar com problemas complexos e que envolvem diferentes variáveis como no caso da EC. Destacando, assim, a habilidade das técnicas multicritério em integrar múltiplos indicadores em forma de critérios e entender a complexidade de sistemas circulares.

A 2ª rodada foi realizada entre 02 e 04 de janeiro de 2024, em que foram mapeados um total de 149 artigos, distribuídos 74 na base da Scopus e 75 na base da ISI *Web of Science*. Todos os critérios de busca da 1ª rodada foram replicados para a atualização, com exceção do parâmetro de data, que considerou os artigos publicados da data da rodada inicial para o momento de aplicação da atualização. Desta forma, com a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão presentes na Tabela 6, selecionou-se um total de 15 artigos para serem incluídos à revisão sistemática iniciada na rodada anterior. O processo de triagem completo pode ser visto na Tabela 6.

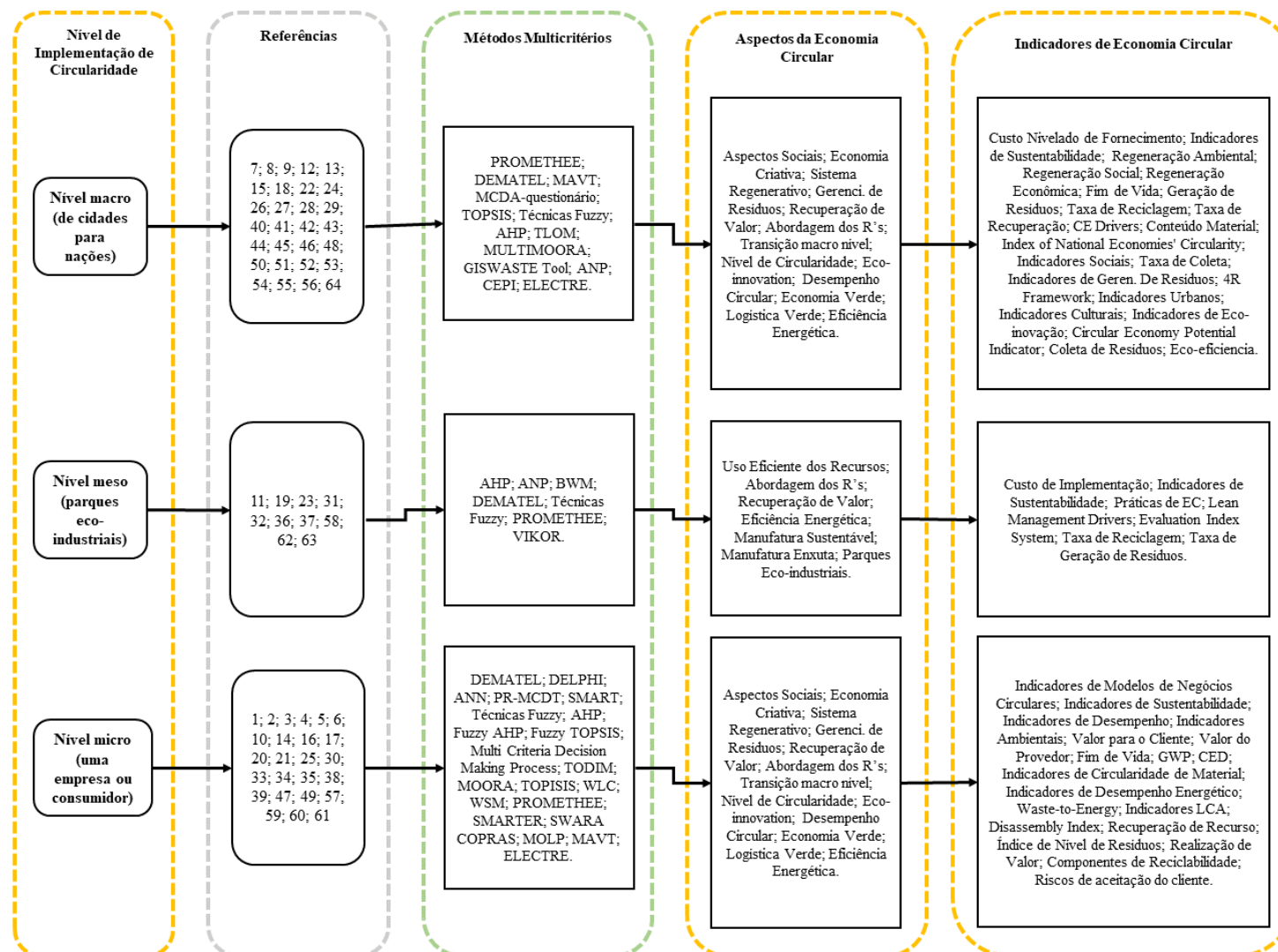
Tabela 6 – Processo completo de seleção e triagem de artigos na 2ª rodada de avaliação

Etapas	Procedimento	Critérios de Inclusão/Exclusão	Artigos Selecionados	Excluídos
Triagem	Aplicar filtros nas bases <i>Scopus</i> e <i>Web of Science</i>	I1; I2; e I3 E2	123	26
	Verificar artigos duplicados	E1	92	31
Elegibilidade	Leitura do título, resumo e palavras-chave	I4 E3; E4; e E5	48	44
	Leitura dos artigos na íntegra		15	33
Incluído	Artigos completos incluídos na análise qualitativa	-	15	-

Desta forma, a Etapa I foi concluída após a realização das duas rodadas de busca nas bases de conhecimento. A construção da RSL permitiu delimitar características relevantes para a EC e elaborar um mapeamento na literatura dos principais métodos de decisão multicritério que se relacionam com o conceito de um modelo econômico circular. Essa

relação pode ser vista com mais clareza no mapa conceitual presente na Figura 7 que unificou a abordagem dos conceitos de decisão multicritério com a economia circular. No Apêndice I são descritas as referências utilizadas no mapa conceitual e a relação dos métodos MCDM com os aspectos da EC.

Figura 7 – Mapa conceitual da relação da EC com os métodos MCDM conforme as duas rodadas de avaliação.



A Etapa I subsidiou a Etapa II, permitindo a definição dos objetivos deste estudo. Ademais, ao aprofundar sobre a relação dos métodos multicritérios com a EC, e tendo objetivo definido, foi possível, com base no levantamento teórico, definir o método MCDM para ser aplicado na problemática da pesquisa. Com isto, selecionou-se uma abordagem híbrida entre o modelo *Fuzzy AHP* e *Fuzzy TOPSIS* que são abordados detalhadamente na Seção 4. Esses modelos são bastante utilizados na seleção de materiais e apresentam fácil aplicação (Emovon; Oghenenyero, 2020). Outro aspecto relevante que fundamentou a escolha deste método híbrido diz respeito à sua natureza compensatória, a qual se mostra compatível com a complexidade do problema decisório proposto. Essa característica permite a identificação da resina PET que mais se aproxima da solução ideal sob a ótica da economia circular, considerando a compensação entre os critérios e subcritérios definidos, de modo a refletir de maneira equilibrada as múltiplas dimensões envolvidas na tomada de decisão. Almejou-se, com a aplicação dessa abordagem híbrida, auxiliar os decisores a escolherem produtos mais circulares desde a sua fase de síntese, de forma que isso viabilize impactos positivos ao longo de toda a cadeia desse produto.

Vale destacar, conforme presente na Seção 1.1, que o material escolhido para o estudo foram os polímeros, mas especificamente a etapa de síntese do monômero para a elaboração da resina PET, devido a importância deste produto para o setor econômico, ambiental e social. Conforme o trabalho de Mesa *et al.* (2020), os materiais poliméricos possuem características específicas que podem ser comparadas com base em indicadores e parâmetros. De acordo com os autores, os dados para mensuração desses parâmetros e indicadores são obtidos através da base de dados da CES Selector (Granta Design, 2017; Mesa *et al.*, 2020).

3.2 Etapa II - Conceitualização e Desenvolvimento

Na Etapa II concentrou-se no delineamento e na formulação do modelo híbrido MCDM. Essa etapa envolveu a seleção dos critérios de avaliação e das alternativas, com base em dados qualitativos e quantitativos, bem como na experiência de especialistas em EC e produção de resinas PET. O método híbrido combina técnicas *Fuzzy AHP* e *Fuzzy TOPSIS*, permitindo ponderar os critérios e determinar a proximidade das alternativas em relação às soluções ideais positiva e negativa. A aplicação do *Fuzzy AHP* nesta etapa garante uma avaliação robusta das prioridades entre os critérios, enquanto o *Fuzzy TOPSIS* calcula as pontuações de proximidade das rotas químicas, gerando um método que aborda a complexidade do problema com precisão e flexibilidade. Esta fase resulta no desenvolvimento de um modelo prático para a mensuração da circularidade das rotas químicas.

3.2.1 Etapa II.1: Seleção dos Critérios e Alternativas

A Etapa II, de desenvolvimento conceitual, tem por objetivo contemplar os aspectos relevantes para aplicação do método, selecionando os critérios relacionados com os aspectos da EC para se atingir o objetivo geral da pesquisa. Nesse contexto, na Etapa II.1, os critérios foram definidos com base na literatura que aborda sobre a utilização de método MCDM para a seleção de materiais feitos de polímeros. Ademais, os critérios selecionados consideram aspectos e indicadores relevantes para a EC mencionados no Capítulo 2 e que se ajustem com o contexto de elaboração de materiais feitos de resinas plásticas. E assim, construir uma abordagem multicritério para a seleção de materiais mais circulares pautados nos critérios levantados na literatura.

Essa sub-etapa foi fundamental para o levantamento dos dados dos polímeros e seleção dos especialistas que posteriormente participaram da avaliação do método híbrido multicritério utilizado para a elaboração do estudo. Como mencionado anteriormente, os dados quantitativos com relação aos indicadores dos polímeros foram obtidos na base de dados da literatura e do CES *Selector* (Granta Design, 2017; Mesa *et al.*, 2020). Já os especialistas do setor de polímeros foram selecionados para avaliar os critérios e auxiliar na definição de pesos para cada um deles, viabilizando uma análise ponderada, conforme determina abordagem híbrida presente na Seção 4.

A seleção dos especialistas foi realizada com base na disponibilidade de participação e no tempo de experiência no processo de produção no setor de polímeros ou com pesquisas relacionadas a economia circular e polímeros. Para a validação do método, foram considerados dois grupos distintos de especialistas, conforme descrito na Seção 1: um grupo diretamente envolvido na produção industrial da resina PET e outro com expertise em economia circular no contexto dos polímeros. Dessa forma, a composição do conjunto de decisores incluiu profissionais com experiência na etapa produtiva de polímeros, bem como pesquisadores com atuação consolidada na economia circular aplicada a esse setor.

Os especialistas foram mapeados por meio da busca e avaliação do currículo acadêmico de participantes em congressos relevantes da área e através da busca do perfil profissional na plataforma do *LinkedIn*, com a utilização de palavras-chaves que relacionassem com os perfis buscados à produção de resina PET e às principais indústrias produtoras de resina. Este período de busca ocorreu entre janeiro de 2024 a setembro de 2024, de maneira contínua. Por meio deste processo foram mapeados e convidados 50 especialistas para a participação na abordagem multicritério híbrida e avaliação das rotas químicas para a

produção da resina. Destes, 6 aceitaram participar, compondo os dois conjuntos de especialistas que foram submetidos ao instrumento de pesquisa para discussão e julgamento dos critérios e subcritérios propostos na abordagem. Após a seleção dos especialistas, foram realizadas 6 reuniões remotas individuais de aproximadamente 60 minutos cada para apresentar a abordagem adotada e os critérios e subcritérios definidos com base na literatura, os quais são detalhadamente discutidos no Capítulo 4. Além de compreenderem a estrutura metodológica, os decisores foram incentivados durante a reunião a revisar e, se necessário, ajustar os critérios propostos, incorporando sua experiência e expertise para assegurar a relevância e a adequação dos parâmetros ao contexto estudado. Posteriormente, os especialistas responderam aos formulários presentes nos Apêndices I e II para a composição da abordagem multicritério.

O primeiro conjunto agregou três especialistas formados em engenharia química, engenharia de materiais e tecnologia em polímeros com uma experiência média de 16 anos na indústria de produção de PET. Este conjunto contemplou os especialistas relacionados com a parte técnica do processo de produção da resina PET. Enquanto o outro conjunto, composto por três especialistas, relacionados diretamente com as pesquisas no setor de polímeros e a economia circular, possuem experiência média de 7 anos e formação em engenharia química, engenharia de materiais e engenharia ambiental.

A divisão em dois grupos com características específicas foi realizada para entender a nuance da aplicação das abordagens para decisores que entendem os cenários da produção da resina PET e da economia circular de maneiras distintas. Com o intuito de capturar as diferentes percepções tanto do contexto mais técnico da produção da resina PET quanto do contexto mais teórico, reduzindo as incertezas do processo de decisão com diferentes perspectivas. Nesse contexto, os dois conjuntos de especialistas, contribuíram para validar os critérios de mensuração das rotas de produção química da resina e as dimensões associadas à escolha do processo produtivo do PET. E na validação da metodologia aplicada por meio da aplicabilidade do modelo multicritério.

A quantidade de especialistas pautou-se nos estudos de Abdullah e Zulkifli (2015) e Ortiz-Barrios *et al.* (2017) que utilizaram abordagens multicritério híbridas em estudos de casos em problemas de gerenciamento de recursos humanos (Abdulla; Zulkifli, 2015) e na seleção de fornecedores de PEAD (Ortiz-Barrios *et al.*, 2017), e cujas pesquisas contaram respectivamente com 3 e 4 especialistas, sendo possível testar a aplicabilidade do modelo no problema de pesquisa proposto pelos autores. Assim, devido à complexidade e especificidade do tema abordado nesta pesquisa (auxiliar na escolha da melhor resina de PET por meio da

mensuração das rotas químicas com base nos conceitos da EC), considerou-se suficiente a quantidade de especialistas para testar a aplicabilidade do modelo híbrido para o cenário proposto.

3.2.2 Etapa II.2: Aplicabilidade do modelo híbrido *Fuzzy* AHP mensuração das rotas de produção

A Etapa II.2 consistiu em validar a aplicabilidade do método híbrido proposto, com a utilização de dados relevantes para a seleção das rotas químicas para a produção de resinas PET alinhadas com os aspectos da EC, focando em melhorar o design do produto e, consequentemente, seu ciclo de vida. Primeiramente, realizou-se uma extensa pesquisa documental e bibliográfica na literatura para o estudo e seleção dos eixos (critérios) e os temas (subcritérios) mais relevantes relacionados a mensuração das rotas químicas utilizadas como estudo de caso para a análise. Posteriormente, os critérios e subcritérios foram discutidos e definidos com o quadro de especialistas para que fossem avaliados pelos mesmos com os instrumentos de pesquisas descritos no Apêndice II e III no momento de aplicação do da abordagem híbrida conforme a etapa de *Fuzzy* AHP (FAHP) e *Fuzzy* TOPSIS (FTOPSIS). A utilização da lógica *fuzzy* foi adotada justamente para reduzir as incertezas de avaliação por meio da representação linguística de julgamentos subjetivos, permitindo capturar com maior precisão as percepções dos especialistas frente a aspectos complexos e muitas vezes ambíguos do processo decisório.

Assim, efetuados os procedimentos de seleção dos especialistas e definição dos critérios e subcritério, realizou-se as etapas da abordagem híbrida multicritério. A qual foi dividida em duas fases: a primeira fase focada na aplicação do método FAHP e a segunda focada no método FPTOSIS, esta última apresentada na Etapa III.1. O método FAHP foi responsável pelo refinamento dos critérios selecionados anteriormente com os especialistas e, consequentemente, a definição dos pesos para cada critério. Os pesos são fundamentais para os modelos de avaliação multicritério e abordagem *Fuzzy* contribui para a robustez do modelo, uma vez que considera as imprecisões das abordagens tradicionais (Karimi *et al.*, 2011).

3.3 Etapa III – Validação dos Resultados

Por fim, esta fase contemplou a validação, e buscou testar a aplicabilidade e robustez do modelo proposto. Os resultados obtidos pelo método híbrido foram analisados e validados em colaboração com especialistas. A validação ocorreu tanto pelo ponto de vista da EC

quanto pelo da produção de resinas PET, assegurando que o modelo possa refletir as reais necessidades da indústria e os aspectos da economia circular. Essa Etapa finaliza a integração do DT com a abordagem multicritério utilizada para a atingir o objetivo desta pesquisa.

3.3.1 Etapa III.1: Aplicabilidade do modelo híbrido *Fuzzy* TOPSIS para mensuração das rotas de produção e avaliação dos resultados

Posteriormente, com os pesos definidos no método FAHP na Etapa II.2, iniciou-se a aplicabilidade do método FTOPSIS. O FTOPSIS foi responsável por avaliar as alternativas de rotas químicas para a polimerização das resinas PET e perante a avaliação dos especialistas, determinar dentre os produtos avaliados, qual se enquadra melhor dentro dos aspectos da EC considerados no modelo. Essa avaliação contribui para que se alcance o último objetivo específico do estudo e assim, por meio da análise de ranqueamento proporcionada pela abordagem MCDM híbrida, determinar qual apresenta maior nível de circularidade com base nesses critérios e pode colaborar mais para o design do produto e seu posterior ciclo de vida. Maiores detalhes sobre a proposta de desenvolvimento do método utilizado para a mensuração das rotas conforme dados levantados e a opinião dos especialistas são apresentados no capítulo 4. O capítulo 5 elucida em profundidade todos os critérios e subcritérios definidos pela literatura e validados pelos especialistas. Essa etapa incluiu a interpretação dos resultados, permitindo identificar quais rotas químicas se alinham mais efetivamente aos critérios de circularidade. Assim, consolidou-se o modelo proposto, posicionando-o como uma ferramenta prática para orientar tomadas de decisão no setor de polímeros, considerando a transição para um modelo de economia circular.

3.3.2 Etapa III.2: Validação da escolha da resina PET por meio da abordagem híbrida com a indústria

Após o desenvolvimento e aplicabilidade do modelo com o conjunto de especialistas e avaliação das rotas de produção com base nos resultados da abordagem, buscou-se validar ainda os resultados da mensuração dos tipos diferentes de resinas com um representante da indústria de produção de resina PET. O representante convidado atua como gestor técnico de uma planta de produção de uma indústria que produz resina PET. Este especialista participou de uma entrevista semiestruturada com questões pertinentes (apresentadas na Seção 6.6) ao resultado das resinas avaliadas na abordagem MCDM. Ressalta-se que o representante não constitui como parte do conjunto de especialistas decisores, sendo configurado como uma

última etapa de validação da proposta apresentada e da resina selecionada com base na abordagem.

Dessa forma, a validação conduzida com o representante da indústria de produção de resina PET permitiu verificar a coerência e aplicabilidade dos resultados obtidos por meio da abordagem multicritério. Ao não integrar o conjunto original de especialistas decisores, esse interlocutor proporcionou uma avaliação independente, contribuindo para reforçar a robustez da análise e a aderência da resina selecionada às exigências do setor. Assegura-se, portanto, que a proposta apresentada refletisse critérios técnicos e circulares relevantes, e a viabilidade prática dentro do contexto industrial, fortalecendo a aplicabilidade do modelo desenvolvido.

Nesse contexto, a última etapa consolidou a aplicação da abordagem híbrida MCDM em conjunto com o DT, abrangendo desde a fase de motivação, conceitualização e desenvolvimento até a validação dos resultados. O processo, estruturado em seis sub-etapas, permitiu a conclusão do desenho metodológico, assegurando uma base sólida para a apresentação e a análise dos resultados obtidos.

4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO MULTICRITÉRIO HÍBRIDO

De acordo com Mardani *et al.* (2015) e Yadav (2021), quando existem alternativas finitas de materiais e os critérios decisivos também são finitos – mas de natureza concorrente – pesquisadores optam por utilizar procedimentos de tomadas de decisão utilizando métodos MCDM, dentre essas com destaque para a técnica híbrida AHP-TOPSIS. Para Ortiz-Barrios *et al.* (2017), selecionar um método adequado é considerado um desafio e a utilização de apenas uma técnica MCDM pode resultar em diferentes resultados, sendo recomendado o uso de dois métodos em uma abordagem híbrida para otimizar os resultados.

Com isto, já que o objetivo principal deste estudo é selecionar a resina de PET por meio da mensuração das rotas químicas com base nos aspectos circulares, foi utilizado um modelo integrado com as técnicas AHP e TOPSIS sob a lógica *fuzzy*. De acordo com Abdullah e Zulkifli (2015), o método FAHP tem sido utilizado com o objetivo de obter os pesos relativos dos critérios e classificá-los adequadamente. No entanto, os autores afirmam que os pesos relativos obtidos através da aplicação do *Fuzzy* AHP (FAHP) podem ser vistos como uma entrada potencial para outros métodos MCDM, permitindo uma integração entre os métodos e a sua aplicação em vários domínios de conhecimento.

Nesse contexto, o método FAHP foi utilizado para determinar os pesos de importância relativa de avaliação (Kaya; Kahraman, 2011; Abdullah; Zulkifli, 2015). E como complemento, o método *Fuzzy* TOPSIS (FTOPSIS) foi implementado para diminuir as lacunas de alternativas entre os valores reais de desempenho e alcançar os níveis de aspiração (Vinodh; Prasanna; Prakash, 2014) e assim avaliar o tipo de polímero mais circular com base nos critérios e pesos adotados. Com isto, o modelo de avaliação dos polímeros, presente na Figura 8, será constituído por duas fases. A primeira fase constituirá o método FAHP e apresentará os seguintes estágios:

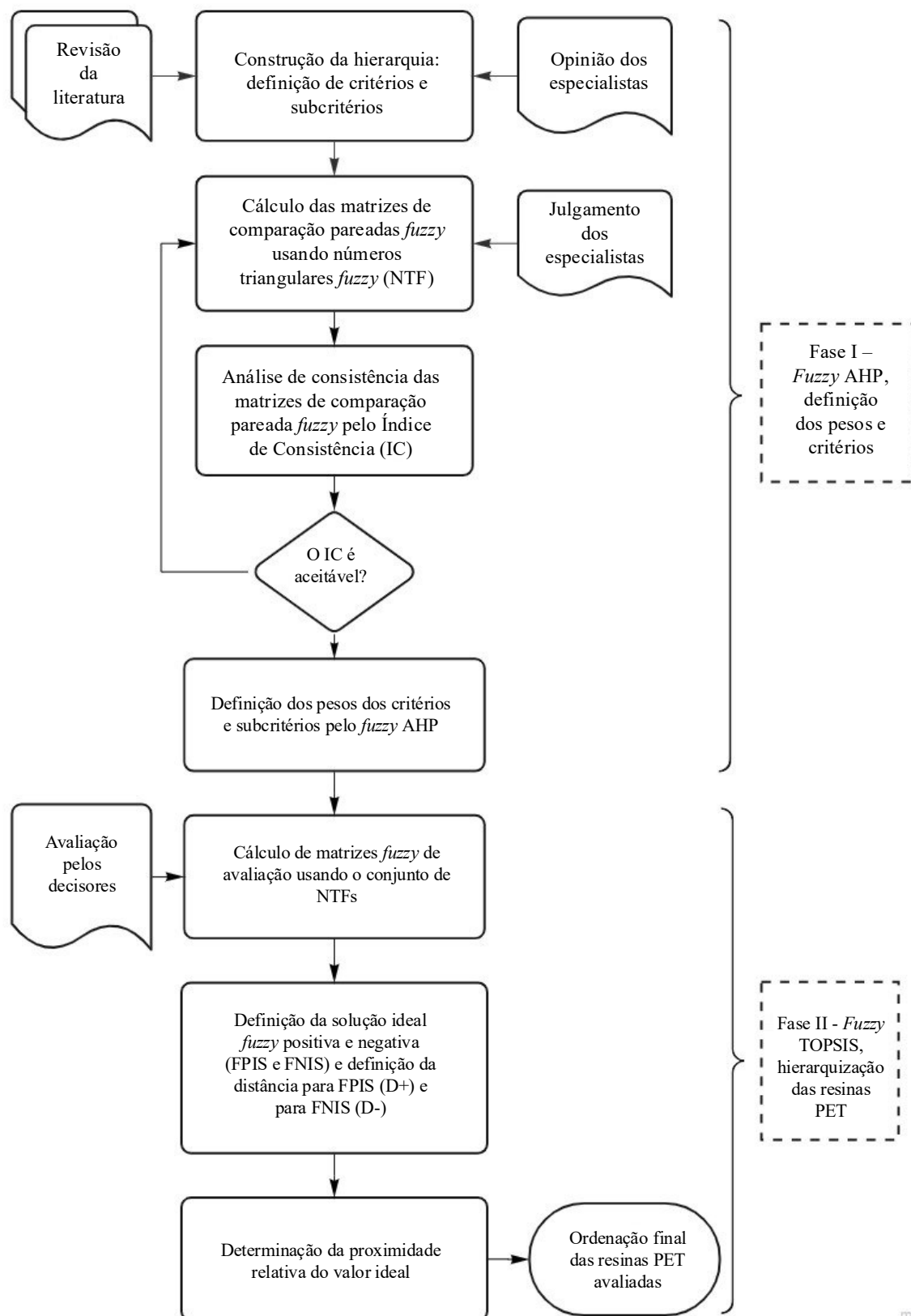
- Construção da hierarquia do método: definição dos critérios e subcritérios;
- Cálculo das matrizes de comparação pareadas *fuzzy*, usando os valores linguísticos – números *fuzzy* triangulares (Vinodh; Prasanna; Prakash, 2014);
- Análise de consistência das matrizes de comparação pareadas *fuzzy*;
- Obtenção dos pesos dos critérios e subcritérios do FAHP.

Com isto, após a avaliação dos pesos de cada critério e subcritério gerados na primeira fase, será dado o início a etapa dois: FTOPSIS. Esta fase consiste das seguintes etapas:

- Constituição das matrizes de avaliação das alternativas, agregando os valores linguísticos fornecidos pelos especialistas decisores;

- Definição da solução ideal positiva e negativa (FPIS e FNIS) e definição da distância para FPIS (D^+) e para FNIS (D^-);
- Determinação da proximidade relativa do valor ideal e definição do ranking a partir da ordenação decrescente dos valores obtidos por cada alternativa.

Figura 8 – Modelo *Fuzzy* AHP-TOPSIS para mensuração e avaliação dos polímeros conforme os aspectos da EC.



4.1 Conjunto e Lógica *Fuzzy*

A teoria dos conjuntos *fuzzy* (nebuloso, em português) e a lógica *fuzzy* foram elaboradas e aplicadas primeiramente por Zadeh (1963) para lidar com a imprecisão do julgamento humano. O conjunto *fuzzy* é considerado uma classe de objetos com um *continuum* de graus de pertinência. Tal conjunto é caracterizado por uma função de pertinência que atribui a cada objeto um grau de pertinência que varia entre zero e um (Zadeh, 1963).

O conjunto *fuzzy* é uma extensão do conjunto *crisp* (que representa valores reais). Os conjuntos e a lógica *fuzzy* são ferramentas matemáticas poderosas para modelagem com uma aplicação que abrange sistemas incertos na indústria, na natureza e na humanidade (Moayeri *et al.*, 2015). Essas aplicações se estenderam como ferramentas facilitadoras para o raciocínio de senso comum na tomada de decisões no cenário de ausência de informações completas e precisas (Moayeri *et al.*, 2015). Com isto, destacou-se sua atribuição a fenômenos complexos não facilmente descritos pelos métodos matemáticos tradicionais, principalmente se tratando de encontrar uma solução aproximada (Bojadziev; Bojadziev, 1996). Logo, a modelagem utilizando conjuntos *fuzzy* se mostra uma maneira efetiva de formular problemas de decisão em que a informação disponível é imprecisa e subjetiva.

A utilização dos conjuntos *fuzzy* para efetuar operações aritméticas são conhecidas como números *fuzzy*. Um conjunto *fuzzy* F atribui a cada elemento do universo um valor entre 0 e 1, que representa o grau de pertinência de um conceito impreciso ao conjunto *fuzzy*. Este valor de pertinência é definido pela Equação 1 (Zadeh, 1963).

$$F = \{(x, \mu(x)) | x \in U\} \quad (1)$$

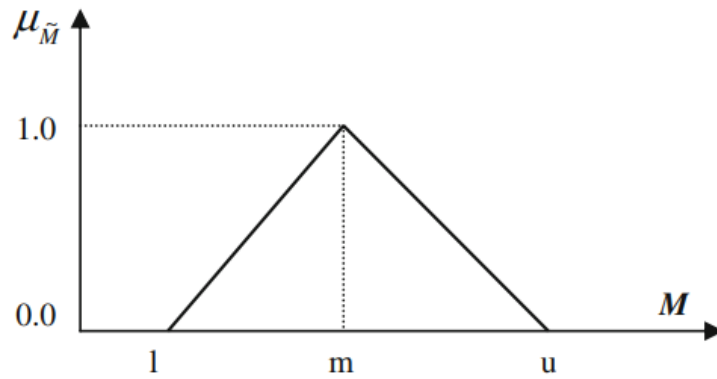
Os números *fuzzy* representam um conjunto *fuzzy* em que a função de pertinência satisfaz as seguintes premissas: (i) estar definido nos números reais; (ii) a função de pertinência $\mu(x)$ deve ser contínua; (iii) o conjunto *fuzzy* deve ser normalizado e; (iv) convexo. Para o desenvolvimento do modelo *fuzzy* AHP-TOPSIS, adotou-se como variável de quantificação e operações aritméticas o número *fuzzy* triangular (NTF). De acordo com Ertugrul e Karakasoglu (2008), é possível utilizar números *fuzzy* de diferentes formatos, sendo frequentemente utilizado nas aplicações o NTF devido sua simplicidade computacional. O NTF é útil para promover representação e processamento das informações em um ambiente complexo em que há imprecisões nas respostas.

Conforme Moayeri *et al.* (2015), os números triangulares *fuzzy* podem ser definidos como um trio (l, m, u) . Sendo assim, a função pertinência, $\mu_{\tilde{A}}(x)$, para esse trio é representada pela Equação 2:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < l \\ \frac{x-l}{m-l}, & \text{se } l \leq x < m \\ \frac{u-x}{u-m}, & \text{se } m \leq x \leq u \\ 0, & \text{se } x > u \end{cases} \quad (2)$$

Em que, os parâmetros l, m, u representam, respectivamente, o menor valor possível, o valor formal e mais promissor para o conjunto *fuzzy*, e o maior valor possível que descreve o número *fuzzy* (Moayeri *et al.*, 2015). Esses parâmetros são ilustrados na Figura 9.

Figura 9 – Representação gráfica do Número Triangular Fuzzy



Fonte: Moayeri *et al.* (2015).

Esses números permitem que sejam realizadas operações básicas entre conjuntos *fuzzy*. Assim, de acordo com Moayeri *et al.* (2015) e Almeida (2013), as Equações 3, 4, 5 e 6 representam as operações de adição, subtração, multiplicação e divisão entre dois números triangulares *fuzzy* $\tilde{A} = (l_1, m_1, u_1)$ e $\tilde{B} = (l_2, m_2, u_2)$. Na Equação 7 é exibido como se calcula o recíproco de um NTF $\tilde{A}$. Dado um número *crisp* real k , a multiplicação e a divisão por um NTF são demonstradas pela Equação 8 e Equação 9, respectivamente.

$$\tilde{A} + \tilde{B} = (l_1, m_1, u_1) + (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (3)$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = (l_1, m_1, u_1) - (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - u_2, m_1 - m_2, u_1 - l_2) \quad (4)$$

$$\tilde{A} * \tilde{B} = (l_1, m_1, u_1) * (l_2, m_2, u_2) = (l_1 * l_2, m_1 * m_2, u_1 * u_2) \quad (5)$$

$$\tilde{A} \div \tilde{B} = (l_1, m_1, u_1) \div (l_2, m_2, u_2) = \left(\frac{l_1}{u_2}, \frac{m_1}{m_2}, \frac{u_1}{l_2} \right) \quad (6)$$

$$\tilde{A}^{-1} = (l_1, m_1, u_1)^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1} \right) \quad (7)$$

$$k * \tilde{A} = (k * l_1, k * m_1, k * u_1) \quad (8)$$

$$\frac{\tilde{A}}{k} = \left(\frac{l_1}{k}, \frac{m_1}{k}, \frac{u_1}{k} \right) \quad (9)$$

4.2 Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são palavras ou frases em uma linguagem natural ou artificial (Zadeh, 1963). Como forma de ilustração, “idade” pode ser considerado uma variável linguística se os valores são assumidos como variáveis *fuzzy* rotuladas como “jovem”, “não jovem”, “muito jovem”, “não muito jovem”, por exemplo, em vez dos números 0, 1, 2, 3... (Ertugrul; Karakaşoglu, 2008).

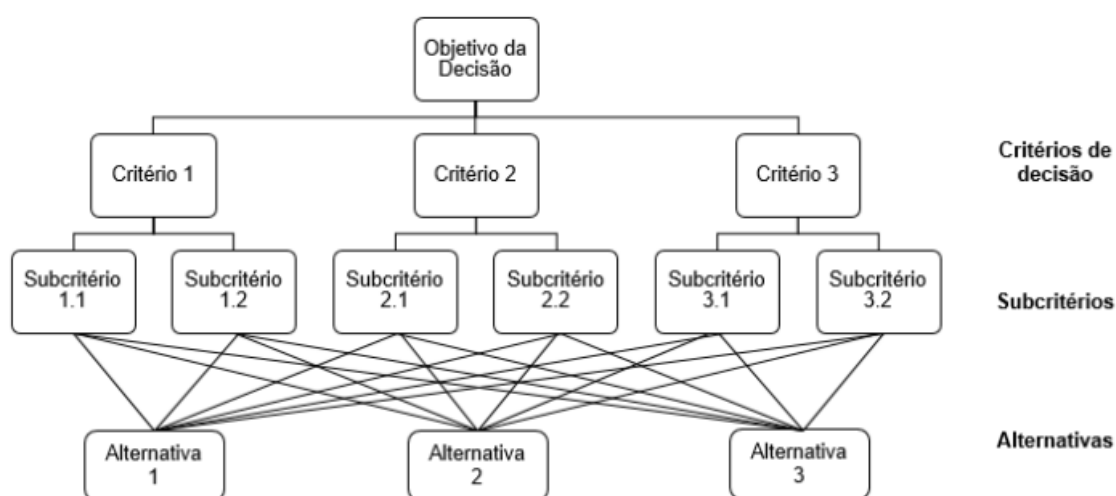
O conceito de variável linguística fornece um meio de caracterização aproximada de fenômenos que são muito complexos ou muito mal definidos para serem descritos em termos quantitativos convencionais (Ertugrul; Karakaşolu, 2008). Esses termos são comumente representados por números triangulares *fuzzy* e costumam ser utilizados nas abordagens MCDM devido lidar de maneira satisfatória com avaliações qualitativas e subjetivas.

4.3 Fuzzy AHP

O método AHP foi desenvolvido por Thomas Saaty na década de 1970. O AHP é um método compensatório que prioriza alternativas mediante a consideração de múltiplos critérios, voltado principalmente para situações que estes possuem natureza intuitiva, racional ou qualitativa (Saaty, 1980). O AHP usa uma comparação de pares para dividir o processo de tomada de decisão em vários níveis hierárquicos (Islam; Huda, 2020). Os pesos preferenciais em cada nível da hierarquia são obtidos das matrizes de comparação de pares anteriores. Essas etapas resultam em um ranking final de alternativas (Diaz-Balteiro; González-Pachón; Romero, 2017).

A Figura 10 apresenta a representação hierárquica do método AHP. No topo encontra-se o objetivo da decisão; logo abaixo, de uma perspectiva ampla, estão os critérios de decisão; passando para o nível intermediário, os critérios de decisão são decompostos em subcritérios (critérios dos quais elementos subsequentes dependem); por fim, o nível mais baixo é formado pelo conjunto de alternativas (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Figura 10 – Representação hierárquica de um problema de decisão AHP



Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

Os elementos da estrutura hierárquica são comparados em matrizes de comparação pareada. Para realizar as comparações, é utilizada uma escala numérica que indica quantas vezes um elemento é mais importante que o outro em um determinado critério. Originalmente utiliza-se a escala de 1 a 9 pontos, conforme presente no Quadro 5. Esta escala captura o julgamento dos especialistas e auxilia na definição dos pesos de cada par de fatores, no qual o valor 1 na escala demonstra que os atributos apresentam similar importância, enquanto o valor 9 indica que o primeiro atributo é absolutamente mais importante que o segundo (García-Bustamante *et al.*, 2018).

Quadro 5 – Escala de Saaty

Nível de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	Os dois atributos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente um atributo em relação ao outro
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um atributo em relação ao outro
7	Importância muito grande ou demonstrada	Um atributo é muito fortemente favorecido em relação ao outro; sua dominação de importância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece um atributo em relação ao outro com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre as duas definições

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

O método AHP é usado para resolver problemas de decisão complexos, determinando a importância relativa de um conjunto de atividades em um problema (Kazuva *et al.*, 2021). O método AHP decompõe um problema de decisão multicritério complexo em uma série de decisões interrelacionadas. No entanto, o modelo em seu estado puro apresenta deficiências. Isto acontece devido o AHP ser utilizado em aplicações que lidam com problemas de decisão com informações parcialmente nítidas e que pode resultar em escalas de julgamento desequilibradas, e desta forma não levar em consideração a incerteza associada ao processo (Kaya; Kahraman, 2011). Esse fator pode resultar em inconsistência na avaliação entre pares, resultando em um desafio para o AHP. A inconsistência ocorre quando as comparações entre pares não são logicamente coerentes, o que pode levar a resultados imprecisos e questionáveis. Para lidar com isso, é importante verificar o grau de consistência da matriz de preferências (Siekelova; Podhorska; Imppola, 2021).

Assim, para superar esses problemas, vários pesquisadores (Vinodh; Prasanna; Prakash, 2014; Sun, 2010; Karimi *et al.*, 2011; Chatterjee; Stevic, 2019) integraram a teoria *fuzzy* com o AHP para incorporar o tratamento da incerteza ao método. Para Ekuobase e Olutayo (2015), os decisores sentem maior confiança ao fazer julgamentos dentro de um intervalo de valores pautados em números *fuzzy*, ao invés de valores numéricos individuais. Desta forma, o método FAHP é capaz de capturar a subjetividade da avaliação do julgador de maneira mais completa que o método AHP comum. O método FAHP é pautado na aritmética

de intervalo *fuzzy* com números *fuzzy* triangulares e índice de confiança com abordagem de média de intervalo para determinar os pesos para elementos avaliativos (Chen; Chen, 2010).

Esta pesquisa utilizou números triangulares *fuzzy* (NTF) para a avaliação, associados ao método FAHP de média geométrica desenvolvido por Buckley (1985) e adaptado por Vinodh, Prasanna e Prakash (2014). Buckley (1985) adotou o método de média geométrica para derivar os pesos *fuzzy* e os valores de desempenho na escala de avaliação do método AHP. Este método é utilizado devido sua facilidade de aplicação ao caso de lógica *fuzzy*, na obtenção dos pesos e garante uma solução única ou um conjunto de opções viáveis à matriz de comparação.

De acordo com Vinodh, Prasanna e Prakash (2014), a utilização de NTF para a construção da matriz de comparação par a par e para o cálculo dos pesos é intuitivo para os tomadores de decisão, se mostrando uma maneira eficaz de formular os problemas complexos de decisão em que a informação é subjetiva e imprecisa. Nesse contexto, por definição, o número *fuzzy* triangular (1, 1, 1) será aplicado quando dois critérios são considerados igualmente importantes (nível de importância igual a 1 na escala de Saaty). Para representar os demais níveis de importância como um número *fuzzy* triangular (a_1, a_2, a_3), contabilizam-se todos os julgamentos em cada comparação pareada e realizam-se operações aritméticas simples para definir os pontos mínimo (a_1), intermediário (a_2) e máximo (a_3). Assim, a partir do julgamento dos especialistas, montam-se as matrizes de comparação pareada de critérios e subcritérios, conforme determina o método AHP. E a partir dessas matrizes, cria-se uma matriz de avaliação *fuzzy*, onde os valores dos critérios e subcritérios comparados são tabelados com base nas entradas NTF.

Como forma de exemplificação, seguindo o método FAHP aplicado por Vinodh, Prasanna e Prakash (2014) e Martins (2017), a Figura 11 apresenta um exemplo de matriz de comparação.

Figura 11 – Matriz de comparação genérica

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{array}
 \begin{bmatrix}
 & \begin{array}{c} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{array} \\
 \begin{array}{c} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{array}
 \end{bmatrix}
 \begin{array}{c}
 C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 (1, 1, 1) \\
 (1/a_{3[1,2]}, 1/a_{2[1,2]}, 1/a_{1[1,2]}) \\
 \vdots \\
 (1/a_{3[1,n]}, 1/a_{2[1,n]}, 1/a_{1[1,n]})
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 C_2 \\ \vdots \\ C_n
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 (a_{1[1,2]}, a_{2[1,2]}, a_{3[1,2]}) \cdot \cdot \cdot (a_{1[1,n]}, a_{2[1,n]}, a_{3[1,n]}) \\
 (1, 1, 1) \\
 \vdots \\
 (1/a_{3[2,n]}, 1/a_{2[2,n]}, 1/a_{1[2,n]})
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 (1, 1, 1) \\
 \vdots \\
 (1, 1, 1)
 \end{array}
 \end{array}$$

Nota-se neste exemplo presente na Figura 11 que o critério C_1 é preferível ao critério C_2 , atribuindo-se o valor *fuzzy* $a_{[1,2]} = (a_1, a_2, a_3)$ correspondente ao grau de importância do primeiro critério sobre o segundo na posição (1,2) da matriz, sendo assim, na posição (2,1) aloca-se o inverso do número *fuzzy*. Esse valor inverso pode ser calculado conforme a Equação 10:

$$a_{[2,1]} = (a_{[1,2]})^{-1} = \left(\frac{1}{a_3}, \frac{1}{a_2}, \frac{1}{a_1} \right) \quad (10)$$

Um benefício deste método é que as consistências das matrizes podem ser testadas, como no método clássico AHP. De acordo com Patil e Kant (2014), quando a comparação da matriz *crisp* (valores reais fixos) A é consistente, significa que a matriz de comparação *fuzzy* $\tilde{A}$ também é consistente. Desta forma utiliza-se a análise de consistência, conforme o método AHP, que pode ser expresso da seguinte forma, conforme as Equações 11 e 12:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (11)$$

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (12)$$

A Razão de Consistência (RC), Equação 11, é adotada para estimar a consistência das comparações pareadas, quando $RC \leq 0,10$ a consistência dos valores para as comparações é aceita. Quando esse valor se enquadra acima, é necessário revisar a matriz de comparação. Na Equação 12, $\lambda_{\max}$ é o maior autovalor e n o tamanho da matriz. O Índice Randômico (IR) é um valor tabelado de consistência aleatório, mostrado na Tabela 7 (Diaz-Balteiro; González-Pachón; Romero, 2017).

Tabela 7 – Valores do Índice Randômico de acordo com o tamanho n da matriz

Tamanho n	1	2	3	4	5	6	7	8
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40

Para obter os pesos dos critérios e subcritérios FAHP, utiliza-se o método da média geométrica desenvolvido por Buckley (1985), conforme já mencionado anteriormente. Dada a matriz de comparação *fuzzy* $\tilde{A}$, o cálculo dos pesos para cada linha se dá conforme a Equação 13 descrita a seguir:

$$\tilde{a}_i = \left(\prod_{j=1}^3 \tilde{a}_{ij} \right)^{1/3} = (\tilde{a}_{i1} \times \tilde{a}_{i2} \times \tilde{a}_{i3})^{1/3} \quad (13)$$

$$\tilde{w}_j = \frac{\tilde{a}_i}{\sum_{i=1}^3 \tilde{a}_i} \quad (14)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n] \quad (15)$$

O vetor $\tilde{W}$ representa o resultado do cálculo de pesos, logo, contém o peso de cada critério. A obtenção dos pesos finaliza a etapa que aborda o método FAHP e subsidia o início da próxima, pautada no método FTOPSIS.

4.4 Fuzzy TOPSIS

O método TOPSIS foi proposto inicialmente por Hwang e Yoon (1981). O método baseia-se na escolha da alternativa que apresenta a menor distância da solução ideal positiva e a maior distância da solução negativa. A solução positiva ideal é aquela que maximiza os critérios de benefício e minimiza os critérios onerosos; enquanto a solução negativa proporciona a relação oposta, maximizando os critérios de custo e minimizando os de benefício (Karimi *et al.*, 2011). De acordo com Karimi *et al.* (2011) e Ertugrul e Karakasoglu (2008), no método clássico do TOPSIS os pesos dos critérios e as classificações das alternativas são conhecidas precisamente e os valores *crisp* são usados no processo de avaliação. Contudo, sob várias condições, os dados de valor *crisp* são inadequados para modelar problemas de decisão reais. Nesse contexto, propõe-se o método FTOPSIS, no qual o peso dos critérios e classificações das alternativas são mensurados por variáveis linguísticas representadas por números *fuzzy* para lidar com a carência do método tradicional.

Chen (2000) é considerado o primeiro autor a propor modificações na técnica TOPSIS e desenvolver um método que utilizasse o ambiente *fuzzy*. As principais adaptações podem ser destacadas em: (i) as pontuações dos tomadores de decisão e os pesos dos critérios podem ser expressos por valores linguísticos; (ii) a matriz de decisão é composta por números *fuzzy* triangulares, definidos no intervalo $[0,1]$, ao invés de considerar os números *crisp* citados anteriormente; (iii) o algoritmo original do TOPSIS é mantido, embora os operadores utilizados para o cálculo sejam adaptados para lidar com os números *fuzzy*; (iv) a solução ideal positiva *fuzzy* A^+ (FPIS A^+) em relação a cada critério é definida como $\tilde{v}_j^+ = (1,1,1)$.

De maneira análoga, a solução negativa ideal *fuzzy* A^- (FNIS A^-) é definida como $\tilde{v}_j^- = (0,0,0)$. Chen (2000) definiu um método chamado *vertex* para medir a distância entre as soluções *fuzzy* (D_i^+ e D_i^-), um procedimento semelhante ao método de distância euclidiana, comumente utilizado no método TOPSIS tradicional.

Assim, seguindo o método FTOPSIS elaborado por Chen (2000) e adaptado por Almeida (2013), Vinodh, Prasanna e Prakash (2014) e Martins (2017), o algoritmo para o cálculo desta técnica considerará as seguintes etapas:

- 1) Os valores linguísticos fornecidos pelos tomadores de decisão/especialistas (DM_r) devem ser agregados. Para agregar as pontuações das alternativas utiliza-se a Equação 16. Esta equação determina $\tilde{x}_{ij}^k$ que descreve as pontuações da alternativa $A_i (i = 1, \dots, n)$, em relação ao critério $C_j (j = 1, \dots, m)$, dado pelo tomador de decisão $DM_r (r = 1, \dots, k)$. A Equação 17 é utilizada para agregar as avaliações dos pesos dos critérios $\tilde{w}_j^k$, estabelecidos no método FAHP, onde o $\tilde{w}_j^k$ descreve o peso do critério, dado pelo tomador de decisão k ;

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{k} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^2 + \dots + \tilde{x}_{ij}^k] \quad (16)$$

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{k} [\tilde{w}_j^1 + \tilde{w}_j^2 + \dots + \tilde{w}_j^k] \quad (17)$$

- 2) Devem ser montadas uma matriz de decisões *fuzzy* $\tilde{D}$ para as pontuações das alternativas e um vetor *fuzzy* $\tilde{W}$ para o peso dos critérios utilizando, respectivamente, as Equações 18 e 19.

$$\tilde{D} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1j} & \dots & \tilde{x}_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \dots & \tilde{x}_{ij} & \dots & \tilde{x}_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \dots & \tilde{x}_{nj} & \dots & \tilde{x}_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (18)$$

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_m] \quad (19)$$

Em que $\tilde{x}_{ij}, \forall i, j$ e $\tilde{w}_j, j = 1, 2, \dots, m$ são variáveis linguísticas. Estas variáveis linguísticas podem ser descritas pelos NTF, $\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ e $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$;

- 3) A matriz $\tilde{D}$ deve ser normalizada usando a escala de transformação linear, para transformar a escala de vários critérios em uma escala comparável. A matriz normalizada $\tilde{R}$ é dada pela Equação 20, sendo $\tilde{r}_{ij}$ obtido por meio das Equações 21 e 22. Destaca-se ainda que a Equação 21 é aplicada para quando o cálculo de $\tilde{r}_{ij}$ for de maximização e a Equação 22 é aplicada quando o critério for de minimização;

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (20)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right) \quad (21)$$

Sendo $u_j^+ = \max_i u_{ij}$ (critérios de benefício do método);

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right) \quad (22)$$

Sendo $l_j^- = \min_i l_{ij}$ (critérios de custo);

- 4) Obter a matriz normalizada e ponderada $\tilde{V}$, mostrada a Equação 23, por meio da multiplicação dos pesos $\tilde{w}_j$ pelos elementos $\tilde{r}_{ij}$ da matriz normalizada conforme a Equação 24;

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad (23)$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} * \tilde{w}_j \quad (24)$$

- 5) Definir a FPIS A^+ e a FNIS A^- de acordo com as Equações 25 e 26, em que $\tilde{v}_j^+ = (1, 1, 1)$ e $\tilde{v}_j^- = (0, 0, 0)$;

$$A^+ = \{\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_j^+, \dots, \tilde{v}_m^+\} \quad (25)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_j^-, \dots, \tilde{v}_m^-\} \quad (26)$$

- 6) Utilizando a Equação 27, deve-se calcular a distância D_i^+ entre os valores de FPIS e as pontuações das alternativas da matriz $\tilde{V}$. Da mesma forma, calcular a distância D_i^- entre os valores de FNIS e as pontuações das alternativas utilizando a Equação 28. Nas Equações 27 e 28, $d(\cdot, \cdot)$ representa a distância entre dois números *fuzzy* de acordo com o método *vertex*, que no caso de NTF, pode ser obtido por meio do método para cálculo de distância $d(\tilde{A}, \tilde{B})$ entre dois números *fuzzy* A e B , conforme a Equação 29. Esse cálculo de distância $d(\tilde{A}, \tilde{B})$ tem por objetivo mensurar valores de distância *crisp* para os números difusos (Abbasbandy; Hajjighasemi, 2010);

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (27)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (28)$$

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(l_A - l_B)^2 + (m_A - m_B)^2 + (u_A - u_B)^2]} \quad (29)$$

- 7) Calcular o coeficiente de aproximação CC_i para cada uma das alternativas avaliadas, de acordo com a Equação 30. Esse coeficiente de aproximação determina a proximidade do valor ideal com base na definição das distâncias estabelecidas anteriormente.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (30)$$

- 8) E por último, define-se um ranking a partir da ordenação crescente dos valores CC_i . O coeficiente de aproximação é um valor *crisp* entre 0 e 1. Em que, o

desempenho global da rota química para a produção de resina PET avaliada será melhor quanto mais próximo de 1 for o valor CC_i .

Com isto, a aplicação da abordagem híbrida F-AHP e F-TOPSIS permite a construção de uma ferramenta capaz de lidar com a complexidade multicritério inerente ao processo de seleção de polímeros para a elaboração de produtos plásticos. Isto ocorre justamente devido ao fato de o coeficiente de aproximação atuar no ranqueamento das rotas químicas de elaboração da resina de PET, em que o maior valor obtido vai determinar o tipo de rota mais adequado com a EC, atingindo o objetivo proposto pelo método.

Portanto, o uso do modelo híbrido tem por intuito estabelecer uma relação dos critérios pautados na EC e seus indicadores para a seleção dos materiais, promovendo uma avaliação disruptiva no processo de design dos produtos e com potencial para impactar diretamente em todas as demais etapas posteriores. Visto que uma transformação no processo de design dos produtos com a escolha dos materiais que convergem com os preceitos do modelo econômico circular pode traduzir em vantagens econômicas e ambientais ao longo de todo o seu processo produtivo, reduzindo impactos e promovendo a criação de sistemas fechados.

Dito isto, a aplicação da abordagem híbrida visa auxiliar na escolha da resina por meio da mensuração das rotas químicas dos processos de produção do PET, divididos em DMT e TPA, conforme mencionado na Seção 2.2. Essas rotas de processamento demandam quantidades de energia, água e de matérias primas diferentes e se avaliados sob a perspectiva da Economia Circular podem apresentar resultados que demonstrem a circularidade desses processos e do PET gerado a partir dos mesmos. Portanto, a avaliação foi pautada em critérios que envolvem medidas mencionadas nos aspectos e indicadores da EC vistos na Figura 7, que apresenta o mapa conceitual da relação da EC com os métodos MCDM.

Esses critérios serão referentes ao uso eficiente dos recursos e valor de recuperação do PET. Tais critérios estão diretamente relacionados com indicadores ambientais presentes na literatura como consumo de água, consumo energético e percentual de PET recuperado (Alkaya; Demirer, 2015). Esses critérios foram aprimorados através da análise dos julgadores e complementados com base na experiência deles no processo de produção de PET.

Ressalta-se que a EC preconiza o uso eficiente dos recursos, de forma a mitigar perdas sistêmicas e externalidades. Logo, a aplicação de uma abordagem MCDM que tenha sob o foco de decisão critérios relevantes para o conceito da EC, viabiliza que os decisores, especialistas em polímeros, avaliem as rotas químicas que se alinhem a estes conceitos de maneira objetiva e complexa, por apresentar um ordenamento e se pautar em vários fatores.

Além disso, o conceito e os princípios da EC habilitam a criação de novos modelos de negócios e de produtos mais úteis e circulares, capazes de reduzir os impactos associados com consumo de recursos, trazendo benefícios ao longo de toda a sua cadeia. Desta forma, a aplicação da EC na elaboração de PET pode ser vista como uma abordagem interessante frente ao modelo econômico linear atual, capaz de colaborar para a produção de plásticos em consonância com os preceitos que envolvem a circularidade dos recursos e mitigação de impactos.

4.5 Definição dos critérios de decisão

Com base nos aspectos discutidos para a síntese da resina PET e do conceito de economia circular, esta seção delimita os critérios utilizados pelos julgadores para fomentar a seleção de resinas PET que se alinhem com os conceitos da EC. Esses critérios foram extraídos da literatura, balizados com os dois conjuntos de especialistas decisores e foram fundamentais para a utilização dos modelos *fuzzy* AHP e *fuzzy* TOPSIS na aplicabilidade proposta. A abordagem híbrida foi responsável por auxiliar os decisores a elencar quais destes critérios se alinham com a economia circular e são preponderantes para a formação das resinas PET mais circulares. Nota-se, assim, que os critérios adotados contribuem para a avaliação das resinas sob a perspectiva circular, se consolidando, portanto, como uma ferramenta passível de ser utilizada como ponto de seleção de matérias circulares com base nos critérios considerados desde o seu processo de produção.

Nesse sentido, para compor essa avaliação, os critérios devem consolidar aspectos que comparem as diferentes rotas de produção química das resinas de PET com base em aspectos econômicos, ambientais e técnicos que estão diretamente atrelados com a economia circular e ao processo de produção da resina em questão. Nesse contexto, com base na literatura abordada (sobretudo Gracida-Alvarez *et al.*, 2023; Nistico, 2020; Alkaya; Demirer, 2015), identificou-se os seguintes critérios:

- i. Critérios relativos ao desempenho econômico: são utilizados para mensurar as características da produção da resina PET com base na aquisição de matéria-prima e no custo por kg de resina;
- ii. Critérios relativos ao desempenho ambiental: são utilizados para avaliar a síntese das resinas sob a perspectiva ambiental atrelada a economia circular;
- iii. Critérios de desempenho técnico: são utilizados para abordar as características físico-químicas das resinas que influenciam diretamente nos demais aspectos de desempenho econômico e ambiental para corroborar com a análise da abordagem multicritério.

Com isto, foram elencados, na Tabela 8, os seguintes critérios e subcritérios para cada eixo apresentado anteriormente:

Tabela 8 – Critérios de decisão para escolha de resinas mais circulares			
Critérios para Seleção da Resina			
Subcritérios	Econômico	Ambiental	Técnico
	Custo de produção da Resina (C ₁)	Água Consumida (C ₅)	Tipo de Matéria-prima utilizada (C ₉)
	Quantidade de matéria-prima por kg de resina PET produzida (C ₂)	Energia Consumida (C ₆)	Densidade (C ₁₀)
	Custo da matéria-prima (C ₃)	Resíduos gerados (C ₇)	Temperatura Polimerização (C ₁₁)
	Rendimento (C ₄)	Reciclabilidade (taxa de reciclagem) (C ₈)	Viscosidade intrínseca (C ₁₂)

Assim, para a seleção da resina com base nos três eixos que dialogam com os aspectos da economia circular foram elencados 12 subcritérios, dispostos no método de hierarquização do *Fuzzy AHP*. Por meio da abordagem FAHP foram avaliados os pesos dos critérios para a escolha do processo de elaboração da resina que se alinha com a EC. Estes foram selecionados com base na literatura, e foram reavaliados pelos especialistas no processo de resposta da metodologia. Ressalta-se, que na primeira parte, a qual consiste na aplicação do FAHP, as avaliações foram feitas por meio das matrizes de comparações pareadas.

Para avaliar a importância dos critérios e subcritério, foi definida a escala comparativa mostrada na Tabela 9. Dessa forma, avaliou-se o quanto cada critério e subcritério para seleção da resina sob a premissa da EC é relevante se comparado aos demais. Para isso, as siglas de valores linguísticos (“I”, “M”, “F”, “MF”, “A”, “1/I”, “1/M”, “1/F”, “1/MF”, “1/A”) foram utilizadas para preencher a tabela de avaliação dos pesos.

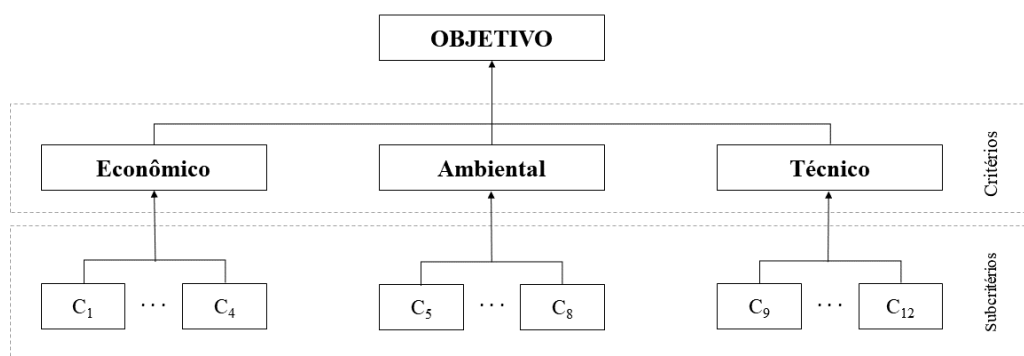
Tabela 9 – Variáveis linguísticas para aplicação do método FAHP	
Variáveis Linguísticas	Valor <i>fuzzy</i>
Igualmente importante (I)	(1, 1, 3)
Moderadamente mais importante (M)	(1, 3, 5)
Fortemente mais importante (F)	(3, 5, 7)
Muito fortemente mais importante (MF)	(5, 7, 9)
Absolutamente mais importante (A)	(7, 9, 9)

Essa avaliação foi feita sob o seguinte raciocínio: “com base na sua percepção como especialista, o critério custo de produção da resina (C₁) é moderadamente mais importante que o critério quantidade de resina produzida (C₂), quando se escolhe a rota de produção com base

nos aspectos da economia circular”, utiliza-se a letra “M”. Se o inverso for válido, em que, se o C_2 for moderadamente mais importante que C_1 , entende-se a avaliação como “1/M”.

Os critérios e subcritérios foram organizados na seguinte hierarquia, presente na Figura 12. Essa hierarquia foi construída para nortear a elaboração da matriz de comparação pareada, etapa que fomenta o desenvolvimento do método FAHP.

Figura 12 – Estrutura hierárquica do modelo para avaliação e seleção da rota circular para a elaboração de resina de PET



4.5.1 Descrição dos Subcritérios

Nesta etapa foram descritos todos os subcritérios que compõem a ferramenta híbrida para mensuração do desempenho das rotas de polimerização das resinas de PET que foi submetida aos especialistas de produção de polímeros para a mensuração da abordagem e aos especialistas em circularidade de polímeros para a validação do método. Todos os critérios foram definidos com base na unidade funcional de um kg de resina PET ou kg de resina PET por garrafa produzida (Gracida-Alvarez *et al.* 2023), de forma a auxiliar os decisores no momento de avaliar e atribuir as notas para a aplicação da abordagem multicritério híbrida. Os dados de referência dos critérios foram garimpados na literatura e em programas de seleção de materiais poliméricos, sendo os mesmos validados pelos especialistas durante a abordagem híbrida. Desta forma, obteve-se uma robustez para a aplicabilidade, configurando um estudo de caso das resinas propostas para avaliação.

Assim, os subcritérios referentes ao eixo Econômico foram definidos da seguinte maneira:

- **Custo de Produção da Resina (C1):** Constitui-se num subcritério quantitativo para comparar o custo de produção de 1kg de resina PET para as diferentes rotas químicas descritas no estudo. Este parâmetro pode ser influenciado por fatores

como preço do petróleo ou da fonte secundária (no caso da rota de reciclagem), demanda dos fornecedores e custos da planta de produção (Krishnan; Kulkarni, 2008). A unidade para avaliação deste subcritério é $\text{R}\$. \text{kg}^{-1}$ de resina PET.

- Quantidade de matéria-prima por kg de resina PET produzida (C2): Este critério visa mensurar o desempenho econômico da quantidade de matéria-prima utilizada por rota química para a produção da resina PET, visto que o tipo de material escolhido como base infere na quantidade a ser investida para a produção de 1kg de resina (Franklin Associates, 2020). Nota-se que a literatura indica que a produção da rota de TPA produz uma quantidade cerca de 15 vezes maior com a mesma quantidade de EG se comparado ao DMT (Krishnan; Kulkarni 2008). A rota de produção de EG com biomassa produz a quantidade de matéria-prima similar dependendo se será misturada com TPA ou DMT, no entanto, depende do etanol para que seja produzida, impactando na quantidade a ser produzida (Pang *et al.* 2016).
- Custo da matéria-prima (C3): Este subcritério corresponde ao custo unitário da matéria-prima a qual alimenta a rota química de produção de 1kg de resina PET, sendo avaliado sob a unidade de $\text{R}\$. \text{kg}^{-1}$ de matéria-prima. As rotas de TPA e DMT oriundas de combustível fóssil apresentam o custo relacionado diretamente com o valor do petróleo para a extração do MEG, contudo a rota TPA exige uma menor quantidade de MEG, resultando em menores custos de matéria-prima (Krishnan; Kulkarni, 2008). Enquanto a rota por biomassa para a produção de EG depende do custo do etanol e da instalação de uma planta de produção de etanol, o que onera o preço de produção se comparado às duas outras rotas tradicionais (Pang *et al.* 2016).
- Rendimento (C4): Este subcritério corresponde ao rendimento da matéria-prima a qual alimenta a rota química de produção de 1kg de resina PET com base no valor investido para a aquisição dela. Considerando os dados da literatura, o rendimento para a produção da resina com base na rota selecionada pode ser considerado alto, visto que elas desempenham a solidez necessária para estabelecer a produção comercial da resina PET (Nistico, 2020).

Quanto ao eixo de critérios Ambientais, os subcritérios de água consumida, energia consumida, resíduos gerados e reciclabilidade podem ser descritos da seguinte forma, respectivamente:

- Água consumida (C5): Um dos efeitos secundários mais notáveis nos processos de produção de polímeros se reflete no consumo dos recursos naturais, como as fontes hídricas e energéticas (Gracida-Alvarez *et al.*, 2023). Para a mensuração deste indicador, considera-se o consumo de água utilizado para a produção da resina PET em L.kg^{-1} de garrafa PET, sendo utilizado os dados presentes no estudo de Benavides *et al.* (2018) e Gracida-Alvares *et al.* (2023) para a consolidação do indicador.
- Energia consumida (C6): Tal qual ao consumo de água, os processos de produção de resina PET são intensivos quanto ao uso de energia (Gracida-Alvares *et al.*, 2023). Este indicador pode ser mensurado como MJ.kg^{-1} PET produzido, em que se considera o processo de produção da resina PET. Utilizou-se conforme o indicador anterior, os dados de Benavides *et al.* (2018) e Gracida-Alvares *et al.* (2023) para a coleta.
- Resíduos Gerados (C7): Os processos de produção da resina PET por concepção geram resíduos sólidos, configurando como um dos impactos associados a este tipo de material (ABIPLAST, 2023). Para a configuração deste indicador, utilizou-se como base de dados da Franklin Associates (2020) para se estimar a quantidade de resíduos em kg para cada 1kg de garrafa PET produzida com as resinas e suas rotas escolhidas para avaliação.
- Reciclabilidade (C8): Este indicador visa mensurar a taxa de reciclabilidade da resina PET com base na rota química escolhida para fomentar sua produção. A reinserção dos produtos PET para a elaboração de resinas circulares contribui para a implementação da circularidade no processo de produção deste tipo de material. Essa taxa de reciclabilidade foi avaliada quanto ao rendimento dos principais métodos de reciclagem de PET para recuperação a dos principais elementos (TPA, DMT e EG) (Siddiqui, Redhwi, Achilias, 2012; Damayanti, Wu, 2021) que consolidam a produção de novas resinas a partir da reinserção desses produtos pela reinserção dos resíduos no processo.

Quanto ao eixo de critérios Técnicos, os subcritérios de matéria-prima utilizada, densidade da resina, temperatura da polimerização e viscosidade intrínseca podem ser descritos da seguinte forma, respectivamente:

- Matéria-prima utilizada (C9): O tipo de matéria-prima implica nas características técnicas na produção da resina PET, sendo um critério relevante para a avaliação dos tipos de rotas químicas (Pang *et al.*, 2016). Os diferentes tipos de matéria-

prima utilizadas nas rotas químicas conduzem os aspectos da resina, em que o tipo de insumo utilizado pode alinhar a produção de PET com o modelo circular econômico.

- Densidade da resina PET (C10): A densidade da resina é uma das características importantes para a produção de polímeros do tipo PET, uma vez que o mesmo precisa apresentar uma massa específica de $1,36 \text{ g.cm}^{-3}$. Nota-se, ainda, que as rotas químicas produzem resinas com diferentes densidades, que implicam nos aspectos técnicos como espaço para armazenamento (Nistico, 2020).
- Temperatura de Polimerização (C11): Assim como o critério de densidade, a temperatura de polimerização para a produção resina é um aspecto técnico relevante para o processo de elaboração de PET e está diretamente atrelado ao consumo energético. Esse critério é mensurado em °C e pode ser avaliado conforme os dados disponíveis no banco de dados do *CES Selector* (Granta Design, 2017).
- Viscosidade intrínseca da resina PET (C12): A viscosidade intrínseca é importante para a produção da resina PET. Uma vez que o maior nível de viscosidade atrelado a produção de garrafas PET permite que a resina desse polímero seja aplicada para outras finalidades como a elaboração de fibras têxteis que exigem uma viscosidade intrínseca menor (Noronha, 2004). Logo, o grau técnico para a obtenção da resina na densidade correta implica nos aspectos de produção, sendo relevante para a as rotas químicas de produção da resina. Os dados com relação a este indicador foram coletados em Xiao, Zheng e Pang (2015) que realizou um estudo comparativo das propriedades técnicas de diferentes rotas químicas, dentre elas as rotas presentes nesta pesquisa.

Em síntese, o Quadro 6 apresenta os eixos e subcritérios utilizados para a mensuração das rotas de produção das resinas PET, acompanhados de uma descrição de cada um, facilitando a compreensão das variáveis analisadas.

Quadro 6 – Eixos e critérios para a mensuração das resinas PET

Crítérios	ID Crítério	Subcritérios	Descrição
Econômico	C1	Custo de produção da Resina	Comparação do custo de produção de 1 kg de resina PET para diferentes rotas químicas (R\$.kg ⁻¹)
	C2	Quantidade Resina Produzida	Mensuração da quantidade de matéria-prima utilizada por rota química para produção de 1 kg de PET
	C3	Custo Matéria-prima	Custo unitário da matéria-prima utilizada nas rotas químicas para produzir 1 kg de resina PET (R\$.kg ⁻¹)
	C4	Rendimento	Avaliação do rendimento da matéria-prima com base no valor investido na produção de 1 kg de PET
Ambiental	C5	Água Consumida	Consumo de água necessário para produzir 1 kg de PET (L.kg ⁻¹ PET)
	C6	Energia Consumida	Energia consumida na produção de 1 kg de PET (MJ.kg ⁻¹ PET)
Ambiental	C7	Resíduos Gerados	Quantidade de resíduos sólidos gerados na produção de 1 kg de garrafa PET (kg)
	C8	Reciclabilidade	Taxa de reciclabilidade da resina PET com base na rota química escolhida
Técnico	C9	Matéria-prima utilizada	Tipo de matéria-prima utilizada e seus impactos técnicos na produção de resina PET
	C10	Densidade	Densidade da resina PET, importante para aspectos técnicos como armazenamento (g.cm ⁻³)
	C11	Temperatura de Polimerização	Temperatura de polimerização, que afeta diretamente o consumo energético no processo (°C)
	C12	Viscosidade Intrínseca	Viscosidade intrínseca da resina, essencial para a produção de garrafas e outros produtos

4.5.2 Coleta de dados referentes aos critérios

Nesta seção, apresentam-se os dados quantitativos obtidos na literatura e em programas de seleção de materiais que caracterizam o desempenho técnico, econômico e ambiental das rotas químicas de produção de PET elencadas no trabalho. Esses dados quantitativos referem-se aos seguintes critérios: custo de produção da resina (C₁), custo da matéria-prima (C₃), rendimento (C₄), água consumida (C₅), energia consumida (C₆), resíduos gerados (C₇), reciclabilidade (C₈), matéria-prima utilizada (C₉), densidade (C₁₀), temperatura de fusão (C₁₁), e viscosidade intrínseca (C₁₂).

Os subcritérios referentes ao eixo Econômico com valores quantitativos definidos e descritos anteriormente são ilustrados na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 – Dados quantitativos para os Subcritérios do Eixo Econômico

Rota de Produção	Custo de produção da Resina (R\$.kg ⁻¹) (C1)	Custo Matéria-prima (R\$.kg ⁻¹) (C3)	Rendimento (C4)
TPA	5,86	3,64	ALTO
DMT	7,03	4,36	ALTO
Etileno Glicol por Biomassa	10,08	6,06	ALTO

Os subcritérios referentes ao eixo Ambiental com valores quantitativos definidos e descritos anteriormente são ilustrados na Tabela 11 a seguir:

Tabela 11 – Dados quantitativos para os Subcritérios do Eixo Ambiental

Rota de Produção	Água consumida (L.kg ⁻¹) (C5)	Energia Consumida (MJ.kg ⁻¹) (C6)	Resíduos Gerados (kg) (C7)	Reciclabilidade (C8)
TPA	0,3	3,12	0,096	0,77
DMT	0,4	4,61	0,106	0,95
Etileno Glicol por Biomassa	0,8	3,90	0,135	0,85

Enquanto com relação aos subcritérios referentes ao eixo Técnico com valores quantitativos definidos com base na literatura e descritos anteriormente são ilustrados na Tabela 12:

Tabela 12 – Dados quantitativos para os Subcritérios do Eixo Técnico

Rota de Produção	Matéria-prima utilizada (C9)	Densidade (g.cm ⁻³) (C10)	Temperatura de Fusão (°C) (C11)	Viscosidade intrínseca (C12)
TPA	1,21	1,52	250,0	0,66
DMT	1,33	1,20	190,0	0,65
Etileno Glicol por Biomassa	1,70	1,11	247,1	0,47

Quanto ao subcritério C2, em que não foi possível definir os atributos quantitativos com base na literatura, adotou-se uma escala *Likert* de cinco pontos, visando obter a opinião dos especialistas em produção de polímeros quanto ao desempenho das principais características elencadas com relação ao modelo circular econômico. Esses níveis de aderência do desempenho dos critérios com a EC foram distribuídos na escala *Likert* da

seguinte forma: 1 – muito baixo; 2 – baixo; 3 – moderado; 4 – alto; 5 – muito alto. Foi objeto dessa consulta o subcritério referente a quantidade de resina produzida por tipo de rota química. Assim, ao incorporar a escala *Likert*, foi possível capturar a percepção dos especialistas sobre o desempenho do subcritério C2 em relação à EC, oferecendo uma visão qualitativa essencial para a avaliação das diferentes rotas químicas. A seguir, no próximo tópico, serão discutidos os resultados obtidos com a aplicação da abordagem híbrida FAHP e FTOPSIS, que integra esses dados qualitativos e quantitativos, proporcionando uma análise mais robusta e fundamentada na tomada de decisão.

5. RESULTADOS DA APLICABILIDADE DO MODELO

O Capítulo 5 tem por objetivo demonstrar a aplicabilidade do modelo híbrido de decisão multicritério FAHP e FTOPSIS para o contexto de mensuração de rotas químicas para a produção de resinas PET. O modelo é dividido em duas partes para capturar e discutir de forma segmentada a visão dos seis especialistas, descritos anteriormente, que colaboraram com a utilização do método multicritério. Primeiramente, o método híbrido abordou diretamente a opinião dos especialistas oriundos do ambiente industrial que atuam em detalhe com a produção técnica das resinas para a produção de PET. Complementarmente, o modelo capturou a opinião de especialistas que atuam com a circularidade de polímeros, seja na elaboração de resinas ou com a pesquisa.

Essa divisão na utilização do método multicritério com o painel de especialistas ocorreu no intuito de demonstrar a aplicabilidade deste tipo de ferramenta para abordar critérios alinhados com a economia circular no processo de comparação de rotas químicas para a produção de PET. Assim, ter uma visão mais robusta que a proporcionada por um único indicador como o custo de produção e que exija uma complexidade menor que uma avaliação de ciclo de vida. Dessa forma, em um primeiro momento os especialistas foram orientados para que entendessem integralmente os eixos de critérios analisados, como eles se relacionavam com o conceito da EC e funcionalidade deles nas rotas químicas para a seleção das resinas a base de TPA, DMT e Etileno Glicol obtido por biomassa. Assim, a mensuração das rotas químicas para a produção da resina a partir do método ocorreu de forma consistente e em consonância com o objetivo proposto na hierarquia do problema de decisão descrito no Capítulo 5. Posteriormente, buscou-se validar o ordenamento das resinas com base na mensuração realizada com o representante da indústria de produção de resina de PET, finalizando o desenho metodológico, e estabelecendo os resultados apresentados e discutidos no Capítulo 6.

5.1 Utilização do método FAHP com os técnicos especialistas em resina

Inicialmente, realizou-se a Fase I do modelo FAHP aos especialistas técnicos para que fossem obtidas as matrizes de comparações pareadas *fuzzy* utilizando o NTF, conforme o nível de hierarquia de critério e subcritérios descrito anteriormente. As matrizes *fuzzy* com as comparações par a par para os eixos de critério econômico, ambiental e técnico aplicadas aos especialistas técnicos são apresentadas nas Tabelas 13, 14 e 15, respectivamente.

Tabela 13 – Matriz de comparação *fuzzy* para os critérios conforme o especialista técnico 1

Crítérios	Econômico	Ambiental	Técnico
Econômico	(1, 1, 1)	(5, 7, 9)	(1, 1, 3)
Ambiental	(0.11, 0.14, 0.2)	(1, 1, 1)	(0.11, 0.11, 0.14)
Técnico	(0.33, 1, 1)	(7, 9, 9)	(1, 1, 1)

Tabela 14 – Matriz de comparação *fuzzy* para os critérios conforme o especialista técnico 2

Crítérios	Econômico	Ambiental	Técnico
Econômico	(1, 1, 1)	(5, 7, 9)	(1, 1, 3)
Ambiental	(0.11, 0.14, 0.2)	(1, 1, 1)	(0.11, 0.14, 0.2)
Técnico	(0.33, 1, 1)	(5, 7, 9)	(1, 1, 1)

Tabela 15 – Matriz de comparação *fuzzy* para os critérios conforme o especialista técnico 3

Crítérios	Econômico	Ambiental	Técnico
Econômico	(1, 1, 1)	(7, 9, 9)	(1, 1, 3)
Ambiental	(0.11, 0.11, 0.14)	(1, 1, 1)	(0.11, 0.11, 0.14)
Técnico	(0.33, 1, 1)	(7, 9, 9)	(1, 1, 1)

Posteriormente, são apresentadas as matrizes de comparação par a par para os subcritérios referentes aos eixos de critério econômico, ambiental e técnico para cada especialista técnico consultado, respectivamente, nas Tabelas 16, 17 e 18 para o eixo econômico. Nas Tabelas 19, 20 e 21 para o eixo ambiental. E para o eixo técnico nas Tabelas 22, 23 e 24.

Tabela 16 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista técnico 1

Subcritérios - Eixo Econômico	Custo de produção da Resina	Quantidade Resina Produzida	Custo Matéria-prima	Rendimento
Custo de produção da Resina	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Quantidade Resina Produzida	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)
Custo Matéria-prima	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Rendimento	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)

A Tabela 16 demonstra que o especialista técnico 1, ao realizar a comparação pareada para os subcritérios do eixo econômico, atribuiu uma maior preferência para o subcritério de “custo de produção da resina” em detrimento aos outros subcritérios, sendo respectivamente moderadamente mais importante e fortemente mais importante.

Tabela 17 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista técnico 2

Subcritérios - Eixo Econômico	Custo de produção da Resina	Quantidade Resina Produzida	Custo Matéria-prima	Rendimento
Custo de produção da Resina	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(7, 9, 9)	(7, 9, 9)
Quantidade Resina Produzida	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
Custo Matéria-prima	(0,11, 0,11, 0,14)	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Rendimento	(0,11, 0,11, 0,14)	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)

A Tabela 17 evidencia que o especialista técnico 2, ao realizar a comparação pareada dos subcritérios pertencentes ao eixo econômico, assim como o especialista técnico 1, atribuiu maior preferência ao subcritério “custo de produção da resina” em relação aos demais. De forma complementar, a Tabela 18, que apresenta as avaliações par a par realizadas pelo especialista técnico 3, também destaca a centralidade do subcritério “custo de produção da resina”, especialmente em comparação com o subcritério “quantidade de resina produzida”.

Tabela 18 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista técnico 3

Subcritérios - Eixo Econômico	Custo de produção da Resina	Quantidade Resina Produzida	Custo Matéria-prima	Rendimento
Custo de produção da Resina	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 3)
Quantidade Resina Produzida	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 1)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 3)
Custo Matéria-prima	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Rendimento	(0,33, 1, 1)	(0,33, 1, 1)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)

As avaliações atribuídas indicaram, respectivamente, que esse subcritério foi considerado como moderadamente mais importante pelos especialistas técnico 1 e 3, e extremamente mais importante pelo especialista técnico 2, evidenciando uma convergência na percepção da relevância do custo como fator decisivo. Tal alinhamento reforça a importância da dimensão econômica na tomada de decisão sobre rotas produtivas mais circulares no contexto da síntese de resinas PET.

Com relação ao eixo ambiental, os especialistas técnicos atribuíram maior importância para os subcritérios “água consumida” e “energia consumida” em detrimento dos demais. Conforme a Tabela 19, o especialista técnico 1 considerou a “água consumida” de igual importância com relação ao subcritério “energia consumida”. Já com relação aos subcritérios

“resíduos gerados” e “reciclabilidade”, o especialista técnico 1 apontou como mais importante para a escala de relevância.

Tabela 19 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista técnico 1.

Subcritérios - Eixo Ambiental	Água Consumida	Energia Consumida	Resíduos Gerados	Reciclabilidade
Água Consumida	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Energia Consumida	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Resíduos Gerados	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,11, 0,14, 0,2)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Reciclabilidade	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)

O especialista técnico 2, conforme apresentado na Tabela 20, considerou a “água consumida” moderadamente mais importante com relação ao subcritério “energia consumida”. Já com relação aos subcritérios “resíduos gerados” e “reciclabilidade”, o especialista técnico 2 apontou como extremamente mais importante com relação ao subcritério “água consumida” e fortemente mais importante com relação ao subcritério “energia consumida”.

Tabela 20 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista técnico 2

Subcritérios - Eixo Ambiental	Água Consumida	Energia Consumida	Resíduos Gerados	Reciclabilidade
Água Consumida	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(7, 9, 9)	(7, 9, 9)
Energia Consumida	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(5, 7, 9)	(5, 7, 9)
Resíduos Gerados	(0,11, 0,11, 0,14)	(0,11, 0,14, 0,2)	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)
Reciclabilidade	(0,11, 0,11, 0,14)	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)

O especialista técnico 3, conforme apresentado na Tabela 21, considerou a “água consumida” de igual importância com relação ao subcritério “energia consumida”. Este especialista destacou a “água consumida” como mais importante que “resíduos gerados” e moderadamente mais importante que “reciclabilidade”. Enquanto “energia consumida”, para o especialista técnico 3 é considerado como mais importante com relação a “resíduos gerados” e “reciclabilidade”.

Tabela 21 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista técnico 3

Subcritérios - Eixo Ambiental	Água Consumida	Energia Consumida	Resíduos Gerados	Reciclabilidade
Água Consumida	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)
Energia Consumida	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)
Resíduos Gerados	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)
Reciclabilidade	(0,2, 0,33, 1)	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)

Com relação ao eixo técnico, os especialistas técnicos atribuíram maior importância para os subcritérios “matéria-prima utilizada” e “densidade” da resina PET avaliada em detrimento dos demais subcritérios componentes do eixo. Por conseguinte, a Tabela 22 ilustrou que o especialista técnico 1 entendeu a importância relativa do subcritério “matéria-prima utilizada” como moderadamente mais importante que “densidade” e mais importante que “temperatura de polimerização” e “viscosidade intrínseca”.

Tabela 22 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista técnico 1

Subcritérios - Eixo Técnico	Matéria-prima utilizada	Densidade	Temperatura de Polimerização	Viscosidade Intrínseca
Matéria-prima utilizada	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)
Densidade	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
Temperatura de Polimerização	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)
Viscosidade Intrínseca	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,2, 0,33, 1)	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)

Tabela 23 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista técnico 2

Subcritérios - Eixo Técnico	Matéria-prima utilizada	Densidade	Temperatura de Polimerização	Viscosidade Intrínseca
Matéria-prima utilizada	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(7, 9, 9)	(7, 9, 9)
Densidade	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)
Temperatura de Polimerização	(0,11, 0,11, 0,14)	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 1)	(0,2, 0,33, 1)
Viscosidade Intrínseca	(0,11, 0,11, 0,14)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)

Já na Tabela 23 notou-se que o especialista técnico 2 considerou o subcritério de “matéria-prima utilizada” como moderadamente mais importante que “densidade” e fortemente mais importante que os subcritérios “temperatura de polimerização” e “viscosidade intrínseca”. Enquanto apontou “densidade” como sendo mais importante que

“temperatura de polimerização” e moderadamente mais importante que “viscosidade intrínseca”.

O especialista técnico 3, conforme apresentado na Tabela 24, considerou o subcritério de “matéria-prima utilizada” como moderadamente mais importante que “densidade” e que “temperatura de polimerização”, mas apontou como sendo de igual importância com relação à “viscosidade intrínseca”. Este especialista considerou ainda “densidade” como sendo de igual importância que “temperatura de polimerização” e “viscosidade intrínseca”.

Tabela 24 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista técnico 3

Subcritérios - Eixo Técnico	Matéria-prima utilizada	Densidade	Temperatura de Polimerização	Viscosidade Intrínseca
Matéria-prima utilizada	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(1, 1, 3)
Densidade	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)	(1, 1, 3)
Temperatura de Polimerização	(0,2, 0,33, 1)	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)
Viscosidade Intrínseca	(0,33, 1, 1)	(0,33, 1, 1)	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)

Para garantir que as comparações feitas pelos decisores fossem consideradas consistentes, utilizou-se a Equação 12 responsável por identificar o IC das matrizes de comparação coletadas com os decisores. Conforme descrito por Patil e Kant (2014) quando a comparação da matriz *crisp* (valores reais fixos) A é consistente, significa que a matriz de comparação *fuzzy* $\tilde{A}$ também é consistente. Nesse contexto, os decisores foram acompanhados para que caso houvesse alguma inconsistência ($RC \leq 0,10$) nos julgamentos, fosse feita rapidamente uma reavaliação e alinhamento com os objetivos do problema de decisão proposto, com o intuito de manter todas as matrizes consistentes.

Posteriormente, agregou-se os valores de decisão dos especialistas técnicos para os critérios econômico, ambiental e técnico presente na Tabela 25, e para os subcritérios referente aos critérios anteriores nas Tabelas 26, 27 e 28, respectivamente.

Tabela 25 – Matriz de comparação *fuzzy* integrada para os critérios conforme os decisores especialistas técnicos

Critérios	Econômico	Ambiental	Técnico
Econômico	(1, 1, 1)	(5,67, 7,67, 9)	(1, 1, 3)
Ambiental	(0,11, 0,13, 0,18)	(1, 1, 1)	(0,11, 0,12, 0,16)
Técnico	(0,33, 1, 1)	(6,33, 8,33, 9)	(1, 1, 1)

Tabela 26 – Matriz de comparação *fuzzy* integrada para os subcritérios do eixo econômico conforme os decisores especialistas técnicos

Subcritérios - Eixo Econômico	Custo de produção da Resina	Quantidade Resina Produzida	Custo Matéria-prima	Rendimento
Custo de produção da Resina	(1, 1, 1)	(1,67, 3,67, 5,67)	(4,07, 5,44, 6,33)	(4,33, 5,67, 7)
Quantidade Resina Produzida	(0,18, 0,29, 0,78)	(1, 1, 1)	(1,4, 2,78, 4,33)	(3, 4,33, 6,33)
Custo Matéria-prima	(0,41, 1,08, 1,78)	(0,45, 1,18, 2,11)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Rendimento	(0,19, 0,42, 0,45)	(0,2, 0,45, 0,51)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)

Tabela 27 – Matriz de comparação *fuzzy* integrada para os subcritérios do eixo ambiental conforme os decisores especialistas técnicos

Subcritérios - Eixo Ambiental	Água Consumida	Energia Consumida	Resíduos Gerados	Reciclabilidade
Água Consumida	(1, 1, 1)	(1, 1,67, 3,67)	(5, 7, 8,33)	(4,33, 6,33, 7,67)
Energia Consumida	(0,29, 0,78, 1)	(1, 1, 1)	(4,33, 6,33, 8,33)	(4,33, 6,33, 8,33)
Resíduos Gerados	(0,12, 0,15, 0,23)	(0,12, 0,16, 0,24)	(1, 1, 1)	(1, 1,67, 3,67)
Reciclabilidade	(0,14, 0,2, 0,45)	(0,12, 0,16, 0,24)	(0,29, 0,78, 1)	(1, 1, 1)

Tabela 28 – Matriz de comparação *fuzzy* integrada para os subcritérios do eixo técnico conforme os decisores especialistas técnicos

Subcritérios - Eixo Técnico	Matéria-prima utilizada	Densidade	Temperatura de Polimerização	Viscosidade Intrínseca
Matéria-prima utilizada	(1, 1, 1)	(1,67, 3,67, 5,67)	(3,67, 5,67, 7)	(3,67, 5, 6,33)
Densidade	(0,18, 0,29, 0,78)	(1, 1, 1)	(1,67, 3, 5)	(1, 2,33, 4,33)
Temperatura de Polimerização	(0,15, 0,21, 0,49)	(0,23, 0,51, 0,78)	(1, 1, 1)	(0,73, 0,78, 2,33)
Viscosidade Intrínseca	(0,2, 0,44, 0,49)	(0,24, 0,56, 1)	(0,56, 1,67, 2,33)	(1, 1, 1)

Sequencialmente, calculou-se os pesos pelo método da média geométrica, explicitado no Capítulo 4. Para isto, utilizou-se a biblioteca *pyDecision* (Pereira; Basilio; Santos, 2024), implementada no *Python*. Os resultados desta etapa são apresentados nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 29 – Peso dos critérios estabelecido pelo método *Fuzzy AHP* para os especialistas técnicos

Critérios	Peso dos Critérios pelo Método FAHP		
	a_1	a_2	a_3
Econômico	0,331	0,464	0,912
Ambiental	0,043	0,059	0,093
Técnico	0,237	0,477	0,632

Tabela 30 – Peso dos subcritérios estabelecido pelo método *Fuzzy* AHP para os especialistas técnicos

Critérios			Peso dos Critérios pelo Método FAHP		
Critérios		Subcritérios	a_1	a_2	a_3
Econômico	C1	Custo de produção da Resina	0,262	0,500	0,945
	C2	Quantidade Resina Produzida	0,105	0,209	0,510
	C3	Custo Matéria-prima	0,074	0,214	0,494
	C4	Rendimento	0,033	0,077	0,164
Ambiental	C5	Água Consumida	0,268	0,478	0,911
	C6	Energia Consumida	0,190	0,385	0,672
	C7	Resíduos Gerados	0,043	0,073	0,156
	C8	Reciclabilidade	0,033	0,065	0,133
Técnico	C9	Matéria-prima utilizada	0,272	0,558	1,070
	C10	Densidade	0,092	0,208	0,545
	C11	Temperatura de Polimerização	0,050	0,094	0,261
	C12	Viscosidade Intrínseca	0,051	0,140	0,278

Com isso, conclui-se a aplicação do método FAHP, por meio do qual foram definidos os pesos correspondentes às avaliações dos especialistas técnicos, conforme estabelecido na delimitação do escopo da aplicação do modelo multicritério híbrido. Os pesos obtidos sob a lógica *fuzzy* foram, então, incorporados na etapa subsequente da metodologia, sendo utilizados como parâmetros de entrada na aplicação da abordagem FTOPSIS, conforme detalhado no próximo subtópico.

5.2 Utilização do método FTOPSIS com os especialistas técnicos em resina

A partir do resultado dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão $\tilde{D}$ para o julgamento dos especialistas técnicos, conforme ilustrado na Tabela 31.

Tabela 31 – Matriz de decisão *fuzzy* das resinas de PET com relação aos subcritérios de cada eixo

$\tilde{D}$		TPA			DMT			Etileno Glicol por Biomassa		
		a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
Eixo Econômico	C1	0,533	0,700	0,833	0,233	0,450	0,633	0,583	0,800	0,933
	C2	0,450	0,650	0,800	0,367	0,583	0,800	0,300	0,500	0,750
	C3	0,750	0,900	1,000	0,233	0,433	0,667	0,000	0,100	0,300
	C4	0,267	0,450	0,650	0,433	0,667	0,850	0,667	0,850	0,967
Eixo Ambiental	C5	0,450	0,650	0,800	0,300	0,500	0,750	0,167	0,317	0,500
	C6	0,433	0,667	0,850	0,167	0,367	0,583	0,300	0,517	0,717
	C7	0,500	0,750	0,900	0,367	0,583	0,800	0,233	0,450	0,633
	C8	0,167	0,367	0,583	0,533	0,700	0,833	0,433	0,667	0,850
Eixo Técnico	C9	0,367	0,583	0,800	0,450	0,633	0,833	0,750	0,900	1,000
	C10	0,417	0,583	0,733	0,300	0,517	0,717	0,367	0,600	0,767
	C11	0,067	0,233	0,433	0,433	0,667	0,850	0,067	0,233	0,433
	C12	0,583	0,800	0,933	0,583	0,800	0,933	0,100	0,300	0,500

Como parte da aplicação da abordagem FTOPSIS, multiplicou-se os pesos dos critérios presentes na Tabela 29 com o peso dos subcritérios ilustrados na Tabela 30, compondo, portanto, a Tabela 32.

Tabela 32 – Peso total dos subcritérios oriundos do método *fuzzy* AHP

$\tilde{W}$	Peso total dos subcritérios		
	a_1	a_2	a_3
C1	0,0867	0,2320	0,8618
C2	0,0348	0,0970	0,4651
C3	0,0245	0,0993	0,4505
C4	0,0109	0,0357	0,1496
C5	0,0115	0,0282	0,0847
C6	0,0082	0,0227	0,0625
C7	0,0018	0,0043	0,0145
C8	0,0014	0,0038	0,0124
C9	0,0645	0,2662	0,6762
C10	0,0218	0,0992	0,3444
C11	0,0119	0,0448	0,1650
C12	0,0121	0,0668	0,1757

Tendo todos os dados dos processos anteriores em mãos, foi feita a normalização e ponderação da matriz de avaliação aplicada aos decisores especialistas técnicos presente na Tabela 31. Esse passo ocorre segundo as equações 20 e 23, e assim, obteve-se a matriz normalizada e ponderada $\tilde{V}$, presente na Tabela 33. Com isso, a matriz de decisão foi configurada para que fossem calculadas as distâncias positivas e negativas que determinarão a proximidade relativa do valor ideal para uma resina que considera os critérios da EC e permite uma avaliação mais robusta sob uma ótica inovadora.

Tabela 33 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método FAHP

$\tilde{V}$		TPA			DMT			Etileno Glicol por Biomassa		
		a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
Eixo Econômico	C1	0,050	0,174	0,769	0,022	0,112	0,585	0,054	0,199	0,862
	C2	0,020	0,079	0,465	0,016	0,071	0,465	0,013	0,061	0,436
	C3	0,018	0,089	0,451	0,006	0,043	0,300	0,000	0,010	0,135
	C4	0,004	0,021	0,150	0,003	0,014	0,092	0,003	0,011	0,060
Eixo Ambiental	C5	0,006	0,023	0,085	0,004	0,018	0,079	0,002	0,011	0,053
	C6	0,004	0,018	0,063	0,002	0,010	0,043	0,003	0,014	0,053
	C7	0,001	0,004	0,015	0,001	0,003	0,013	0,000	0,002	0,010
	C8	0,000	0,002	0,009	0,001	0,003	0,012	0,001	0,003	0,012
Eixo Técnico	C9	0,024	0,155	0,541	0,029	0,169	0,564	0,048	0,240	0,676
	C10	0,012	0,075	0,329	0,009	0,067	0,322	0,010	0,078	0,344
	C11	0,002	0,013	0,165	0,001	0,004	0,025	0,002	0,013	0,165
	C12	0,008	0,057	0,176	0,008	0,057	0,176	0,001	0,021	0,094

Para a determinação da solução ideal *fuzzy* positiva e negativa (FPIS A^+ e a FNIS A^-) utilizou-se a matriz presente na Tabela 33. Desta forma, com os valores padronizados e calibrados com base na lógica *fuzzy*, foram determinadas as distâncias entre esses dados e as soluções que podem ser consideradas ideais *fuzzy* positiva e negativa, que são os valores máximos e mínimos de cada subcritério respectivamente. A partir disso, foram determinadas as matrizes de distância D_i^+ e D_i^- com relação as soluções ideais positivas e negativas, conforme demonstrado nas equações 27 e 28, respectivamente. Os resultados para as distâncias são exibidos na Tabela 34.

Tabela 34 – Matriz de distância positiva e negativa para os especialistas técnicos

Critérios	Subcritérios	Resinas					
		Distância positiva			Distância negativa		
		TPA	DMT	EG por Biomassa	TPA	DMT	EG por Biomassa
Eixo Econômico	C1	0,617	0,670	0,603	0,441	0,329	0,496
	C2	0,340	0,345	0,351	0,264	0,263	0,246
	C3	0,325	0,359	0,407	0,265	0,175	0,078
	C4	0,112	0,120	0,127	0,085	0,052	0,033
Eixo Ambiental	C5	0,058	0,061	0,066	0,049	0,045	0,030
	C6	0,042	0,048	0,045	0,036	0,024	0,030
	C7	0,010	0,010	0,011	0,008	0,007	0,006
	C8	0,010	0,009	0,009	0,005	0,007	0,007
Eixo Técnico	C9	0,488	0,479	0,442	0,308	0,323	0,397
	C10	0,247	0,252	0,247	0,189	0,184	0,198
	C11	0,129	0,155	0,129	0,095	0,014	0,095
	C12	0,119	0,119	0,142	0,106	0,106	0,055

Obtida as distâncias totais positivas e negativas, determinou-se a proximidade relativa à solução ideal, denominado como coeficiente de proximidade (CC_i). De acordo com o CC_i , a ordem de classificação das rotas químicas pautadas nos critérios de circularidade sob a óptica dos técnicos especialistas é determinada. A primeira alternativa foi determinada como a rota química mais apropriada para produzir resinas alinhadas com a EC, no que tange a mitigar os impactos de produção e manter o nível técnico e econômico em larga escala conforme preconiza um modelo econômico. O valor para este parâmetro e o ordenamento final para as alternativas abordadas é apresentado na Tabela 35.

Tabela 35 – Determinação de D_i^+ e D_i^- e CC_i e a ordem das alternativas conforme os especialistas técnicos

Rota química	D_i^+	D_i^-	CC_i	Ordenamento
TPA	2,50	1,85	0,43	1
DMT	2,63	1,53	0,37	3
EG por Biomassa	2,58	1,67	0,39	2

Com isto, finaliza-se a utilização da abordagem híbrida com os técnicos especialistas em resina para a aplicabilidade da mensuração das rotas químicas. Posteriormente, a abordagem híbrida foi adotada com os especialistas que atuam com a circularidade de

polímeros, a fim de se estabelecer uma comparação de diferentes pontos de vistas e fomentar a viabilidade da aplicação do modelo para a mensuração da circularidade e definição de pesos dos critérios para a seleção de rotas químicas para a produção de resinas PET.

5.3 Utilização do método FAHP com os especialistas em circularidade

Adotou-se a Fase I do modelo FAHP aos especialistas em circularidade para que fossem obtidas as matrizes de comparações pareadas *fuzzy* utilizando o NTF, conforme o nível de hierarquia de critério e subcritérios descrito anteriormente. As matrizes *fuzzy* com as comparações par a par para os eixos de critério econômico, ambiental e técnico aplicadas aos especialistas em circularidade são apresentadas nas Tabelas 36, 37 e 38, respectivamente.

Tabela 36 – Matriz de comparação *fuzzy* para os critérios conforme o especialista em circularidade 1

Critérios	Econômico	Ambiental	Técnico
Econômico	(1, 1, 1)	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 3)
Ambiental	(3, 5, 7)	(1, 1, 1)	(5, 7, 9)
Técnico	(0,33, 1, 1)	(0,11, 0,14, 0,2)	(1, 1, 1)

Tabela 37 – Matriz de comparação *fuzzy* para os critérios conforme o especialista em circularidade 2

Critérios	Econômico	Ambiental	Técnico
Econômico	(1, 1, 1)	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 3)
Ambiental	(3, 5, 7)	(1, 1, 1)	(7, 9, 9)
Técnico	(0,33, 1, 1)	(0,11, 0,11, 0,14)	(1, 1, 1)

Tabela 38 – Matriz de comparação *fuzzy* para os critérios conforme o especialista em circularidade 3

Critérios	Econômico	Ambiental	Técnico
Econômico	(1, 1, 1)	(0,11, 0,14, 0,2)	(1, 1, 3)
Ambiental	(5, 7, 9)	(1, 1, 1)	(5, 7, 9)
Técnico	(0,33, 1, 1)	(0,11, 0,14, 0,2)	(1, 1, 1)

Posteriormente, foram apresentadas as matrizes de comparação par a par para os subcritérios referentes aos eixos de critério econômico, ambiental e técnico para cada especialista em circularidade consultado, respectivamente, nas Tabelas 39, 40 e 41 para o eixo

econômico. Nas Tabelas 42, 43 e 44 para o eixo ambiental. E para o eixo técnico nas Tabelas 45, 46 e 47.

Tabela 39 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista em circularidade 1

Subcritérios - Eixo Econômico	Custo de produção da Resina	Quantidade Resina Produzida	Custo Matéria-prima	Rendimento
Custo de produção da Resina	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
Quantidade Resina Produzida	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
Custo Matéria-prima	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Rendimento	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,2, 0,33, 1)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)

A Tabela 39 demonstra que o especialista em circularidade 1, ao realizar a comparação pareada para os subcritérios do eixo econômico, atribuiu uma maior preferência para o subcritério de “custo de produção da resina” em detrimento aos subcritérios “quantidade de resina produzida”, “custo de matéria-prima” e “rendimento”, sendo moderadamente mais importante, mais importante e fortemente mais importante, respectivamente.

Tabela 40 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista em circularidade 2

Subcritérios - Eixo Econômico	Custo de produção da Resina	Quantidade Resina Produzida	Custo Matéria-prima	Rendimento
Custo de produção da Resina	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(1, 3, 5)
Quantidade Resina Produzida	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(0,2, 0,33, 1)
Custo Matéria-prima	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(0,14, 0,2, 0,33)
Rendimento	(0,2, 0,33, 1)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(1, 1, 1)

A Tabela 40 evidencia que o especialista em circularidade 2, ao realizar a comparação pareada dos subcritérios pertencentes ao eixo econômico, assim como o especialista em circularidade 1, atribuiu maior preferência ao subcritério “custo de produção da resina” em relação aos demais subcritérios. De forma complementar, a Tabela 41, que apresenta as avaliações par a par realizadas pelo especialista em circularidade 3, também destaca a centralidade do subcritério “custo de produção da resina”, especialmente em comparação com o subcritério “quantidade de resina produzida”.

Tabela 41 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo econômico conforme o especialista em circularidade 3

Subcritérios - Eixo Econômico	Custo de produção da Resina	Quantidade Resina Produzida	Custo Matéria-prima	Rendimento
Custo de produção da Resina	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)	(1, 1, 3)	(1, 1, 1)
Quantidade Resina Produzida	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)	(0,33, 1, 1)
Custo Matéria-prima	(0,33, 1, 1)	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)	(0,33, 1, 1)
Rendimento	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)

Com relação ao eixo ambiental, os especialistas em circularidade atribuíram maior importância para os subcritérios “água consumida” e “energia consumida” em detrimento dos demais. Conforme a Tabela 42, o especialista em circularidade 1 considerou a “água consumida” de igual importância com relação ao subcritério “energia consumida”. Já com relação aos subcritérios “resíduos gerados” e “reciclabilidade”, o especialista em circularidade 1 apontou como moderadamente mais importante para a escala de relevância. O especialista em circularidade 1 destacou ainda a o subcritério “energia consumida” como mais importante que “resíduos gerados” e fortemente mais importante que “reciclabilidade”. Enquanto o subcritério de “resíduos gerados” foi considerado moderadamente mais importante que “reciclabilidade”.

Tabela 42 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista em circularidade 1

Subcritérios - Eixo Ambiental	Água Consumida	Energia Consumida	Resíduos Gerados	Reciclabilidade
Água Consumida	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
Energia Consumida	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
Resíduos Gerados	(0,2, 0,33, 1)	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Reciclabilidade	(0,2, 0,33, 1)	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)

O especialista em circularidade 2, conforme apresentado na Tabela 43, considerou a “água consumida” de igual importância com relação ao subcritério “energia consumida”. Já com relação aos subcritérios “resíduos gerados” e “reciclabilidade”, o especialista em circularidade 2 apontou como moderadamente mais importante com relação ao subcritério “água consumida” e mais importante e fortemente mais importante com relação ao subcritério “energia consumida”.

Tabela 43 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista em circularidade 2

Subcritérios - Eixo Ambiental	Água Consumida	Energia Consumida	Resíduos Gerados	Reciclabilidade
Água Consumida	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(0,2, 0,33, 1)
Energia Consumida	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(0,14, 0,2, 0,33)
Resíduos Gerados	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(0,11, 0,14, 0,2)
Reciclabilidade	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)	(1, 1, 1)

O especialista em circularidade 3, conforme apresentado na Tabela 44, considerou a “água consumida” de moderadamente mais importante com relação ao subcritério “energia consumida”. Este especialista destacou a “água consumida” como mais importante que “resíduos gerados”, contudo entendeu que este subcritério é moderadamente menos importante que a “reciclabilidade”. Enquanto “energia consumida”, para o especialista em circularidade 3 é considerado como moderadamente mais importante com relação a “resíduos gerados” e menos importante que o subcritério “reciclabilidade”.

Tabela 44 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo ambiental conforme o especialista em circularidade 3

Subcritérios - Eixo Ambiental	Água Consumida	Energia Consumida	Resíduos Gerados	Reciclabilidade
Água Consumida	(1, 1, 1)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 3)	(1, 3, 5)
Energia Consumida	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)
Resíduos Gerados	(0,33, 1, 1)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)
Reciclabilidade	(0,2, 0,33, 1)	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)

Com relação ao eixo técnico, os especialistas em circularidade atribuíram maior importância para os subcritérios “matéria-prima utilizada” e “densidade” da resina PET avaliada em detrimento dos demais subcritérios componentes do eixo. Nesse contexto, a Tabela 45 ilustrou que o especialista em circularidade 1 entendeu a importância relativa do subcritério “matéria-prima utilizada” como moderadamente mais importante que “densidade” e “viscosidade intrínseca” e mais importante que “temperatura de polimerização”.

Tabela 45 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista em circularidade 1

Subcritérios - Eixo Técnico	Matéria-prima utilizada	Densidade	Temperatura de Polimerização	Viscosidade Intrínseca
Matéria-prima utilizada	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(1, 3, 5)
Densidade	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 3, 5)
Temperatura de Polimerização	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)
Viscosidade Intrínseca	(0,2, 0,33, 1)	(0,2, 0,33, 1)	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)

Tabela 46 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista em circularidade 2

Subcritérios - Eixo Técnico	Matéria-prima utilizada	Densidade	Temperatura de Polimerização	Viscosidade Intrínseca
Matéria-prima utilizada	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)	(5, 7, 9)
Densidade	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)	(3, 5, 7)
Temperatura de Polimerização	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
Viscosidade Intrínseca	(0,11, 0,14, 0,2)	(0,14, 0,2, 0,33)	(0,2, 0,33, 1)	(1, 1, 1)

Já na Tabela 46 notou-se que o especialista em circularidade 2 considerou o subcritério de “matéria-prima utilizada” como moderadamente mais importante que “densidade” e mais importante que os subcritérios “temperatura de polimerização” e fortemente mais importante que “viscosidade intrínseca”. Enquanto apontou “densidade” como sendo mais importante que “temperatura de polimerização” e fortemente mais importante que “viscosidade intrínseca”.

O especialista em circularidade 3, conforme apresentado na Tabela 47, considerou o subcritério de “matéria-prima utilizada” como de igual importância que “densidade” e que “viscosidade intrínseca”, mas apontou como sendo menos importante que “temperatura de polimerização”. Este especialista considerou ainda “densidade” como sendo menos importante que “temperatura de polimerização” e de igual importância com relação a “viscosidade intrínseca”.

Tabela 47 – Matriz de comparação *fuzzy* para os subcritérios referentes ao eixo técnico conforme o especialista em circularidade 3

Subcritérios - Eixo Técnico	Matéria-prima utilizada	Densidade	Temperatura de Polimerização	Viscosidade Intrínseca
Matéria-prima utilizada	(1, 1, 1)	(1, 1, 3)	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 3)
Densidade	(0,33, 1, 1)	(1, 1, 1)	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 3)
Temperatura de Polimerização	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)
Viscosidade Intrínseca	(0,33, 1, 1)	(0,33, 1, 1)	(0,14, 0,2, 0,33)	(1, 1, 1)

Conforme descrito anteriormente, na avaliação dos especialistas técnicos na produção de polímeros, para garantir que as comparações feitas pelos decisores sejam consideradas consistentes, utilizou-se a Equação 12 responsável por identificar o IC das matrizes de comparação coletadas com os decisores. Conforme descrito por Patil e Kant (2014) quando a comparação da matriz *crisp* (valores reais fixos) A é consistente, significa que a matriz de comparação *fuzzy* $\tilde{A}$ também é consistente. Nesse contexto, os decisores foram acompanhados para que caso houvesse alguma inconsistência ($RC \leq 0,10$) nos julgamentos, fosse feita rapidamente uma reavaliação e alinhamento com os objetivos do problema de decisão proposto, com o intuito de manter todas as matrizes consistentes.

Posteriormente, agregou-se os valores de decisão dos especialistas em circularidade para os três eixos de critério presente na Tabela 48, e para os subcritérios atrelados a estes critérios nas Tabelas 49, 50 e 51, respectivamente.

Tabela 48 – Matriz de comparação *fuzzy* integrada para os critérios conforme os decisores especialistas em circularidade

Crítérios	Econômico	Ambiental	Técnico
Econômico	(1, 1, 1)	(0,13, 0,18, 0,29)	(1, 1, 3)
Ambiental	(3,67, 5,67, 7,67)	(1, 1, 1)	(5,67, 7,67, 9)
Técnico	(0,33, 1, 1)	(0,11, 0,13, 0,18)	(1, 1, 1)

Tabela 49 – Matriz de comparação *fuzzy* integrada para os subcritérios do eixo econômico conforme os decisores especialistas em circularidade

Subcritérios - Eixo Econômico	Custo de produção da Resina	Quantidade Resina Produzida	Custo Matéria-prima	Rendimento
Custo de produção da Resina	(1, 1, 1)	(1,67, 3, 5)	(3, 4,33, 6,33)	(2,07, 3,44, 5)
Quantidade Resina Produzida	(0,23, 0,51, 0,78)	(1, 1, 1)	(1, 2,33, 4,33)	(0,47, 1,22, 2,33)
Custo Matéria-prima	(0,2, 0,45, 0,51)	(0,24, 0,56, 1)	(1, 1, 1)	(0,45, 1,18, 2,11)
Rendimento	(0,44, 1,16, 2,07)	(0,73, 2,11, 3,67)	(1,4, 2,78, 4,33)	(1, 1, 1)

Tabela 50 – Matriz de comparação *fuzzy* integrada para os subcritérios do eixo ambiental conforme os decisores especialistas em circularidade

Subcritérios - Eixo Ambiental	Água Consumida	Energia Consumida	Resíduos Gerados	Reciclabilidade
Água Consumida	(1, 1, 1)	(0,73, 1,44, 3)	(1,67, 3, 5)	(0,73, 2,11, 3,67)
Energia Consumida	(0,51, 1,44, 2,33)	(1, 1, 1)	(1,67, 3,67, 5,67)	(2,71, 4,07, 5,44)
Resíduos Gerados	(0,23, 0,51, 0,78)	(0,18, 0,29, 0,78)	(1, 1, 1)	(0,7, 1,38, 2,73)
Reciclabilidade	(0,47, 1,22, 2,33)	(1,08, 1,78, 2,51)	(1,84, 2,78, 3,67)	(1, 1, 1)

Tabela 51 – Matriz de comparação *fuzzy* integrada para os subcritérios do eixo técnico conforme os decisores especialistas em circularidade

Subcritérios - Eixo Técnico	Matéria-prima utilizada	Densidade	Temperatura de Polimerização	Viscosidade Intrínseca
Matéria-prima utilizada	(1, 1, 1)	(1, 2,33, 4,33)	(2,05, 3,4, 4,78)	(2,33, 3,67, 5,67)
Densidade	(0,24, 0,56, 1)	(1, 1, 1)	(0,71, 2,07, 3,44)	(1,67, 3, 5)
Temperatura de Polimerização	(1,1, 1,8, 2,56)	(1,13, 1,89, 3)	(1, 1, 1)	(1,67, 3, 5)
Viscosidade Intrínseca	(0,21, 0,49, 0,73)	(0,23, 0,51, 0,78)	(0,23, 0,51, 0,78)	(1, 1, 1)

Posteriormente, calculou-se os pesos pelo método da média geométrica, explicitado no Capítulo 4. Para isto, utilizou-se a biblioteca *pyDecision* (Pereira; Basilio; Santos, 2024), implementada no *Python* (Pereira; Basilio; Santos, 2024), implementada no *Python*. Os resultados desta etapa são apresentados nas Tabelas 52 e 53.

Tabela 52 – Peso dos critérios estabelecido pelo método *Fuzzy* AHP para os especialistas em circularidade

Critérios	Peso dos Critérios pelo Método FAHP		
	a_1	a_2	a_3
Econômico	0,090	0,123	0,266
Ambiental	0,489	0,767	1,143
Técnico	0,059	0,110	0,157

Tabela 53 – Peso dos subcritérios estabelecido pelo método *Fuzzy* AHP para os especialistas em circularidade

Critérios	Subcritérios	Peso dos Critérios pelo Método FAHP		
		a_1	a_2	a_3
Econômico	C1 Custo de produção da Resina	0,208	0,428	0,993
	C2 Quantidade Resina Produzida	0,066	0,182	0,469
	C3 Custo Matéria-prima	0,044	0,122	0,285
	C4 Rendimento	0,095	0,268	0,671
Ambiental	C5 Água Consumida	0,109	0,283	0,757
	C6 Energia Consumida	0,138	0,351	0,809
	C7 Resíduos Gerados	0,046	0,110	0,315
	C8 Reciclabilidade	0,110	0,256	0,598
Técnico	C9 Matéria-prima utilizada	0,171	0,382	0,882
	C10 Densidade	0,085	0,225	0,545
	C11 Temperatura de Polimerização	0,139	0,294	0,667
	C12 Viscosidade Intrínseca	0,038	0,098	0,219

Com isso, conclui-se a aplicação do método FAHP, por meio do qual foram definidos os pesos correspondentes às avaliações dos especialistas em circularidade, conforme estabelecido na delimitação do escopo da aplicação do modelo multicritério híbrido. Os pesos obtidos sob a lógica *fuzzy* foram, então, incorporados na etapa subsequente da metodologia, sendo utilizados como parâmetros de entrada na aplicação da abordagem FTOPSIS, conforme detalhado no próximo subtópico.

5.4 Utilização do método FTOPSIS para os especialistas em circularidade

A partir do resultado dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão $\tilde{D}$ para o julgamento dos especialistas técnicos, conforme ilustrado na Tabela 54.

Tabela 54 – Matriz de decisão *fuzzy* das resinas de PET com relação aos subcritérios de cada eixo com relação aos especialistas em circularidade

$\tilde{D}$		TPA			DMT			Etileno Glicol por Biomassa		
		a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
Eixo Econômico	C1	0,500	0,750	0,900	0,267	0,450	0,650	0,283	0,433	0,600
	C2	0,750	0,900	1,000	0,383	0,567	0,750	0,100	0,300	0,500
	C3	0,600	0,767	0,917	0,300	0,517	0,717	0,033	0,167	0,367
	C4	0,317	0,500	0,667	0,583	0,800	0,933	0,533	0,700	0,833
Eixo Ambiental	C5	0,433	0,667	0,850	0,300	0,500	0,750	0,283	0,433	0,600
	C6	0,367	0,583	0,800	0,033	0,167	0,367	0,450	0,650	0,800
	C7	0,500	0,750	0,900	0,367	0,583	0,800	0,033	0,167	0,367
	C8	0,317	0,500	0,667	0,583	0,800	0,933	0,667	0,850	0,967
Eixo Técnico	C9	0,200	0,383	0,567	0,200	0,383	0,567	0,750	0,900	1,000
	C10	0,100	0,233	0,450	0,583	0,800	0,933	0,300	0,517	0,717
	C11	0,033	0,167	0,367	0,433	0,667	0,850	0,067	0,233	0,433
	C12	0,500	0,750	0,900	0,500	0,750	0,900	0,100	0,233	0,450

Como parte da aplicação da abordagem FTOPSIS, multiplicou-se os pesos dos critérios presentes na Tabela 52 com o peso dos subcritérios ilustrados na Tabela 53, compondo, portanto, a Tabela 55.

Tabela 55 – Peso total dos subcritérios oriundos do método *fuzzy* AHP

$\tilde{W}$	Peso total dos subcritérios		
	a_1	a_2	a_3
C1	0,0187	0,0526	0,2641
C2	0,0059	0,0224	0,1248
C3	0,0040	0,0150	0,0758
C4	0,0086	0,0330	0,1785
C5	0,0533	0,2171	0,8653
C6	0,0675	0,2692	0,9247
C7	0,0225	0,0844	0,3600
C8	0,0538	0,1964	0,6835
C9	0,0101	0,0420	0,1385
C10	0,0050	0,0248	0,0856
C11	0,0082	0,0323	0,1047
C12	0,0022	0,0108	0,0344

Com os dados dos processos anteriores disponíveis, foi realizada a normalização e ponderação da matriz de avaliação aplicada aos decisores especialistas técnicos presente na Tabela 54. Esse passo ocorre segundo as equações 20 e 23, e assim, obtêm-se a matriz normalizada e ponderada $\tilde{V}$, presente na Tabela 56. Com isso, a matriz de decisão está configurada para que sejam calculadas as distâncias positivas e negativas que determinarão a proximidade relativa do valor ideal, conforme descrito anteriormente.

Tabela 56 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método FAHP

$\tilde{V}$		TPA			DMT			Etileno Glicol por Biomassa		
		a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
Eixo Econômico	C1	0,010	0,044	0,264	0,006	0,026	0,191	0,006	0,025	0,176
	C2	0,004	0,020	0,125	0,002	0,013	0,094	0,001	0,007	0,062
	C3	0,003	0,013	0,076	0,001	0,008	0,059	0,000	0,003	0,030
	C4	0,004	0,021	0,179	0,003	0,013	0,097	0,003	0,015	0,106
Eixo Ambiental	C5	0,027	0,170	0,865	0,019	0,128	0,764	0,018	0,111	0,611
	C6	0,031	0,196	0,925	0,003	0,056	0,424	0,038	0,219	0,925
	C7	0,013	0,070	0,360	0,009	0,055	0,320	0,001	0,016	0,147
	C8	0,018	0,102	0,471	0,032	0,163	0,660	0,037	0,173	0,684
Eixo Técnico	C9	0,002	0,016	0,078	0,002	0,016	0,078	0,008	0,038	0,139
	C10	0,001	0,006	0,041	0,003	0,021	0,086	0,002	0,014	0,066
	C11	0,001	0,006	0,105	0,000	0,002	0,008	0,001	0,005	0,052
	C12	0,001	0,009	0,034	0,001	0,009	0,034	0,000	0,003	0,017

Para a determinação da solução ideal *fuzzy* positiva e negativa (FPIS A^+ e a FNIS A^-) utilizou-se a matriz apresentada na Tabela 56. Desta forma, com os valores padronizados e calibrados com base na lógica *fuzzy*, foram determinadas as distâncias entre esses dados e as soluções que podem ser consideradas ideais *fuzzy* positiva e negativa, que são os valores máximos e mínimos de cada subcritério respectivamente. A partir disso, foram determinadas as matrizes de distância D_i^+ e D_i^- com relação as soluções ideais positivas e negativas, conforme demonstrado nas equações 27 e 28, respectivamente. Os resultados para as distâncias são exibidos na Tabela 57.

Tabela 57 – Matriz de distância positiva e negativa para os especialistas em circularidade

Critérios	Subcritérios	Resinas					
		Distância positiva			Distância negativa		
		TPA	DMT	EG por Biomassa	TPA	DMT	EG por Biomassa
Eixo Econômico	C1	0,194	0,207	0,209	0,151	0,108	0,099
	C2	0,092	0,098	0,105	0,073	0,054	0,036
	C3	0,056	0,059	0,066	0,044	0,034	0,017
	C4	0,136	0,147	0,145	0,102	0,055	0,060
Eixo Ambiental	C5	0,629	0,651	0,671	0,497	0,435	0,347
	C6	0,666	0,786	0,654	0,544	0,245	0,547
	C7	0,261	0,269	0,313	0,211	0,187	0,085
	C8	0,525	0,482	0,476	0,266	0,380	0,395
Eixo Técnico	C9	0,111	0,111	0,095	0,045	0,045	0,082
	C10	0,072	0,060	0,065	0,024	0,051	0,038
	C11	0,083	0,101	0,089	0,060	0,005	0,030
	C12	0,024	0,024	0,029	0,020	0,020	0,010

Obtida as distâncias totais positivas e negativas, determinou-se a proximidade relativa à solução ideal, denominado como coeficiente de proximidade (CCi). De acordo com o CCi, a ordem de classificação das rotas químicas pautadas nos critérios de circularidade sob a óptica dos técnicos especialistas em circularidade é determinada. A primeira alternativa é determinada como a rota química mais apropriada para produzir resinas alinhadas com a EC, no que tange a mitigar os impactos de produção e manter o nível técnico e econômico em larga escala conforme preconiza um modelo econômico. O valor para este parâmetro e o ordenamento final para as alternativas abordadas é apresentado na Tabela 58.

Tabela 58 – Determinação de D_i^+ e D_i^- e CC_i e a ordem das alternativas conforme os especialistas em circularidade

Rota química	D_i^+	D_i^-	CC_i	Ordenamento
TPA	2,85	2,04	0,42	1
DMT	3,00	1,62	0,35	3
EG por Biomassa	2,92	1,75	0,37	2

Com isto, finaliza-se a utilização da abordagem híbrida aos técnicos especialistas em resina e em circularidade para se estabelecer a comparação de diferentes pontos de vistas e fomentar a aplicabilidade do modelo para a mensuração da circularidade e definição de pesos dos critérios para a seleção de rotas químicas para a produção de resinas PET. Essa dicotomia será discutida em profundidade com a literatura relacionada a EC no Capítulo 7.

5.5 Definição de pesos normalizados com base na abordagem híbrida com base nos especialistas

A abordagem multicritério híbrida possibilitou identificar os pesos normalizados para os critérios e subcritérios explorados na seleção de rotas químicas para a produção de resina PET, conforme descrito na Tabela 59. Esses pesos foram consolidados a partir das avaliações dos especialistas técnicos em produção de resina e dos especialistas em circularidade.

Tabela 59 – Pesos normalizados para os critérios e subcritérios conforme os especialistas

Critérios	Peso Normalizado		Subcritérios	Peso Normalizado	
	Especialistas Técnicos	Especialistas Circularidade		Especialistas Técnicos	Especialistas Circularidade
Econômico	0,53	0,15	Custo de produção da Resina (C1)	0,48	0,43
			Quantidade Resina Produzida (C2)	0,23	0,19
			Custo Matéria-prima (C3)	0,21	0,11
			Rendimento (C4)	0,08	0,27
Ambiental	0,06	0,75	Água Consumida (C5)	0,48	0,30
			Energia Consumida (C6)	0,37	0,33
			Resíduos Gerados (C7)	0,08	0,12
			Reciclabilidade (C8)	0,07	0,25
Técnico	0,42	0,10	Matéria-prima utilizada (C9)	0,52	0,38
			Densidade (C10)	0,23	0,23
			Temperatura de Polimerização (C11)	0,11	0,29
			Viscosidade Intrínseca (C12)	0,13	0,10

Essa definição de pesos normalizados desempenhou um papel relevante na priorização dos critérios e subcritérios analisados, assegurando que a seleção das rotas químicas para a produção de resina PET fosse baseada em uma estrutura decisória equilibrada. A consolidação dos pesos permitiu identificar quais aspectos exercem maior influência na escolha das rotas produtivas, destacando a relevância dos critérios técnicos, econômicos e as implicações ambientais. Esse processo garantiu que a avaliação das alternativas fosse realizada de maneira estruturada, possibilitando uma tomada de decisão mais precisa e fundamentada. Além disso, a atribuição dos pesos normalizados tornou possível uma análise comparativa mais robusta, permitindo que fosse apresentada para o representante da indústria de produção de resina PET, no intuito de validar a proposta conforme descrito na Seção 3 desta tese.

5.6 Validação com a indústria de produção de resina PET

Após a etapa de construção do modelo e aplicabilidade com os especialistas, sentiu-se a necessidade de realizar algum tipo de verificação sobre a real aplicabilidade do modelo. Sendo assim, realizou-se uma espécie de validação do mesmo com um representante da indústria do setor de produção de resina, por meio da aplicação de um questionário e a exposição do modelo e todas as suas etapas e critérios. Essa etapa finalizou a aplicação metodológica e possuiu como intuito a verificação da viabilidade e do interesse de utilização da abordagem pelo setor industrial de produção de resina PET. Para realização dessa última etapa, um membro de uma das maiores indústrias de produção de resina foi convidado para conhecer o modelo e sua aplicabilidade, e na oportunidade foram respondidas as perguntas presentes na Tabela 60.

Tabela 60. Verificação da viabilidade de aplicação do modelo multicritério proposto com a indústria de resina PET.

Questão	Respondente A
1) Você consegue perceber vantagem técnica com relação à rota de produção que utiliza o TPA? Se sim, você poderia comentar quais estas vantagens?	“Sim, acredito que a principal vantagem está na simplificação do processo produtivo, já que o TPA elimina a necessidade de uma etapa intermediária de transesterificação, necessária no processo via DMT. Isso resulta em menor complexidade operacional, menos equipamentos específicos e maior eficiência na conversão do insumo em resina PET. O TPA é um insumo disponível em grande quantidade e com pureza ideal, garantindo maior previsibilidade de processo e qualidade do polímero final, o que reduz a necessidade de ajustes frequentes na produção. Outra vantagem técnica importante da rota TPA é sua maior eficiência energética e menor geração de subprodutos. Enquanto a rota DMT libera metanol no processo, exigindo um sistema adicional de recuperação e controle de emissões, a reação do TPA com EG ocorre de maneira mais direta, tornando o processo mais limpo e eficiente. Além disso, a polimerização do PET a partir do TPA apresenta menos formação de impurezas e colorações indesejadas, contribuindo para a produção de resinas de alta transparência e melhor qualidade.”
2) Você consegue identificar alguma vantagem do TPA se comparado às outras rotas, com relação a sua implementação? E quanto a sua eficiência? Poderia discorrer um pouco sobre isso?	“A rota que utiliza TPA apresenta vantagens técnicas claras na implementação em comparação às rotas alternativas. Do meu ponto de vista, o uso de TPA simplifica o processo produtivo, eliminando etapas intermediárias que existem na rota via DMT. Essa simplificação implica em menos equipamentos específicos, o que torna a planta mais simples de operar e implementar. O fato de o TPA ser amplamente disponível comercialmente em alta pureza facilita a integração da matéria-prima na produção com menor risco de paradas ou ajustes de processo, o que é uma grande vantagem na prática industrial. Em termos de eficiência, a rota do TPA geralmente permite reações mais rápidas e melhor rendimento na polimerização do PET. Por não gerar subprodutos significativos durante a reação, o processo com TPA tende a ser energeticamente mais eficiente e ter menor perda de material. A qualidade do polímero produzido a partir da rota por TPA costuma ser mais consistente, atendendo aos padrões de fabricação, o que justifica com a realidade das plantas que em sua maioria já adotaram esse tipo de rota.”
3) Você considera influente os parâmetros técnicos, como a densidade do polímero, a temperatura de polimerização e a viscosidade na escolha da rota de produção da resina	“Sim, os parâmetros técnicos são influentes na decisão, o que é evidenciado pelo peso atribuído no método multicritério. Essas características como a viscosidade estão relacionadas com a compatibilidade de processamento da resina e afetam a qualidade do PET produzido. Acredito ainda que, na prática industrial, a influência dos parâmetros técnicos é decisiva. Por exemplo, se a matéria-prima não cumprir

PET?

requisitos de performance, ela simplesmente não será adotada. Portanto, a escolha da resina passa primeiramente por um crivo técnico rigoroso.”

4) Você consegue identificar quais desafios técnicos a rota que considera a utilização de EG por biomassa apresenta em comparação às petroquímicas tradicionais?

“Para mim, um dos desafios é garantir que o EG por biomassa tenha pureza e qualidade consistentes para a reação de polimerização. Impurezas ou variações na composição do EG de fonte renovável podem afetar as reações químicas, exigindo controles mais rigorosos ou etapas adicionais de purificação, que podem impactar a eficiência da produção ou a qualidade do polímero final. Outro desafio técnico que eu enxergo é quanto à integração desse insumo alternativo na planta produtiva. Caso a produção de EG por biomassa não alcance o mesmo volume e confiabilidade de suprimento que o EG petroquímico, a planta pode enfrentar oscilações de processamento ou precisar adaptar a logística de alimentação.”

5) Como você enxerga as prioridades da indústria em relação a ponderar os critérios econômicos, técnicos e ambientais? Poderia comentar sobre isso?

“A indústria de produção de PET tradicionalmente prioriza critérios técnicos e econômicos na tomada de decisão, refletindo a necessidade de garantir eficiência produtiva e competitividade de custos. O critério técnico geralmente tem peso elevado porque a qualidade do polímero produzido impacta diretamente sua aplicabilidade em embalagens, fibras têxteis e outros segmentos industriais. O critério econômico se torna essencial para viabilizar a operação em um mercado altamente competitivo, no qual pequenas variações no custo de matéria-prima ou energia podem impactar significativamente a rentabilidade. Mas acredito também que os critérios ambientais vêm ganhando espaço na indústria, especialmente diante das crescentes regulamentações e pressões de mercado para adoção de práticas sustentáveis. A introdução de matérias-primas renováveis, como o etileno glicol de biomassa no caso das rotas avaliadas, exemplifica essa mudança de perspectiva, embora sua adoção ainda dependa de um equilíbrio com os fatores técnicos e econômicos.”

6) Quais critérios econômicos, dos que foram apresentados, você considera como um fator preponderante para a escolha da rota de produção?

“A preferência pela rota TPA em detrimento da rota DMT está fundamentada, sobretudo, em fatores econômicos, particularmente no custo e na eficiência produtiva. A utilização do TPA como matéria-prima apresenta vantagens significativas, incluindo um menor custo unitário e uma conversão mais direta no processo de polimerização, resultando em um menor consumo de energia por tonelada de PET produzida. Além disso, a ampla disponibilidade de TPA no mercado global, aliada à sua compatibilidade com processos de larga escala, favoreceu sua adoção como principal rota produtiva.”

7) Como você vê a influência da capacidade produtiva e o preço da matéria-prima na escolha da rota de produção da resina PET? Se possível comente sobre o seu ponto de vista.

“Na indústria de PET, a capacidade produtiva de uma planta e o preço das matérias-primas são fatores econômicos determinantes na escolha da rota de produção. Do ponto de vista de capacidade, rotas que permitem plantas de maior escala são preferidas, pois a produção maior reduz o custo unitário por meio de economias de escala. A rota via TPA possibilita a construção de plantas de grande capacidade, atendendo à enorme demanda de PET com custo mais baixo por tonelada produzida. O preço da matéria-prima é igualmente crítico na definição da rota. A escolha entre TPA, DMT ou alternativas como o EG de biomassa leva em conta o custo por unidade dessas matérias-primas e sua volatilidade no mercado. Assim, as rotas com matérias-primas de menor custo e fornecimento estável, como é o caso do TPA petroquímico tradicional, terão prioridade.”

8) Como você vê a escolha das resinas, com base no modelo multicritério, em relação à realidade das plantas industriais de produção da resina PET?

“Eu acredito que a classificação das resinas a partir do modelo multicritério se mostrou coerente com o que se observa na realidade da indústria de resina PET. Na prática industrial atual, a imensa maioria das plantas de PET utiliza o TPA como principal matéria-prima, praticamente substituindo a rota antiga de DMT. O uso do TPA equilibra bem os critérios técnicos e econômicos, oferecendo eficiência e um custo competitivo. Quanto à posição da rota com EG a partir de biomassa à frente da rota DMT, acho que faz sentido, porque embora a rota de biomassa ainda não seja amplamente utilizada comercialmente, ela indica uma direção promissora devido aos benefícios ambientais.”

- 9) Quais fatores econômicos você considera responsáveis pela preferência da rota TPA com relação à DMT ao longo do tempo?
- “A principal razão econômica para a substituição da rota DMT pela TPA ao longo dos anos foi a redução de custos operacionais e maior eficiência produtiva proporcionada pelo uso de TPA. A eliminação da etapa de transesterificação reduz a necessidade de equipamentos e o consumo de energia, tornando o processo mais econômico. Além disso, o rendimento econômico da rota TPA é superior, pois apresenta menor perda de material e maior taxa de conversão na síntese do PET.”
- 10) Como você enxerga os critérios ambientais com relação os critérios econômicos e técnicos, no contexto da indústria de produção da resina PET?
- “Eu acho que no âmbito industrial a tendência é priorizar a viabilidade econômica e o desempenho técnico na tomada de decisão, assegurando que o processo seja lucrativo e atenda aos requisitos de qualidade e produtividade. Isso pode justificar a atribuição dos pesos apresentados no resultado do modelo multicritério. Mas eu acho que a pressão crescente pela implementação de práticas de EC e sustentabilidade tem aumentado a importância dos critérios ambientais nos processos de decisão, principalmente para reduzir desperdícios e as emissões de poluentes. Para a fabricação de resina PET em larga escala, as alternativas ambientalmente mais favoráveis precisam satisfazer a demanda, principalmente com relação à viabilidade técnica e econômica que sejam similares às rotas tradicionais. Quando isto acontecer, a meu ver, os critérios econômicos, técnicos e ambientais terão os mesmos pesos nos processos de decisão, garantindo a escolha pela produção da rota avaliada.”
- 11) Você considera o consumo de água e energia e a geração de resíduos entre as rotas TPA, DMT e biomassa um fator preponderante para influenciar as decisões industriais?
- “O consumo de água e energia, assim como a geração de resíduos, são fatores importantes a considerar ao comparar as rotas TPA, DMT e de EG por biomassa, mas não podem ser considerados isoladamente. Na prática industrial, essas variáveis ambientais entram na análise principalmente quando acarretam diferença de custo ou implicações regulatórias. Por exemplo, se a rota de biomassa consumisse muito mais energia ou água que a rota convencional de TPA, isso elevaria o custo operacional e poderia pesar contra sua adoção. De modo similar, uma rota que gere resíduos significativos exigirá investimento em tratamento ou disposição, o que também influencia o custo total. Portanto, embora diferenças nos consumos e resíduos entre TPA, DMT e EG por biomassa sejam avaliadas, elas geralmente influenciam as decisões de forma indireta, via impacto financeiro ou conformidade ambiental, em vez de serem critérios autônomos mais importantes que preço ou rendimento.”
- 12) Como você enxerga os investimentos realizados pela indústria para a produção da resina de bio-PET para tornar a produção viável em larga escala?
- “A indústria tem investido cada vez mais no desenvolvimento do bio-PET, buscando viabilizar sua produção em larga escala como alternativa mais sustentável ao PET convencional. Esses investimentos envolvem parcerias entre empresas petroquímicas e do setor de biotecnologia, pesquisa em rotas de obtenção de matérias-primas renováveis e construção de plantas piloto. Para mim, tais investimentos são estratégicos a longo prazo, visam reduzir a dependência de petróleo e atender a pressões de mercado por produtos mais alinhados com as demandas ambientais. No entanto, há consciência de que tornar o bio-PET competitivo exige superar diversos desafios até garantir fornecimento confiável de biomassa em grande escala e aperfeiçoar a tecnologia para atingir rendimentos comparáveis.”

Assim, buscou-se avaliar se a aplicação da ferramenta proposta baseada em um conjunto de critérios e subcritérios alinhados aos princípios da economia circular é relevante e viável sob a perspectiva da indústria. Com base nos resultados obtidos na aplicação do modelo junto aos decisores, o representante da indústria de produção de resina PET analisou a coerência dos pesos atribuídos e a classificação das alternativas gerada pelo modelo. Sua percepção permitiu contextualizar a aplicabilidade prática do método multicritério, fornecendo uma visão alinhada à realidade industrial e contribuindo para a validação dos resultados obtidos.

Os resultados da investigação evidenciaram que a rota de produção da resina PET via TPA se consolidou como a alternativa mais viável no contexto industrial, devido à sua superioridade técnica e econômica em relação às demais opções. A análise multicritério *Fuzzy* AHP-TOPSIS demonstrou que as características operacionais, a eficiência energética e a maior escalabilidade do processo TPA justificam sua predominância nas plantas industriais. Além disso, os custos reduzidos de matéria-prima e processamento foram determinantes para que essa rota se tornasse a principal escolha ao longo do tempo, superando a rota DMT, que, apesar de tecnicamente viável, envolve etapas adicionais que elevam os custos operacionais e de investimento.

A pesquisa também destacou que a adoção de etileno glicol (EG) de biomassa, embora ainda não seja amplamente utilizada, representa uma alternativa promissora para a indústria de PET. A análise dos critérios ambientais indicou que essa rota pode trazer benefícios significativos em termos de circularidade, reduzindo a dependência de matérias-primas fósseis e as emissões associadas ao ciclo produtivo. No entanto, desafios técnicos e econômicos, como a garantia da pureza do insumo e a estabilidade da cadeia de suprimentos, limitam sua adoção em larga escala no cenário atual. Assim, embora o critério ambiental tenha sido relevante na ponderação do modelo, nota-se que os aspectos técnicos e econômicos são relevantes na tomada de decisão industrial, refletindo a necessidade de equilíbrio entre circularidade e viabilidade produtiva.

A investigação confirmou que a ponderação dos critérios no modelo multicritério reflete as prioridades reais da indústria, sendo coerente os pesos atribuídos aos aspectos técnicos e econômicos e ambientais. Esse alinhamento entre teoria e prática valida a aplicabilidade do modelo na seleção de rotas produtivas para a resina PET, garantindo que as decisões sejam fundamentadas em análises objetivas e coerentes com a realidade do setor. A relevância do método híbrido *Fuzzy* AHP-TOPSIS foi reforçada pela percepção do representante industrial, que reconheceu a possibilidade do ranqueamento obtido e a importância de incorporar múltiplos critérios na escolha da melhor alternativa. Assim, reitera-se a robustez e confiabilidade da ferramenta desenvolvida, bem como seu potencial para futuras aplicações na otimização de processos produtivos alinhados à economia circular e às demandas industriais contemporâneas.

Ademais, os critérios e subcritérios detalhados foram discutidos no Capítulo 7, oferecendo uma base sólida para a análise da aplicabilidade da abordagem multicritério para esse cenário relevante no que consiste a mensuração das rotas de produção das resinas. Assim,

no próximo capítulo, são apresentados os resultados da avaliação das rotas químicas, considerando esses pesos e sua relevância para a tomada de decisão.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme demonstrado no capítulo anterior, a abordagem multicritério empregada atingiu o objetivo de classificar as rotas químicas para elaboração de resina PET com base na opinião dos especialistas, evidenciando os pesos de cada critério e subcritério. Nota-se que de acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 35 e 58, em que em ambos os pontos de vistas (especialistas na elaboração de resina e especialistas na circularidade de polímeros), a rota química com base na utilização de TPA aparece como principal alternativa que se alinha com os critérios e subcritérios inerentes a circularidade adotados neste estudo, seguido pela rota química que considera o EG obtido a partir de biomassa e pela rota a base de DMT. Contudo, como parte fundamental do processo de classificação das rotas químicas, é necessário entender em profundidade a importância e relevância dos critérios avaliados sobre o contexto destas rotas química e a forma com que foram ponderadas. Posteriormente, foram discutidos ainda as principais implicações práticas e gerenciais identificadas com a utilização deste tipo de abordagem para a seleção de rotas químicas para a síntese de resina PET

6.1 Análise dos critérios e subcritérios utilizados na seleção de resinas PET

Enquanto os pesos obtidos na Tabela 59 constituem a visão de que os resultados consistem na percepção comum na qual as alterações nos pesos dos critérios e subcritérios impactam no resultado da avaliação. Esse fator evidencia a capacidade da ferramenta em traduzir a opinião dos especialistas em uma abordagem quantitativa, subsidiada pelos dados empíricos do processo de produção de PET. Auxiliando os decisores na avaliação das rotas químicas para escolher se o critério pode se alinhar mais ou menos com determinado aspecto da EC que seja avaliado.

Contudo, para elucidar como esses critérios se aderem com a literatura referente ao conceito da EC, esta seção explora em detalhes o relacionamento dos três eixos e seus subelementos com o modelo de estrutura da EC e seus blocos descritos no Capítulo 4, presente na Figura 5. A estrutura da EC é fundamental para a cadeia de suprimentos que busca a transição para um modelo econômico circular, podendo reduzir custos operacionais, atenuar os riscos dos recursos (custos e garantia de fornecimento); oferecer bens e serviços mais seguros e saudáveis; contribuir para a restauração do ecossistema; e fabricar produtos desejáveis, bem desenhados e duráveis (Weetman, 2021).

Os critérios do eixo econômico enquadram as rotas químicas avaliadas com relação aos blocos de design do produto e inputs circulares. Os subcritérios custo de produção (C1),

quantidade de matéria-prima por kg de resina PET (C2), custo da matéria-prima (C3) e o rendimento com base no valor investido (C4) respondem ao intuito de se priorizar por um “bom design” da produção da resina, evidenciando a importância de se produzir eficientemente por kg de produto. E, assim, escolher rotas químicas de produção da resina mais econômicas e que consigam entregar a quantidade necessária para abastecer a produção de garrafa PET (material utilizado como base para avaliação) conforme demandado pelo setor comercial.

Essa visão é corroborada por Alonso-Jiménez e González-Barros (2022) que indicam que o custo da matéria-prima impacta a circularidade, impulsionando a necessidade de utilização eficiente de recursos no processo de produção. Em um estudo elaborado por Dragomir, Tofană e Dragomir (2023) evidencia-se também que os custos da matéria-prima desempenham um papel crucial na circularidade do produto. Assim, a eficiência na utilização dos recursos se alinha com os aspectos da EC que preconizam a redução dos desperdícios e a otimização dos custos.

Nesse contexto, os especialistas apontam que o subcritério C1, conforme visto na Tabela 59, apresenta fundamental importância para o aspecto econômico, indicando que o custo de produção de resina PET, independente da rota química, precisa ser considerado. Para Malest e Gabor (2024), o equilíbrio nos custos de produção e no uso da matéria-prima, considerando fontes primárias e secundárias, é essencial para manter a produção e consumo balanceadas, aumentar a eficiência e atender as demandas globais.

Entretanto, o aumento da eficiência pode resultar no paradoxo de Jevons, o qual indica que a forma eficiente de utilizar a matéria-prima pode resultar em um maior consumo de recursos, devido aos preços mais baixos (Alonso-Jiménez; González-Barros, 2022). Dessa forma, implica-se a utilização dos eixos ambientais e técnicos na abordagem multicritério para promover a circularidade. Os dois eixos inferem diretamente nos blocos de input circulares, design do produto e do processo, presentes na estrutura da EC.

Com relação ao eixo ambiental, as rotas químicas precisam considerar em sua essência a água e energia consumidas no processo de produção da resina e a quantidade de resíduos geradas. Para Fragapane *et al.* (2024), a transição para a EC no setor de polímeros precisa reduzir os desperdícios, como de água e energia, e aumentar taxas de reciclagem para minimizar os impactos ambientais e promover práticas sustentáveis. Os especialistas na produção de resina PET reiteram essa abordagem, considerando a água (C5) e a energia consumida (C6) como os maiores pesos com relação à avaliação das rotas químicas,

evidenciando a importância desses subcritérios tanto para a produção das resinas quanto para o alinhamento com a EC.

Enquanto a taxa de reciclagem se relaciona fortemente com o subcritério de reciclabilidade (C8), uma vez que rotas químicas que produzam garrafas PET com maior índice do C8 colaboram positivamente para a reciclagem do produto. O subcritério obteve destaque na avaliação dos especialistas em circularidade, que atribuíram uma ponderação alta com relação aos especialistas técnicos, mas em equilíbrio com os demais subcritérios do eixo. Esse fator contribui para a aplicação do modelo multicritério como base para auxiliar especialistas em circularidade em identificar aspectos da EC em rotas de produção de PET, uma vez que a avaliação se mostrou alinhada com a teoria relacionada ao tema.

O eixo técnico e seus subcritérios influenciam diretamente nos dois outros eixos, uma vez que impactam principalmente na eficiência técnicas das rotas de produção de PET e nos demais inputs dos processos como a energia e água. Assim como nas propriedades técnicas que alteram as condições de reciclagem das garrafas PET, facilitando ou não o reaproveitamento e a sua utilização em novos produtos. Simon (2019) concorda com a afirmativa anterior ao pontuar que os aspectos técnicos da produção de polímeros são fundamentais para a EC, pois asseguram a qualidade dos materiais, garantindo sua reciclagem e a aceitação em novos produtos.

Fragapane *et al.* (2024) destacam que as propriedades técnicas da produção de plásticos, inerentes ao tipo de rota química adotada, impactam a transição para a EC. As propriedades técnicas influenciam nas estratégias de reuso, reciclagem e nas tecnologias inovadoras de produção, essenciais para cadeias de valor sustentáveis de polímeros como o PET. A abordagem híbrida apresentada neste estudo colabora com a literatura, sendo possível identificar para os dois conjuntos de decisores a atribuição de um peso maior (0,53 e 0,38 respectivamente) de importância para o tipo de matéria prima utilizada na resina (C9). Para Pang *et al.* (2016) os diferentes tipos de matéria-prima utilizadas nas rotas químicas conduzem os aspectos da resina, em que o tipo de insumo utilizado pode alinhar a produção de PET com o modelo circular econômico.

Nota-se que a transição para o modelo circular depende do tipo de material utilizado e como as questões aderentes a matéria-prima são peculiares ao tipo de rota química utilizada e às características econômicas e ambientais. Assim, endossa-se a importância da existência de um modelo multicritério que lide com os aspectos mais embrionários de produção de polímeros como PET, colaborando para a avaliação do design e inputs do produto e do processo. Frapagane *et al.* (2023) e Amanna *et al.* (2021) acrescentam que para aumentar a

circularidade do processo de produção de polímeros são essenciais estratégias que auxiliem os produtores a repensarem, reduzirem, reutilizarem e reciclarem, exigindo mudanças no design e nos processos de fabricação e na seleção dos materiais. Assim, estratificar a hierarquia dessa problemática complexa de escolhas e definir critérios, colabora para decisores entenderem os impactos dos diferentes elementos.

6.2 Identificação da rota química para síntese de resina PET

Dessa forma, com os pesos consolidados e alinhados com as rotas químicas e os aspectos da EC, identificou-se a rota química mais aderente com a EC, sendo atribuída as distâncias D_i^+ e D_i^- e coeficiente de aproximação CC_i para os dois conjuntos de especialistas, conforme as Tabelas 35 e 58. Ressalta-se que foram utilizados conjuntos diferentes de especialistas justamente para verificar o comportamento da abordagem para conjuntos que pensam sobre a produção de PET e a EC de maneira diferente e assim, entender as nuances da abordagem, diminuindo o viés de interpretação.

Com base nessa perspectiva, a abordagem multicritério para avaliações de tecnologias que abordam as rotas químicas para a produção de PET apontaram a rota que utiliza o TPA, advindo da nafta como principal agente de transformação para a produção da resina, a resina mais próxima dos aspectos da EC, atribuindo uma nota de 0,43 e 0,42, para especialistas técnicos e em circularidade, respectivamente. Seguidos das rotas que utilizam a biomassa para a obtenção do EG, com coeficiente de aproximação estimado em 0,39 e 0,37, respectivamente. E por último a rota que considera o DMT originário da nafta com coeficiente de 0,37 e 0,35 para os decisores técnicos e os especialistas em circularidade, respectivamente.

Os resultados indicam que a circularidade dos produtos PET pode ser influenciada pela rota utilizada para sua produção. Essa afirmativa é enfatizada por Ghosh *et al.* (2023) que preconiza que rotas de produção de PET devem ser estudadas, principalmente as que consideram estratégias efetivas para lidar com o fim de vida (*end-of-life*) dos plásticos. Benavides *et al.* (2018) e Gracida-Alvarez *et al.* (2023) corroboram com a análise ao avaliar e comparar diferentes rotas de produção com base em critérios ambientais, técnicos e relacionados com a EC, enfatizando a importância de se estudar as diferentes tecnologias que conduzem a produção da resina de PET.

Nesse contexto, nota-se que a rota que considera o TPA aparece como preferencial justamente porque a produção de PET virgem permanece crucial para atender a demanda crescente por produtos PET, visto que as rotas alternativas como bioderivados e a base de reciclagem ainda são mais onerosas, resultam em produtos PET com baixa qualidade ou sem

escalabilidade para repor o setor comercial. Essa questão estabelece uma relação com o peso atribuído pelos decisores aos critérios econômicos, ambientais e técnicos, conforme visto e discutido anteriormente.

Contudo, as rotas alternativas pautadas em bioderivados, representadas neste estudo pela EG por biomassa, oferecem uma redução substancial das emissões e no consumo de combustíveis fósseis quando comparado com a rota química convencional, com uma variação estimada de 12% a 82% (Benavides *et al.* 2018). Benavides *et al.* (2018) destacam ainda que apesar dos ganhos na redução de emissões e no consumo, caminhos que consideram o uso de bioderivados para a produção de PET ainda consomem significativamente mais água se comparado ao processo que utiliza combustível fóssil para produção de TPA. Indicando-se, assim, que há margens para melhoria nas rotas quais usam bioderivados para atuarem como substitutos ótimos para a rota tradicional comercial. Ressalta-se que a produção de PET por biomassa pode ser vista como uma alternativa interessante para o cenário brasileiro. Brito *et al.* (2023) e Alves *et al.* (2023) destacam que o Brasil apresenta potencial significativo para produção de biomassa devido a abundância de resíduos de agrícolas, com uma estimativa de 779,6 milhões de toneladas de resíduos dessas origens geradas anualmente.

A rota química a base de DMT, conforme visto na literatura (Krishinan; Kulkarni, 2008), é notoriamente menos preterida pelas desvantagens já mencionadas com relação a rota química direta que utiliza TPA, como maior investimento para construção da planta de produção e menor rendimento de elaboração de resina. Este fator justifica a priorização pelas duas outras rotas avaliadas. Essa percepção é notável na abordagem multicritério, em que os especialistas, sob diferentes pontos de vistas e experiências, convergiram para apontar a DMT, nos contextos analisados, como a tecnologia de produção da resina menos aderente com os aspectos da EC, seguido da rota para obtenção do EG por biomassa e pela tecnologia convencional com o uso de TPA obtido através do matéria-prima virgem.

Dessa forma, a abordagem multicritério evidenciou que rotas que consideram inputs mais circulares como a EG por biomassa são importantes para os esforços feitos para que ocorra a transição do modelo linear para o circular. Visto que avaliar as rotas químicas impacta diretamente no design do processo e do produto e nos inputs circulares da estrutura da EC. Contudo, a rota tradicional mais utilizada no contexto atual ainda permanece necessária para a produção de PET, principalmente no que tange atender a demanda global de produção e por conta de questões técnicas de tecnologias alternativas que ainda precisam ser exploradas para que ocorra a substituição.

Lisiecki *et al.* (2023) reforça que sem mudanças em novas regulamentações e na demanda e consumo por plásticos, as iniciativas que prezam por rotas mais circulares ainda apresentarão efeitos limitados. Sendo necessário um maior investimento, sinergia e cooperação entre os stakeholders através de toda a cadeia de valor para atingir níveis circulares e, conseqüentemente, reduzir a escolha por rotas tradicionais como apontado no modelo multicritério aplicado. Destaca-se ainda que alternativas como as rotas que utilizam a reciclagem química e mecânica devem ser consideradas em estudos futuros, abordando os benefícios ambientais, econômicos e as vantagens relacionadas com a EC para aprimorar o modelo multicritério e ver sua aplicabilidade em outros cenários e com outras tecnologias para produção de resina PET.

Assim, a implementação de estratégias de EC na produção de PET é crucial para reduzir os impactos ambientais e promover a sustentabilidade. A abordagem multicritério apresentada neste estudo atua de maneira objetiva, considerando dados da literatura e a opinião dos decisores para lidar com a circularidade dos processos de produção, auxiliando na priorização de rotas químicas mais aderentes a EC. Logo, o modelo adotado subsidia uma ferramenta pertinente para a mensuração de critérios aderentes com a circularidade para tecnologias que consideram rotas químicas para a produção de PET, podendo ser utilizado como suporte a decisores que almejam uma abordagem prática e tangível para mensurar essas rotas sob o olhar da EC considerando o micro nível. Kuzoma e Dovgal (2023) enfatiza a importância do desenvolvimento de metodologias e indicadores padronizados para efetivamente mensurar a circularidade em macro, meso e micro níveis. Desta forma, reforça-se a importância da abordagem multicritério que atue com critérios da EC para ajudar decisores em definir cenários, rotas e aspectos relevantes para problemas de decisão.

Sugere-se ainda que o modelo multicritério atue em conjunto com os resultados de modelos avançados de fluxo de materiais combinados com avaliações consequentes do ciclo de vida para avaliar diferentes opções de produção tradicionais e de fim de vida para produtos PET e de outros tipos de polímeros, como os resultados presentes na pesquisa de Ghosh *et al.* (2023) e Gracida-Alvarez *et al.* (2023). E assim incorporar outros indicadores para as rotas químicas que lidem com análises de custos e indicadores de circularidade do polímero como emissões de gases com efeito de estufa e custos associados a vários caminhos de reciclagem. Este quadro abrangente permite a construção de um modelo com critérios robustos, subsidiados por análises complexas como o LCA, auxiliando a tomada de decisões informadas para alcançar uma economia circular para os plásticos mais consciente do ponto

de vista ambiental, econômico e técnico, abrindo caminho para um futuro mais sustentável na produção de plástico e na gestão dos recursos e dos resíduos.

Essa concepção da importância desse tipo de ferramenta para a mensuração das tecnologias de produção da resina PET em consonância com os conceitos da EC são corroboradas pela indústria, conforme visto na etapa de validação com o representante industrial. Evidenciou-se, a partir da análise do ponto de vista da indústria, que o método FAHP-FTOPSIS pode significativamente ajudar na seleção das rotas, aprofundando a seleção dos parâmetros com a utilização de critérios e subcritérios da EC, contribuindo para a escolha por tecnologias com maior qualidade e que impactem positivamente para a transição de modelo. Ordu e Der (2023) ressaltam que os modelos MCDM permitem uma avaliação sistêmica que proporciona uma tomada de decisão confiável, favorecido pela abordagem estruturada para avaliar o conjunto de critérios e subcritérios ponderados pelos decisores.

A avaliação sistêmica reflete diretamente na decisão sobre várias etapas do processo de produção, otimizando a seleção da matéria-prima, a eficiência dos processos e utilização dos recursos, conforme apontado pela indústria. Nesse contexto, Ahmed e Torres (2024) destacam que a eficiência das estratégias da EC na indústria de produção de resina PET dependem diretamente da infraestrutura existente e da redução dos custos operacionais, apontando a necessidade da importância de ferramentas de decisão multicritério que ponderem tanto as questões técnicas quanto as econômicas para a produção da resina.

Ademais, os processos de produção da resina devem considerar a eficiência ambiental, de forma a tomar decisões que reduzam a produção de resíduos e o desperdício de energia. E o sucesso dessas estratégias, principalmente no que condiz reduzir a produção de resina pautada em tecnologias a base de petróleo, dependem de cadeias de reciclagem estruturadas e a disponibilidade de energia mais limpa, capazes de reduzir a emissão de gases de maneira significativa (Gracida-Alvarez et al. 2023) e, assim, tornar a escolha por outras tecnologias circulares mais atraentes e viáveis que as originárias de combustíveis fósseis, como destacado nos resultados supracitados.

Nesse contexto, a adoção de uma abordagem multicritério exerce uma influência significativa no desempenho e na maneira como a indústria enxerga os processos decisórios, promovendo maior eficiência, mesmo na produção de resinas à base de combustíveis fósseis. Demirkan e Durmusoglu (2020), ao analisarem uma indústria de produção de PET na Turquia, destacaram que o controle detalhado de critérios técnicos e ambientais pode gerar avanços expressivos, como a redução de custos de produção e o aumento da lucratividade.

Esses resultados reforçam a importância de adotar modelos aprimorados para a elaboração de PET, alinhando os processos industriais a práticas mais eficientes e sustentáveis.

Além disso, os principais fatores que impulsionam a adoção de uma abordagem multicritério na produção de resina PET incluem as crescentes demandas por qualidade por parte dos usuários de resina, as condições operacionais específicas, as emissões de CO₂, o consumo de recursos fósseis e a necessidade de decisões colaborativas envolvendo consumidores, municípios e recicladores (Nakatani; Hirao, 2011). Nesse sentido, o representante da indústria enfatizou que uma ferramenta que forneça um direcionamento claro baseado nos princípios da economia circular pode transformar significativamente a gestão do negócio. Essa abordagem não apenas oferece uma visão estruturada para equilibrar critérios técnicos, econômicos e ambientais, mas também reforça a relevância de integrar práticas circulares no núcleo das estratégias industriais.

Assim, a disponibilização de uma ferramenta que contribua para direcionar a gestão em direção a um modelo circular poderia gerar transformações significativas na administração do negócio, se tornando viável para ser implementada como um modelo que auxilie na transição do modelo linear para o circular. Ao oferecer um norte baseado nos princípios da economia circular, essa abordagem se tornaria extremamente relevante, possibilitando a redefinição de estratégias e práticas empresariais para atender a critérios mais sustentáveis e alinhados às demandas contemporâneas do mercado e do meio ambiente.

6.3 Implicações práticas e gerenciais

Com isto, nota-se que a adoção da ferramenta proposta nesta pesquisa apresenta implicações gerenciais significativas, na medida em que possibilita a integração estruturada de critérios econômicos, técnicos e ambientais na tomada de decisão industrial, especialmente no setor de síntese de resinas PET. Ao permitir a avaliação sistemática de rotas produtivas com base nos princípios da EC, a abordagem multicritério aplicada favorece a internalização dos aspectos evidenciados no estudo no planejamento estratégico das organizações. Dessa forma, gestores passam a dispor de um instrumento de apoio robusto para identificar oportunidades de circularidade e, ao mesmo tempo, mitigar riscos associados ao desperdício de recursos, conformidade regulatória e reputação corporativa.

Do ponto de vista prático, a ferramenta permite o alinhamento das decisões operacionais com metas de transição para o modelo da EC para a produção de resina PET de médio e longo prazo, viabilizando a construção de métricas mais precisas para a avaliação do desempenho circular. Isso se reflete na possibilidade de reestruturação de processos

produtivos, adoção de matérias-primas secundárias e priorização de tecnologias de síntese com menor impacto ambiental, contribuindo para o aumento da eficiência e da competitividade. Além disso, ao considerar diferentes perfis de especialistas no processo decisório, o modelo assegura uma perspectiva multifacetada que incorpora tanto o conhecimento técnico quanto os aspectos sistêmicos da circularidade, fortalecendo a coerência entre as práticas industriais e os princípios da economia circular.

Adicionalmente, a aplicabilidade da ferramenta em ambientes industriais reais indica seu potencial de replicabilidade em outros setores da cadeia de valor de síntese de polímeros. A estrutura modular e adaptável do modelo multicritério híbrido baseado em lógica *fuzzy* torna-o apto a ser customizado de acordo com diferentes contextos produtivos e objetivos estratégicos. Assim, sua implementação pode servir como catalisador de inovação organizacional e de transformação cultural, estimulando a adoção de uma mentalidade circular entre os diversos níveis hierárquicos da organização, o que é essencial para a consolidação de um modelo de negócios circular.

Dessa forma, a abordagem do estudo foi concluída, culminando na elaboração de três artigos apresentados na Tabela 61. Esses artigos estão alinhados aos objetivos específicos da tese e contribuem para responder ao objetivo geral do estudo: desenvolver um modelo multicritério híbrido, baseado na lógica fuzzy, capaz de avaliar as rotas químicas para a produção de resina PET com base nos conceitos da economia circular.

Tabela 61. Resumo dos artigos elaborados e relação com os objetivos específicos

Título do Artigo	Objetivo aderente	Periódico	Situação
A systemic review for measuring circular economy with multi-criteria methods	a) Definir as características e os critérios do modelo MCDM, considerando os dados qualitativos e quantitativos das rotas de produção da resina PET	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	<i>Environmental Science and Pollution Research</i> , v. 29, n. 21, p. 31597–31611, maio 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-022-18580-w
The circular economy as a basis to select chemical routes to produce polyethylene terephthalate resins	b) Desenvolver o modelo MCDM e testar a sua aplicabilidade com base em dados reais com relação às resinas PET e a sua forma de produção	<i>International Journal of Sustainable Engineering</i>	Em avaliação
Evaluating Circular Economy in Polyethylene Terephthalate Resin Production: A Fuzzy AHP-TOPSIS Approach to Identifying Sustainable Polymerization Routes	c) Identificar como os aspectos da economia circular corroboram para a seleção do método de síntese do PET e na tomada de decisão d) Mensurar o desempenho das rotas químicas de produção de resinas PET por meio de uma abordagem multicritério híbrida baseada na lógica fuzzy, considerando os princípios da economia circular.	<i>Journal of Polymers and the Environment</i>	Em avaliação

O primeiro artigo, intitulado “*A systemic review for measuring circular economy with multi-criteria methods*”, explorou a viabilidade da aplicação de abordagens com o conceito da EC e seus aspectos. A revisão da literatura abordada no estudo permitiu aprofundar os principais sobre os principais métodos MCDM, elencar os mais utilizados e quais se adequariam ao estudo proposto nesta tese. Assim, demonstrou ser fundamental para a escolha do FAHP em consonância com o FTOPSIS para lidar com as peculiaridades do problema de pesquisa da tese.

O segundo artigo, sob o título “*The circular economy as a basis to select chemical routes to produce polyethylene terephthalate resins*”, buscou delimitar os critérios da economia circular alinhados com a tecnologias de produção de resinas PET, fundamentando o conjunto de critérios a serem debatidos pelos especialistas para a aplicação da abordagem multicritério híbrida. Este manuscrito iluminou uma temática pouco explorada no que tange a explorar os aspectos de produção dos polímeros desde a sua rota química, evidenciando como a EC pode se adequar em diferentes vertentes no que condiz com a seleção de rotas cada vez mais circulares.

O terceiro artigo, intitulado “*Evaluating Circular Economy in Polyethylene Terephthalate Resin Production: A Fuzzy AHP-TOPSIS Approach to Identifying Sustainable Polymerization Routes*”, consolida a abordagem da tese demonstrando a aplicabilidade do modelo híbrido FAHP-FTOPSIS para a seleção de tecnologias de produção de resinas PET, considerando três rotas químicas de produção que possuem grande aderência no setor industrial. O estudo demonstrou ser viável a utilização desse tipo de ferramenta multicritério para esse contexto, possibilitando, desse modo, a disponibilidade de um método multicritério relevante para a avaliação das resinas para a indústria e que pode auxiliar diretamente na transição do modelo linear de economia para o modelo circular.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com uma cadeia de fornecimento global, demandas exponenciais por diferentes variações de caminhos para a produção de resinas e formulações de polímeros, a economia dos plásticos torna-se complexa e desafiadora. Nesse contexto, definir métodos para mensurar os aspectos da EC no setor de PET – um dos polímeros mais utilizados e que geram resíduos no mundo – é importante para entender o cenário atual e definir estratégias as quais contribuem para a transição do modelo de produção linear enraizado para uma economia circular. O uso de abordagens multicritérios como ferramenta para a mensuração da EC é um campo novo e com margem para ser explorado em estudos que utilizem os critérios inerentes a EC e a expertise dos especialistas para a tomada de decisões que optem por escolhas pertinentes.

Sob essa perspectiva, questionou-se: como comparar as diferentes rotas de produção da resina com base na seleção de indicadores e critérios pautados no conceito da EC para gerar resinas de PET mais circulares? A partir do questionamento, propôs-se o objetivo dessa tese no qual consiste em **propor um modelo multicritério híbrido pautado na lógica *fuzzy* que auxilie na escolha da melhor resina de PET por meio da mensuração das rotas químicas com base nos conceitos da economia circular**. Para atingir esse objetivo, definiu-se, primeiramente, o seguinte objetivo específico: **definir as características e os critérios do modelo MCDM, considerando os dados qualitativos e quantitativos das rotas de produção da resina PET**. Este objetivo específico foi atingido a partir da realização de uma revisão sistemática que consolidou a aplicação de métodos MCDM com os aspectos da EC, se mostrando uma abordagem relevante para problemas relacionados com a transição para a economia circular que apresentam certa complexidade e envolvem multicritérios. Essa revisão fomentou ainda a construção de um mapa teórico o qual consolidou essa relação identificada e a possibilidade de se utilizar métodos multicritérios com os aspectos da economia circular, apresentados no Capítulo 3 da tese. A partir dos resultados apresentados pelo mapa teórico, selecionou-se uma abordagem multicritério pautada no uso de uma abordagem híbrida associando o método AHP e o TOPSIS. Para reduzir as imprecisões do MCDM e tornar o modelo mais robusto, utilizou-se números *fuzzy*. O mapa teórico e a literatura existente sobre polímeros permitiram ainda notar a ausência de abordagens desse tipo para a avaliação de rotas químicas para a produção de resina PET, uma vez que os diferentes caminhos de produção da resina apresentam peculiaridades que impactam no produto, apresentando um

problema de decisão e, assim, corroborando para a contribuição na temática com um novo campo de utilização do MCDM.

Os critérios para a definição do modelo foram obtidos a partir da análise teórica mencionada e consolidados em detalhes no Capítulo 4, com uma definição profunda e embasada dos três eixos ambiental, econômico e técnico e seus subcritérios elencados, sendo estes: (C1) custo de produção da resina; (C2) quantidade de matéria-prima por kg de resina PET produzida; (C3) custo da matéria-prima; (C4) rendimento; (C5) água consumida; (C6) energia consumida; (C7) resíduos gerados; (C8) reciclabilidade; (C9) matéria-prima utilizada; (C10) densidade da resina PET; (C11) temperatura de polimerização; (C12) viscosidade intrínseca da resina PET. Os critérios e subcritérios convergem com outros trabalhos existentes na temática de avaliação de produção de resinas e com a literatura da EC, permitindo que a abordagem MCDM lide com aspectos pertinentes para a produção da resina PET e que correspondem a EC. Os subcritérios são fundamentais para o problema de decisão almejado no objetivo da tese, sendo estes responsáveis por construir a base do MCDM para a análise das rotas de produção das resinas estudadas.

O segundo objetivo específico da tese foi **desenvolver o modelo MCDM e testar a sua aplicabilidade com base em dados reais com relação às resinas PET e a sua forma de produção**. Esse objetivo foi atingido e demonstrado através do Capítulo 4 que estabeleceu a proposta de desenvolvimento do modelo MCDM e do Capítulo 5 que aplicou os modelos a dois conjuntos de especialistas, sendo estes três especialistas que atuavam diretamente ou com a produção de resinas PET e três especialistas em EC aplicada ao setor de polímeros. O Capítulo 4 demonstrou a utilização do método AHP e do método TOPSIS de maneira híbrida com a utilização de números *fuzzy*, estabelecendo a base para o seu desenvolvimento e aplicação no problema de decisão apresentado. Enquanto o Capítulo 5 fomentou a aplicabilidade do modelo, considerando os critérios e subcritérios definidos no Capítulo 4 e dados oriundos da literatura que são representativos para a realidade da produção de resina PET. Destaca-se que a estruturação do modelo MCDM, desde a definição de seu objetivo até sua aplicação junto aos especialistas, foi consolidada a partir de um desenho metodológico que integrou a abordagem exploratória do DT com os processos estruturados empregados na tomada de decisão multicritério. Essa combinação permitiu, como mencionado anteriormente, analisar a literatura existente, definir a problemática, bem como a formulação e o refinamento da proposta metodológica, garantindo sua aderência ao contexto industrial. Dessa forma, foi possível validar a aplicabilidade do modelo proposto por meio da interação com especialistas

e representantes da indústria, permitindo que a ferramenta desenvolvida se alinhasse às perspectivas do setor.

O terceiro objetivo específico foi definido como **identificar como os aspectos da economia circular corroboram para a seleção do método de síntese do PET e na tomada de decisão**. Esse objetivo foi alcançado no Capítulo 6 da tese, em que os critérios e subcritérios avaliados e ponderados pelos decisores no capítulo anterior, foram discutidos com a literatura referente a EC, sendo elucidado como os principais pontos da EC e sua estrutura se conectam com a seleção de rotas químicas para a produção de resina PET, evidenciando a possibilidade e relevância de se utilizar esse tipo de abordagem para mensurar a EC em um processo de produção relevante para o setor comercial.

Considerando esta possibilidade, definiu-se o último objetivo específico como **mensurar o desempenho das rotas químicas de produção de resinas PET por meio de uma abordagem multicritério híbrida baseada na lógica *fuzzy*, considerando os princípios da EC**. Com base na metodologia aplicada no contexto da EC, utilizando critérios e subcritérios fundamentados na literatura e em programas de seleção de materiais, e avaliados por especialistas e pelo representante da indústria, concluiu-se que a ferramenta desenvolvida demonstra potencial para auxiliar na identificação de aspectos circulares em modelos de produção de resina PET. A abordagem multicritério consolidada permitiu relacionar de forma estruturada as características das três rotas químicas avaliadas com os princípios da EC, proporcionando um suporte analítico para a tomada de decisão e a seleção de alternativas mais alinhadas às diretrizes de sustentabilidade e eficiência produtiva. A ferramenta possui uma interpretação tangível e objetiva, mas que ultrapassa a simplicidade de um único indicador, permite a incorporação de um conjunto de critérios e subcritérios relacionados as duas rotas mais tradicionais atribuídas ao uso de petróleo e a rota que utiliza biomassa como alternativa mais circular no processo de avaliação, proporcionando uma perspectiva mais robusta e completa. Possibilitando, assim, auxiliar especialistas e decisores a mensurarem os aspectos da EC em processos produtivos e, corroborar, para que a cadeia de produção de PET seja desenvolvida com base na EC, uma vez que é possível avaliar o processo produtivo na fase de elaboração da resina PET, propor melhorias e construir um cenário cada vez mais favorável para a circularidade de polímeros.

Dessa forma, a abordagem híbrida *Fuzzy* AHP-TOPSIS resultou em uma avaliação que se ajustou com a literatura da temática, demonstrando a viabilidade de decisores, principalmente do setor de circularidade, de se utilizar a técnica para mensurar diferentes rotas químicas para produção da resina sob o mesmo objetivo de decisão. A ferramenta

utilizada evidenciou a importância da rota química para a produção de PET que utiliza o TPA a partir da extração de material virgem. A rota química por TPA para a produção da resina obteve o maior coeficiente de aproximação (CC_i) com 0,42, seguido pela rota química que considera a obtenção de EG por biomassa e rota tradicional por DMT com 0,37 e 0,35, respectivamente, para os decisores especialistas em circularidade de PET. Se considerado os decisores técnicos, o caminho que utiliza TPA obteve 0,43, seguido por 0,39 da rota que usa EG por Biomassa e 0,37 para a que utiliza o DMT.

O desempenho do coeficiente de aproximação da tecnologia por TPA para a obtenção da resina PET com relação ao conceito da EC é justificada pela dependência do setor ainda para atender uma escala comercial e o desempenho desse tipo de rota para a produção de resina, o qual se mostra mais eficiente que as demais quando considerados os subcritérios de custo de produção da resina, água e energia consumida e o rendimento da matéria-prima utilizada. Contudo, nota-se que a metodologia ponderou de maneira coerente a tecnologia a base de biomassa para a produção de resina PET, aproximando-a ao conceito de circularidade, visto que este tipo de tecnologia considera a utilização de recursos mais circulares, reduzindo a emissão de gases e potencializando a reciclabilidade desde a origem do recurso para a produção da resina (com a utilização de biomassa). E escancara a ausência de escalabilidade nesse tipo de tecnologia, o que impacta diretamente na escolha deste tipo de tecnologia para nortear um modelo econômico, evidenciando uma das principais críticas para alternativas mais circulares.

7.1 Limitações do estudo

Contudo, ressalta-se que a quantidade de decisores é um fator limitante do trabalho, visto a especificidade do tema dificultou o recrutamento de mais decisores para a aplicação do estudo sob os diferentes conjuntos avaliados. E por ser uma abordagem que, apesar de usar dados consolidados na literatura para a definição dos subcritérios, depende da opinião dos decisores para o julgamento das preferências, aumentando a nebulosidades no processo de avaliação. Esse viés buscou ser reduzido através do uso da abordagem *fuzzy* para reduzir as imprecisões e obter decisões mais eficazes. Os decisores foram acompanhados em proximidade para garantir que eles entenderam e concordaram com os critérios e subcritérios angariados com a literatura, garantindo a funcionalidade do método e a sua replicabilidade. Outra limitação identificada consiste justamente na utilização de poucas rotas químicas para

comparar sob diferentes tecnologias, muito por conta da dificuldade de se conseguir dados para ponderar os critérios e subcritérios.

Outro ponto limitante é que, apesar do método Fuzzy AHP-TOPSIS considerar um conjunto de critérios e subcritérios – além da opinião de especialistas – formulando uma abordagem robusta que pode ser aplicada em diferentes cenários, ele não substitui métodos mais complexos como por exemplo a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Isso ocorre porque o Fuzzy AHP-TOPSIS se trata de uma metodologia voltada principalmente para a tomada de decisões multicritério, focando na priorização e seleção de alternativas com base em parâmetros definidos, enquanto a ACV fornece uma análise mais detalhada e abrangente dos impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até o descarte final.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com isto, sugere-se que novas tecnologias sejam incorporadas na abordagem para estudos futuros, a fim de analisar as diferentes rotas e se ter uma avaliação mais completa e que se alinha com as peculiaridades do processo de produção da resina PET, que exigem diferentes formulações e tecnologias para atender as dinâmicas do mercado. Ressalta-se ainda como limitação deste estudo a utilização exclusiva do método Fuzzy AHP-TOPSIS para a análise multicritério. Embora essa abordagem ter sido justificada pela revisão de literatura apresentada, ser robusta e eficiente na priorização e seleção de alternativas, a dependência de uma única metodologia pode restringir a diversidade de perspectivas na tomada de decisão. Sugere-se, portanto, que estudos futuros explorem a combinação de outras metodologias multicritério, como o ELECTRE, o PROMETHEE ou o VIKOR, que possuem diferentes formas de lidar com incertezas e podem oferecer resultados complementares. A utilização de uma abordagem multimétodo permitiria uma análise mais abrangente, proporcionando uma visão mais completa e, potencialmente, mais precisa das alternativas avaliadas.

Sugere-se, ainda, o desenvolvimento de estudos que integrem MCDM com análises de ciclo de vida, adotando-os como abordagens complementares, conforme o nível de profundidade analítica e os objetivos específicos da pesquisa. Investigações que combinem métodos MCDM com outras ferramentas de mensuração relevantes para a economia circular podem ampliar a compreensão sobre a complexidade das decisões que corroborem para a transição do sistema linear para o circular, evidenciando oportunidades para a formulação de novos modelos dentro desse arcabouço teórico. Tais iniciativas podem contribuir para a

construção de ferramentas decisórias mais eficientes, com potencial de aplicação em distintos contextos e que respondam de forma adequada aos múltiplos níveis da economia circular.

REFERÊNCIAS

- ABBASBANDY, S.; HAJIGHASEMI, S. **A Fuzzy Distance between Two Fuzzy Numbers**. (E. Hüllermeier, R. Kruse, F. Hoffmann, Eds.) Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Applications. **Anais...**: Communications in Computer and Information Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- ABDULLAH, L.; ZULKIFLI, N. Integration of fuzzy AHP and interval type-2 fuzzy DEMATEL: An application to human resource management. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 9, p. 4397–4409, jun. 2015.
- ABIPET. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **Associados**. Disponível em: <https://abipet.org.br/associados/>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- ABIPLAST. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PLÁSTICO. **Perfil 2023**: as indústrias de transformação e reciclagem de plástico no Brasil. São Paulo, 2023. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13230**: embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis: identificação e simbologia. Rio de Janeiro, 2008. 8 p.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Brasil: Grappa Editora e Comunicação, 2020. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2020.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2022.
- AGARSKI, B. *et al.* Evaluation of the environmental impact of plastic cap production, packaging, and disposal. **Journal of Environmental Management**, v. 245, p. 55–65, set. 2019.
- AHMED, A.; TORRES, A. I. Design and Optimization of Circular Economy Networks: A Case Study of Polyethylene Terephthalate (PET). **Systems and Control Transactions**, v. 3, p. 629–634. 2024.
- ALAMEREW, Y. A. *et al.* A Multi-Criteria Evaluation Method of Product-Level Circularity Strategies. **Sustainability**, v. 12, n. 12, p. 5129, 23 jun. 2020.
- ALAMEREW, Y. A.; BRISSAUD, D. Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. **Journal of Remanufacturing**, v. 9, n. 3, p. 169–185, out. 2019.
- ALAOUI, M. E. A Fuzzy Multiplicative Performance Indicator to Measure Circular Economy Efficiency. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, v. 5, n. 6, p. 1118–1127, 1 dez. 2020.
- ALKAYA, E.; DEMIRER, G. N. Reducing water and energy consumption in chemical industry by sustainable production approach: a pilot study for polyethylene terephthalate production. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 119–128, jul. 2015.
- ALMEIDA, A.T. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Atlas, 2013.
- ALONSO-JIMÉNEZ, A.; REGUEIRO GONZÁLEZ-BARROS, M. The paradox of the circular economy in the raw materials industry. **E3S Web of Conferences**, v. 349, p. 01003, 2022.

- AL-SALEM, S. M.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. **Waste Management**, v. 29, n. 10, p. 2625–2643, out. 2009.
- ALVES, E. P. R. *et al.* Renewable Energy Potential and CO2 Performance of Main Biomasses Used in Brazil. **Energies**, v. 16, n. 9, p. 3959, 8 maio 2023.
- AMANNA, R. *et al.* Plastics: Toward a Circular Bioeconomy. Em: **Biomass, Biofuels, Biochemicals**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 781–811.
- ANDERSEN, M. S. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. **Sustainability Science**, v. 2, n. 1, p. 133–140, 28 mar. 2007.
- ANDRADY, A. L. Persistence of Plastic Litter in the Oceans. In: BERGMANN, M.; GUTOW, L.; KLAGES, M. (Eds.). **Marine Anthropogenic Litter**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 57–72.
- ARANTES, R. F. M. *et al.* A fuzzy multicriteria group decision approach for circular business models prioritization. **Production**, v. 32, p. e20220019, 2022.
- ARÁUJO, R. F. R. DESIGN THINKING COMO METODOLOGIA NO ENSINO DE CIÊNCIAS: CONFEÇÃO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO NO CURSO TÉCNICO EM AGRONEGÓCIO. **Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista – ENCITEC**, v. 14, n. 1, p. 291–304, 29 abr. 2024.
- ARAVOSSIS, K. G. *et al.* Development of a Holistic Assessment Framework for Industrial Organizations. **Sustainability**, v. 11, n. 14, p. 3946, 19 jul. 2019.
- AWAJA, F.; PAVEL, D. Recycling of PET. **European Polymer Journal**, v. 41, n. 7, p. 1453–1477, 2005.
- BABBITT, C. W. *et al.* The role of design in circular economy solutions for critical materials. **One Earth**, v. 4, n. 3, p. 353–362, mar. 2021.
- BACHÉR, J. *et al.* Advancing the circular economy through group decision-making and stakeholder involvement. **Detritus**, v. In Press, n. 0, p. 1, 2018.
- BANIHABIB, M. E.; HASHEMI-MADANI, F.-S.; FORGHANI, A. Comparison of Compensatory and non-Compensatory Multi Criteria Decision Making Models in Water Resources Strategic Management. **Water Resources Management**, v. 31, n. 12, p. 3745–3759, set. 2017.
- BANIHABIB, M. E.; SHABESTARI, M. H. Fuzzy Hybrid MCDM Model for Ranking the Agricultural Water Demand Management Strategies in Arid Areas. **Water Resources Management**, v. 31, n. 1, p. 495–513, jan. 2017.
- BARNES, D. K. A. *et al.* Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 364, n. 1526, p. 1985–1998, 27 jul. 2009.
- BARRAK, E. *et al.* Applying Multi-Criteria Decision Analysis to Combine Life Cycle Assessment with Circularity Indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 451, p. 141872, abr. 2024.
- BARREIRO-GEN, M.; LOZANO, R. How circular is the circular economy? Analysing the implementation of circular economy in organisations. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, n. 8, p. 3484–3494, dez. 2020.

BENAVIDES, P. T.; DUNN, J. B.; HAN, J.; *et al.* Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled, and Bio-Derived PET Bottles. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 8, p. 9725–9733, 2018.

BENDER-SALAZAR, R. Design Thinking as an Effective Method for Problem-Setting and Needfinding for Entrepreneurial Teams Addressing Wicked Problems. **Journal of Innovation and Entrepreneurship**, v. 12, n. 1, p. 24, 13 abr. 2023.

BENYUS, J. M. **Biomimicry: Innovation inspired by nature**. [S.l.]: Perennial New York, 2002.

BERTONI, M. Multi-Criteria Decision Making for Sustainability and Value Assessment in Early PSS Design. **Sustainability**, v. 11, n. 7, p. 1952, 2 abr. 2019.

BLOMSMA, F.; BRENNAN, G. The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity: The Emergence of Circular Economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 603–614, jun. 2017.

BOCKEN, N. M. P. *et al.* Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308–320, 3 jul. 2016.

BOCKEN, N. M. P. *et al.* Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy: Taking Circularity to the Next Level. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 476–482, jun. 2017.

BOJADZIEV, G.; BOJADZIEV, M. **Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Applications**. [s.l.] WORLD SCIENTIFIC, 1996. v. 5

BORRELLE, S. B. *et al.* Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. **Science**, v. 369, n. 6510, p. 1515–1518, 18 set. 2020.

BOULDING, K. E. The economics of the coming spaceship earth. **New York**, p. 1-17, 1966.

BRANS, J.; VINCKE, P. A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). **Management science**, v. 31, n. 6, p. 647-656, 1985.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria. **Plano Nacional de Economia Circular: 2025–2034**. Brasília, DF: MDIC, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/enec/plano-nacional/plano-nacional-de-economia-circular-2025-2034.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2025

BRENNER, W.; UEBERNICKEL, F.; ABRELL, T. Design Thinking as Mindset, Process, and Toolbox. In: BRENNER, W.; UEBERNICKEL, F. (Org.). **Design Thinking for Innovation**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 3–21.

BRIDGMAN, P. W. **Dimensional analysis**. Yale university press, 1922.

BRITO, T. F. N.; SANTOS JUNIOR, B. F.; ALMEIDA, A. R. Potencial de complementaridade e geração de energia através da biomassa de resíduos agrícolas no Piauí. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 10, n. 2, p. 53–62, 2023.

BROOKS, A. L.; WANG, S.; JAMBECK, J. R. The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. **Science Advances**, v. 4, n. 6, p. eaat0131, jun. 2018.

BS8001. **BS8001 Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations – Guide.** BSI Group, 2017.

BUCCI, K.; TULIO, M.; ROCHMAN, C. M. What is known and unknown about the effects of plastic pollution: A meta-analysis and systematic review. **Ecological Applications**, v. 30, n. 2, mar. 2020.

BUCKLEY, J. J. Fuzzy hierarchical analysis. **Fuzzy sets and systems**, v. 17, n. 3, p. 233-247, 1985.

BUNKE, S. et al. (Invited) Enhancing PET Plastic Circularity and Decarbonization through Process Electrification and Intensification. **ECS Meeting Abstracts**, v. MA2024-02, n. 69, p. 4852–4852, 22 nov. 2024.

CABALLERO, S. R. et al. Challenge-Based Learning and Design Thinking in Higher Education: Institutional Strategies for Linking Experiential Learning, Innovation, and Academic Performance. **Innovations in Education and Teaching International**, p. 1–18, 27 mar. 2024.

CAI, Y.; LIN, J.; ZHANG, R. When and How to Implement Design Thinking in the Innovation Process: A Longitudinal Case Study. **Technovation**, v. 126, p. 102816, ago. 2023.

CAVALCANTE, S.; VIEIRA, D.; MELO, I. **Chemical Recycling: Comparative Study about the Depolymerization of PET Waste-Bottles to Obtain Terephthalic Acid.** The 23rd International Electronic Conference on Synthetic Organic Chemistry. **Anais...MDPI**, 15 nov. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2504-3900/41/1/78>>. Acesso em: 11 nov. 2024

CERRETA, M. et al. Regenerative scapes: Incremental Evaluation for the Regeneration of Unresolved Territories in East Naples. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 6975, 27 ago. 2020.

CERRETA, M.; DALDANISE, G.; SPOSITO, S. Culture-led regeneration for urban spaces: Monitoring complex values networks in action. **Urbani izziv**, v. 29, n. supplement, p. 9–28, 28 set. 2018.

CHATTERJEE, P.; STEVIĆ, Ž. A two-phase fuzzy AHP-fuzzy TOPSIS model for supplier evaluation in manufacturing environment. **Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications**, v. 2, n. 1, 15 abr. 2019.

CHAUHAN, A.; JAKHAR, S. K.; CHAUHAN, C. The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123854, jan. 2021.

CHEN, C. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. **Fuzzy sets and systems**, v. 114, n. 1, p. 1-9, 2000.

CHEN, J.-K.; CHEN, I.-S. Using a novel conjunctive MCDM approach based on DEMATEL, fuzzy ANP, and TOPSIS as an innovation support system for Taiwanese higher education. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 3, p. 1981–1990, 15 mar. 2010.

CHEW, X. *et al.* Circular economy of medical waste: novel intelligent medical waste management framework based on extension linear Diophantine fuzzy FDOSM and neural network approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 21, p. 60473–60499, 10 abr. 2023.

- DAMAYANTI; WU, Ho-Shing. Strategic Possibility Routes of Recycled PET. **Polymers**, v. 13, n. 9, p. 1475, 2021.
- DE PASCALE, A.; ARBOLINO, R.; SZOPIK-DEPCZYŃSKA, K. *et al.* A systematic review for measuring circular economy: the 61 indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 124942, 2021.
- DELOUYI, F. L.; RANJBARI, M.; SHAMS ESFANDABADI, Z. A Hybrid Multi-Criteria Decision Analysis to Explore Barriers to the Circular Economy Implementation in the Food Supply Chain. **Sustainability**, v. 15, n. 12, p. 9506, 13 jun. 2023.
- DEMIRKAN, A. A.; DURMUŞOĞLU, Z. D. U. Evaluation of the production planning policy alternatives in a pet resin production plant: A CASE STUDY FROM TURKEY. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 17, n. 2, p. 1–24, 2020.
- DESHPANDE, P. C. *et al.* Multi-criteria decision analysis (MCDA) method for assessing the sustainability of end-of-life alternatives for waste plastics: A case study of Norway. **Science of The Total Environment**, v. 719, p. 137353, jun. 2020.
- DI LORENZO, M. L. Crystallization of Poly(ethylene terephthalate): A Review. **Polymers**, v. 16, n. 14, p. 1975, 10 jul. 2024.
- DIAZ-BALTEIRO, L.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C. Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: A critical review. **European Journal of Operational Research**, v. 258, n. 2, p. 607–616, abr. 2017.
- DONG, K.; ELANGO VAN, S.; SANG, R.; *et al.* Selective catalytic two-step process for ethylene glycol from carbon monoxide. **Nature Communications**, v. 7, n. 1, p. 12075, 2016.
- DOS SANTOS GONÇALVES, P. V.; CAMPOS, L. M. S. A systemic review for measuring circular economy with multi-criteria methods. **Environmental Science and Pollution Research**, 10 jan. 2022.
- DRAGOMIR, D.; TOFANĂ, S.; DRAGOMIR, M. **Developing a Circularity Cost Approach for the Wood Products Industry**. New Trends in Sustainable Business and Consumption. **Anais...Editura ASE**, 8 jun. 2023. Disponível em: <<https://conference.ase.ro/papers/2023/23016.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2024
- DRIS, R. *et al.* Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles. **Environmental Chemistry**, v. 12, n. 5, p. 539, 2015.
- EASAC. EUROPEAN ACADEMIES SCIENCE ADVISORY COUNCIL; DEUTSCHE AKADEMIE DER NATURFORSCHER LEOPOLDINA (EDS.). **Packaging plastics in the circular economy**. Halle (Saale): EASAC Secretariat, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina - German National Academy of Sciences, 2020.
- EKUOBASE, G. O.; OLUTAYO, V. A. Fuzzy Analytical Hierarchical Process model and ICT maturity model of SMES for ICT maturity measurement of Nigerian Service Firms. **African Journal of Computing & ICT**, v. 8, n. 3, set. 2015.
- ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2741–2751, jan. 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **O diagrama de borboleta: visualizando a economia circular**. 2019. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/o-diagrama-de-borboleta>. Acesso em: 29 mai. 2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition**. 2013. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/> Acesso em: 29 mai. 2022.

EMOVON, I.; OGHENENYEROVWHO, O. S. Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review. **Results in Materials**, v. 7, p. 100115, set. 2020.

ERCEG, O.; MARGETA, J. SELECTION OF FOOD WASTE MANAGEMENT OPTION BY PROMETHEE METHOD. **Elektronički časopis građevinskog fakulteta Osijek**, p. 87–97, 23 dez. 2019.

ERNI-CASSOLA, G. *et al.* Distribution of plastic polymer types in the marine environment; A meta-analysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 369, p. 691–698, maio 2019.

ERTUGRUL, İ.; KARAKAŞOĞLU, N. Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods for facility location selection. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, n. 7–8, p. 783–795, nov. 2008.

FAKIROV, S. (ED.). **Handbook of thermoplastic polyesters: homopolymers, copolymers, blends, and composites**. Weinheim: Wiley-VCH, 2002.

FENG, J. *et al.* An integrated decision-making method for locating parking centers of recyclable waste transportation vehicles. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 157, p. 102569, jan. 2022.

FERRONATO, N. *et al.* How to improve recycling rate in developing big cities: An integrated approach for assessing municipal solid waste collection and treatment scenarios. **Environmental Development**, v. 29, p. 94–110, mar. 2019.

FIDAN, F. Ş.; AYDOĞAN, E. K.; UZAL, N. An integrated life cycle assessment approach for denim fabric production using recycled cotton fibers and combined heat and power plant. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125439, mar. 2021.

FOSTER, M. K. Design Thinking: A Creative Approach to Problem Solving. **Management Teaching Review**, v. 6, n. 2, p. 123–140, jun. 2021.

FRAGAPANE, G.; LODGAARD, E.; LYGSTAD, O. V. A Survey on Current Practices, Strategies and Research Needs for Circular Manufacturing of Plastics. Em: SILVA, F. J. G. *et al.* (Eds.). **Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 842–849.

FRANKLIN ASSOCIATES. **Cradle-to-resin life cycle analysis of polyethylene terephthalate resin**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://napcor.com/wp-content/uploads/2020/10/2020-PET-Resin-LCA-FINAL-2020-09-24.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2024.

FRISK, J. E.; BANNISTER, F. Applying design thinking to the decision-making process: a field study in Swedish local authorities. **Management Decision**, v. 60, n. 1, p. 66–85, 2022.

- FURNESS, M.; BELLO-MENDOZA, R.; CHAMY MAGGI, R. The Biofactory: Quantifying Life Cycle Sustainability Impacts of the Wastewater Circular Economy in Chile. **Sustainability**, v. 15, n. 22, p. 16077, 17 nov. 2023.
- GARCIA, E. C. Você conhece o lado químico do PET? **Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens**, v. 9, n. 4, 1997.
- GARCIA-BERNABEU, A. *et al.* A Process Oriented MCDM Approach to Construct a Circular Economy Composite Index. **Sustainability**, v. 12, n. 2, p. 618, 15 jan. 2020.
- GARCÍA-BUSTAMANTE, C. A. *et al.* Development of indicators for the sustainability of the sugar industry. **Environmental & Socio-economic Studies**, v. 6, n. 4, p. 22–38, 1 dez. 2018.
- GEISSDOERFER, M. *et al.* Circular business models: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123741, 20 dez. 2020.
- GEISSDOERFER, M. *et al.* The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, fev. 2017.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. The entropy law and the economic process. In: **The Entropy Law and the Economic Process**. Harvard university press, 1971.
- GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 7 jul. 2017.
- GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11–32, fev. 2016.
- GHOSH, T. *et al.* Towards a circular economy for PET bottle resin using a system dynamics inspired material flow model. **Journal of Cleaner Production**, v. 383, p. 135208, jan. 2023.
- GOMES, L. A. *et al.* Screening of waste materials as adjuvants for drying sewage sludge based on environmental, technical and economic criteria. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120927, jun. 2020.
- GOOGLE TRENDS. **Termo de busca: circular economy**. 2022. Disponível em: <https://trends.google.com>. Acesso em: 22 maio. 2022.
- GOVINDAN, K.; HASANAGIC, M. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1–2, p. 278–311, 17 jan. 2018.
- GRABIEL, T. *et al.* Achieving sustainable production and consumption of virgin plastic polymers. **Frontiers in Marine Science**, v. 9, p. 981439, 2 set. 2022.
- GRACIDA-ALVAREZ, U. R.; XU, H.; BENAVIDES, P. T.; *et al.* Circular Economy Sustainability Analysis Framework for Plastics: Application for Poly(ethylene Terephthalate) (PET). **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, n. 2, p. 514–524, 2023.
- GRAEDEL, Thomas E. On the concept of industrial ecology. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 21, n. 1, p. 69-98, 1995.
- GRANTA DESIGN. **CES Selector – Software and Database for Material Selection**. [s.l.: s.n.], 2017.

GREGERSEN, E. **Polyester**. 2023. Disponível em:

<https://www.britannica.com/science/polyester>. Acesso em: 18 fev. 2023

GRIPPO, V.; ROMANO, S.; VASTOLA, A. Multi-criteria Evaluation of Bran Use to Promote Circularity in the Cereal Production Chain. **Natural Resources Research**, v. 28, n. S1, p. 125–137, ago. 2019.

GU, F. *et al.* From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. **Science of The Total Environment**, v. 601–602, p. 1192–1207, dez. 2017.

GUE, I. H. V. *et al.* Sector perception of circular economy driver interrelationships. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123204, dez. 2020.

GÜNGÖR, B. *et al.* Circularity Tools and Frameworks for New Buildings. Em: BRAGANÇA, L. *et al.* (Eds.). **Circular Economy Design and Management in the Built Environment**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. p. 431–458.

GUPTA, H.; KUMAR, A.; WASAN, P. Industry 4.0, cleaner production and circular economy: An integrative framework for evaluating ethical and sustainable business performance of manufacturing organizations. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, p. 126253, maio 2021.

GUZMÁN-COUTIÑO, H. *et al.* Application of design thinking in EE Technological Competences in Education. **Revista de Educación Superior**, v. 8, n. 19, 30 dez. 2024.

HAAS, W. *et al.* How Circular is the Global Economy? An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 5, p. 765–777, 2015.

HALE, R. C. *et al.* A Global Perspective on Microplastics. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 125, n. 1, jan. 2020.

HAN, Z. *et al.* Catalytic Hydrogenation of Cyclic Carbonates: A Practical Approach from CO₂ and Epoxides to Methanol and Diols. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 51, n. 52, p. 13041–13045, 2012. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201207781>>. Acesso em: 6 nov. 2023.

HAWKEN, P.; LOVINS, A. B.; LOVINS, L. H. **Natural capitalism: The next industrial revolution**. [S.l.]: Routledge, 2013.

HERMOSO-ORZÁEZ, M. J. *et al.* Environmental Criteria for Assessing the Competitiveness of Public Tenders with the Replacement of Large-Scale LEDs in the Outdoor Lighting of Cities as a Key Element for Sustainable Development: Case Study Applied with PROMETHEE Methodology. **Sustainability**, v. 11, n. 21, p. 5982, 28 out. 2019.

HOMRICH, A. S. *et al.* The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 525–543, fev. 2018.

HOPKINSON, P. *et al.* Managing a Complex Global Circular Economy Business Model: Opportunities and Challenges. **California Management Review**, v. 60, n. 3, p. 71–94, maio 2018.

HURLEY, R. R.; NIZZETTO, L. Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 1, p. 6–11, fev. 2018.

HUYSMAN, S. *et al.* Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 46–54, maio 2017.

HWANG, C.-L.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. v. 186.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva: ISO, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044**: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2006b.

ISLAM, M. T.; HUDA, N. Reshaping WEEE management in Australia: An investigation on the untapped WEEE products. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, p. 119496, mar. 2020.

JANKAUSKAITE, V.; MACIJAUSKAS, G.; LYGAITIS, R. Polyethylene Terephthalate Waste Recycling and Application Possibilities: a review. **Materials Science**, v. 14, n. 2, p. 119–127, 12 jun. 2008.

KAR, A.; RAI, R. N. QFD-based hybrid neutrosophic MCDM approach with Six Sigma evaluation for sustainable product design in Industry 4.0. **Kybernetes**, 2024.

KARAYILAN, S. *et al.* Prospective evaluation of circular economy practices within plastic packaging value chain through optimization of life cycle impacts and circularity. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 173, p. 105691, 2021.

KARIMI, A. R. *et al.* Using of the fuzzy TOPSIS and fuzzy AHP methods for wastewater treatment process selection. **International Journal of Academic Research**, v. 3, n. 1, 2011.

KASZTELAN, A. How Circular Are the European Economies? A Taxonomic Analysis Based on the INEC (Index of National Economies' Circularity). **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7613, 15 set. 2020.

KAYA, T.; KAHRAMAN, C. An integrated fuzzy AHP–ELECTRE methodology for environmental impact assessment. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 7, p. 8553–8562, jul. 2011.

KAŹMIERCZAK, U. *et al.* Quantitative and Qualitative Research on the Waste from the Mining of Rock Raw Materials in Lower Silesia. **Minerals**, v. 8, n. 9, p. 375, 30 ago. 2018.

KAŹMIERCZAK, U.; BLACHOWSKI, J.; GÓRNIAK-ZIMROZ, J. Multi-Criteria Analysis of Potential Applications of Waste from Rock Minerals Mining. **Applied Sciences**, v. 9, n. 3, p. 441, 28 jan. 2019.

KAZUVA, E. *et al.* GIS- and MCD-based suitability assessment for optimized location of solid waste landfills in Dar es Salaam, Tanzania. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 9, p. 11259–11278, mar. 2021.

KEIJER, T.; BAKKER, V.; SLOOTWEG, J. C. Circular chemistry to enable a circular economy. **Nature Chemistry**, v. 11, n. 3, p. 190–195, mar. 2019.

KHAN, F. R.; BOYLE, D.; CHANG, E.; BURY, N. R. Do polyethylene microplastic beads alter the intestinal uptake of Ag in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)? Analysis of the MP vector effect using in vitro gut sacs. **Environmental Pollution**, v. 231, p. 200–206, 2017.

- KHAN, I.; KABIR, Z. Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability assessment. **Renewable Energy**, v. 150, p. 320–333, maio 2020.
- KIONG, S. C. *et al.* Decision Making with the Analytical Hierarchy Process (AHP) for Material Selection in Screw Manufacturing for Minimizing Environmental Impacts. **Applied Mechanics and Materials**, v. 315, p. 57–62, abr. 2013.
- KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221–232, dez. 2017.
- KLEMES, J. J.; FAN, Y. V.; JIANG, P. Plastics: friends or foes? The circularity and plastic waste footprint. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 43, n. 13, p. 1549–1565, 3 jul. 2021.
- KOLE, P. J. *et al.* Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 10, p. 1265, 20 out. 2017.
- KORHEC, R. *et al.* Modern decision-making mechanism in the process of development of small farms. **Ekonomika poljoprivrede**, v. 70, n. 2, p. 437–451, 19 jun. 2023.
- KRISHNAN, P. S. G.; KULKARNI, S. T. Polyester resins. In: **Polyesters and Polyamides**. [s.l.] Elsevier, 2008. p. 3–40.
- KRSTIĆ, M. *et al.* Logistics 4.0 toward circular economy in the agri-food sector. **Sustainable Futures**, v. 4, p. 100097, 2022.
- KUMAR, A. *et al.* A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 596–609, mar. 2017.
- KUMAR, P. Role of Plastics on Human Health. **The Indian Journal of Pediatrics**, v. 85, n. 5, p. 384–389, maio 2018.
- KUMAR, R.; JAGADISH; RAY, A. Selection of Material for Optimal Design Using Multi-criteria Decision Making. **Procedia Materials Science**, v. 6, p. 590–596, 2014.
- KUZOMA, V.; DOVGAL, O. **Application of circular economy assessment indicators. Actual problems of innovative economy and law**, v. 2023, n. 4, p. 75–79, 26 dez. 2023.
- LAM, C.-S. *et al.* A Comprehensive Analysis of Plastics and Microplastic Legislation Worldwide. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 229, n. 11, p. 345, nov. 2018.
- LAMB, J. B. *et al.* Plastic waste associated with disease on coral reefs. **Science**, v. 359, n. 6374, p. 460–462, 26 jan. 2018.
- LANDOLFI, L. *et al.* Energy-saving approach for mechanical properties enhancement of recycled PET additively manufactured by MEX. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 41, p. e01038, set. 2024.
- LAU, W. W. Y. *et al.* Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. **Science**, v. 369, n. 6510, p. 1455–1461, 18 set. 2020.

- LEAL FILHO, W. et al. Design Thinking for Sustainable Development: A Bibliometric Analysis and Case Study Research. **Journal of Cleaner Production**, v. 455, p. 142285, maio 2024.
- LEBRETON, L.; ANDRADY, A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. **Palgrave Communications**, v. 5, n. 1, p. 6, dez. 2019.
- LEE, S. Y.; HU, J.; LIM, M. K. Maximising the circular economy and sustainability outcomes: An end-of-life tyre recycling outlets selection model. **International Journal of Production Economics**, v. 232, p. 107965, fev. 2021.
- LIANG, Y. et al. An analysis of the plastic waste trade and management in Asia. **Waste Management**, v. 119, p. 242–253, jan. 2021.
- LIEDER, M.; RASHID, A. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 36–51, mar. 2016.
- LIN, K.-Y.; CHU, I.-T. A Design Thinking Approach to Integrate Supply Chain Networks for Circular Supply Chain Strategy in Industry 4.0. **Industrial Management & Data Systems**, 16 dez. 2024.
- LINDER, M.; SARASINI, S.; VAN LOON, P. A Metric for Quantifying Product-Level Circularity: Product-Level Circularity Metric. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 545–558, jun. 2017.
- LISIECKI, M.; DAMGAARD, A.; RAGAERT, K.; et al. Circular economy initiatives are no guarantee for increased plastic circularity: A framework for the systematic comparison of initiatives. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 197, p. 107072, 2023.
- LUO, N.; JI, Y.; MAO, Y.; et al. Syn-gas-based mono ethylene glycol synthesis in Pujing Chemical. **Applied Petrochemical Research**, v. 2, n. 1–2, p. 23–26, 2012.
- LYLE, J. T. **Regenerative design for sustainable development**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1996.
- MACDONALD, W.A. New advances in poly(ethylene terephthalate) polymerization and degradation. **Polymer International**, v. 51, n. 10, p. 923–930, 2002.
- MALEST, A. L.; GABOR, M. R. Critical Raw Material in Circular Economy Context for Europe: A Decision Tree and Two-Step Cluster Analysis Approach. Em: MOLDOVAN, L.; GLIGOR, A. (Eds.). **The 17th International Conference Interdisciplinarity in Engineering**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. v. 926p. 375–388.
- MALIK, N. et al. An overview on PET waste recycling for application in packaging. **International Journal of Plastics Technology**, v. 21, n. 1, p. 1–24, jun. 2017.
- MANSOR, M. R.; SAPUAN, S. M.; ZAINUDIN, E. S.; NURAINI, A. A.; HAMBALI, A. Application of integrated AHP-TOPSIS method in hybrid natural fiber composites materials selection for automotive parking brake lever component. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 8, n. 5, p. 431–439, abr. 2014.
- MARDANI, A. et al. Multiple criteria decision-making techniques and their applications – a review of the literature from 2000 to 2014. **Economic Research-Ekonomska Istraživanja**, v. 28, n. 1, p. 516–571, jan. 2015.

MARKATOS, D. N.; PANTELAKIS, S. G. Implementation of a Holistic MCDM-Based Approach to Assess and Compare Aircraft, under the Prism of Sustainable Aviation. **Aerospace**, v. 10, n. 3, p. 240, 1 mar. 2023.

MARTINS, F.; ALMEIDA, M. F.; CALILI, R.; *et al.* Design Thinking Applied to Smart Home Projects: A User-Centric and Sustainable Perspective. **Sustainability**, v. 12, n. 23, p. 10031, 2020.

MARTINS, G.A. **Modelo Fuzzy AHP-TOPSIS para avaliação e seleção de tecnologias de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis**. 2017. Dissertação de Mestrado, 105p. PUC-Rio de Janeiro, 2017.

MATHEWS, J. A.; TAN, H. Circular economy: Lessons from China. **Nature**, v. 531, n. 7595, p. 440–442, 24 mar. 2016.

MATHIYAZHAGAN, K.; GNANAVELBABU, A.; LOKESH PRABHURAJ, B. A sustainable assessment model for material selection in construction industries perspective using hybrid MCDM approaches. **Journal of Advances in Management Research**, v. 16, n. 2, p. 234–259, 23 abr. 2019.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle: Remaking the way we make things**. North Point Press, 2010.

MELKONYAN, A. *et al.* Sustainability assessment of last-mile logistics and distribution strategies: The case of local food networks. **International Journal of Production Economics**, v. 228, p. 107746, out. 2020.

MERLI, R.; PREZIOSI, M.; ACAMPORA, A. How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 703–722, mar. 2018.

MESA, J. A. Developing a Material Selection Index Based on Circularity: A Multiple Lifecycle Approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 199, p. 107240, dez. 2023.

MESA, J.; GONZÁLEZ-QUIROGA, A.; MAURY, H. Developing an indicator for material selection based on durability and environmental footprint: A Circular Economy perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 160, p. 104887, set. 2020.

MESTRE, A.; COOPER, T. Circular Product Design. A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy. **The Design Journal**, v. 20, n. sup1, p. S1620–S1635, 28 jul. 2017.

MISHRA, S. *et al.* Evaluating indicators for international manufacturing network under circular economy. **Management Decision**, v. 57, n. 4, p. 811–839, 18 abr. 2019.

MOAYERI, M. *et al.* Comparison of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS Methods for Math Teachers Selection. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 8, n. 13, 3 jul. 2015.

MORIOKA, T. *et al.* Eco-efficiency of Advanced Loop-closing Systems for Vehicles and Household Appliances in Hyogo Eco-town. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 205–221, out. 2005.

MOUSAVI-NASAB, S. H.; SOTOUDEH-ANVARI, A. A new multi-criteria decision-making approach for sustainable material selection problem: A critical study on rank reversal problem. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 466–484, maio 2018.

- MUERZA, V.; URCIUOLI, L.; ZAPATA HABAS, S. Enabling the circular economy of bio-supply chains employing integrated biomass logistics centers - A multi-stage approach integrating supply and production activities. **Journal of Cleaner Production**, v. 384, p. 135628, jan. 2023.
- MULLER, L. N. P. S.; DELAI, I.; ALCANTARA, R. L. C. Typology in circular economy: A proposal based on resource value retention options and value chain perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 473, p. 143484, 2024.
- NAKATANI, J.; HIRAO, Masahiko. Multicriteria Design of Plastic Recycling Based on Quality Information and Environmental Impacts. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 2, p. 228–244, 2011.
- NARA, E. O. B. et al. Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of Brazil's plastic industry. **Sustainable Production and Consumption**, v. 25, p. 102–122, jan. 2021.
- NIERO, M.; KALBAR, P. P. Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 140, p. 305–312, jan. 2019.
- NIKANOROVA, M.; IMONIANA, J. O.; STANKEVICIENE, J. Analysis of social dimension and well-being in the context of circular economy. **International Journal of Global Warming**, v. 21, n. 3, p. 299, 2020.
- NIKANOROVA, M.; STANKEVIČIENĖ, J. Development of environmental pillar in the context of circular economy assessment: Baltic Sea Region case. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, v. 8, n. 1, p. 1209–1223, 30 set. 2020.
- NIKOU EI, M. A.; MOSAFFA, E.; AMIRI, M. The selection of polyethersulfone/polyvinylpyrrolidone films for industrial application using the multiple-criteria decision-making approach. **Polymer Composites**, v. 42, n. 11, p. 6106–6115, nov. 2021.
- NISTICO, R. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. **Polymer Testing**, v. 90, p. 106707, out. 2020.
- NORONHA, T. L. **Cadeias reversas de reciclagem PET: análise de oportunidades de melhoria**. 2004. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) – Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2004.
- NOWAKOWSKI, P.; KRÓL, A.; MRÓWCZYŃSKA, B. Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation. **Waste Management**, v. 69, p. 377–392, nov. 2017.
- NURSYAMSI, N.; INDRAWAN, I.; THERESA, V. Effect of HDPE plastic waste towards batako properties. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 309, p. 012013, fev. 2018.
- OBBARD, R. W. *et al.* Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. **Earth's Future**, v. 2, n. 6, p. 315–320, jun. 2014.
- ONO, S.; TSUSAKA, T. W. Assessing the Selection of PET Recycling Options in Japan: Multi-Criteria Decision Analysis. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 32, n. 5, p. 4761–4770, 8 set. 2023.

- OPRICOVIC, S.; TZENG, G. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. **European journal of operational research**, v. 178, n. 2, p. 514-529, 2007.
- ORDU, M.; DER, O. Polymeric Materials Selection for Flexible Pulsating Heat Pipe Manufacturing Using a Comparative Hybrid MCDM Approach. **Polymers**, v. 15, n. 13, p. 2933, 2023.
- ORTIZ-BARRIOS, M. A. *et al.* Strategic hybrid approach for selecting suppliers of high-density polyethylene. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 24, n. 5–6, p. 296–316, set. 2017.
- ÖZKAN, B.; DENGİZ, O.; TURAN, I. D. Site suitability assessment and mapping for rice cultivation using multi-criteria decision analysis based on fuzzy-AHP and TOPSIS approaches under semihumid ecological condition in delta plain. **Paddy and Water Environment**, v. 17, n. 4, p. 665–676, out. 2019.
- PADILLA-RIVERA, A.; RUSSO-GARRIDO, S.; MERVEILLE, N. Addressing the Social Aspects of a Circular Economy: A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 7912, 24 set. 2020.
- PALAFOX-ALCANTAR, P. G.; HUNT, D. V. L.; ROGERS, C. D. F. A Hybrid Methodology to Study Stakeholder Cooperation in Circular Economy Waste Management of Cities. **Energies**, v. 13, n. 7, p. 1845, 10 abr. 2020.
- PANG, J. *et al.* Synthesis of ethylene glycol and terephthalic acid from biomass for producing PET. **Green Chemistry**, v. 18, n. 2, p. 342–359, 2016.
- PASCALE, A. *et al.* A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 124942, jan. 2021.
- PATIL, S. K.; KANT, R. A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 2, p. 679–693, fev. 2014.
- PAULI, G. A. **The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs**. [S.l.]: Paradigm Publications, 2010.
- PAYNE, J.; MCKEOWN, P.; JONES, M. D. A circular economy approach to plastic waste. **Polymer Degradation and Stability**, v. 165, p. 170–181, jul. 2019.
- PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. **Economics of natural resources and the environment**. Johns Hopkins University Press, 1989.
- PECORALE, A.; INZERILLO, M. C.; SALVADORI, P. A. The PET Manufacturing Experience in a Public Department, a Witness. *In*: PECORALE, A.; INZERILLO, M. C.; SALVADORI, P. A. (Eds.). **PET Radiopharmaceutical Business**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, p. 99–153.
- PEREIRA, J. *et al.* A multi-criteria and stochastic robustness analysis approach to compare nations sustainability. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 80, p. 101159, mar. 2022.
- PEREIRA, V.; BASILIO, M. P.; SANTOS, C. H. T. **Enhancing decision analysis with a large language model: pyDecision a comprehensive library of MCDA methods in python**. arXiv, abr. 2024.

- PERNICONE, N.; CERBONI, M.; PRELAZZI, G.; *et al.* An investigation on Pd/C industrial catalysts for the purification of terephthalic acid. **Catalysis Today**, v. 44, n. 1–4, p. 129–135, 1998.
- PETIT-BOIX, A.; LEIPOLD, S. Circular economy in cities: Reviewing how environmental research aligns with local practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 1270–1281, 2018.
- PIERATTI, E. *et al.* Assessing the forest-wood chain at local level: A Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) based on the circular bioeconomy principles. **Annals of Forest Research**, v. 62, n. 0, 12 jul. 2019.
- PLASTICS EUROPE. **The Circular Economy for Plastics: a European analysis**. 2024. Disponível em: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/06/PlasticsEurope-CircularityReport-2022_2804-Light.pdf. Acesso em: 11 nov. 2024.
- POLATIDIS, H. *et al.* Selecting an Appropriate Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, v. 1, n. 2, p. 181–193, jul. 2006.
- RABNAWAZ, M. *et al.* A roadmap towards green packaging: the current status and future outlook for polyesters in the packaging industry. **Green Chem.**, v. 19, n. 20, p. 4737–4753, 2017.
- RAHIM, A. A. *et al.* Development of a fuzzy-TOPSIS multi-criteria decision-making model for material selection with the integration of safety, health and environment risk assessment. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 235, n. 7, p. 1532–1550, jul. 2021.
- RAHIMI, A.; GARCÍA, J. M. Chemical recycling of waste plastics for new materials production. **Nature Reviews Chemistry**, v. 1, n. 6, p. 0046, jun. 2017.
- RILLIG, M. C.; INGRAFFIA, R.; DE SOUZA, A. A. M. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1805, 18 out. 2017.
- RITCHIE, H; ROSER, M. **Plastic Pollution**. 2018. Disponível em: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>. Acesso em: 12 jan. 2022.
- RIVERO-IGLESIAS, J. M. *et al.* Integrated model for the assessment of power generation alternatives through analytic hierarchy process and a fuzzy inference system. Case study of Spain. **Renewable Energy**, v. 211, p. 563–581, jul. 2023.
- ROCHA, L. V. M. D. *et al.* Design Thinking e metodologias ativas no ensino de ciências: um estudo de caso com graduandos em nanotecnologia. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 5, p. e4440, 22 maio 2024.
- ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M.-A. D. Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, v. 19, n. 2, p. 121–132, jun. 2009.
- ROSA, P. *et al.* Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 6, p. 1662–1687, 18 mar. 2020.
- ROY, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples. **Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle**, v. 2, n. 8, p. 57–75, 1968.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York ; London: McGraw-Hill International Book Co, 1980.

SABAGHI, M.; MASCLE, C.; BAPTISTE, P. Evaluation of products at design phase for an efficient disassembly at end-of-life. **Journal of Cleaner Production**, v. 116, p. 177–186, mar. 2016.

SAN MARTIN, D. et al. Multi-criteria assessment of the viability of valorising vegetable by-products from the distribution as secondary raw material for animal feed. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 13, p. 15716–15730, abr. 2021.

SANTOS JÚNIOR, E. P. et al. Potentialities and Impacts of Biomass Energy in the Brazilian Northeast Region. **Energies**, v. 16, n. 9, p. 3903, 5 maio 2023.

SANTOS, T. F.; SCAVARDA, A.; MACHADO, F. V. The importance of production engineering in supply chain management with a focus on multidisciplinary. *In: V Seven International Multidisciplinary Congress*. [s.l.]: Seven Congress, 2024.

SANTOS., C. L. **Avaliação da produção de garrafas PET de refrigerante e seu gerenciamento pós-consumo a partir do ciclo de vida no contexto do Distrito Federal**. 2022. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150p. 2022.

SARDA, P. *et al.* Sustainability performance of polyethylene terephthalate, clarifying challenges and opportunities. **Journal of Polymer Science**, v. 60, n. 1, p. 7–31, jan. 2022.

SARIATLI, F. Linear Economy Versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability. **Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development**, v. 6, n. 1, p. 31–34, 24 maio 2017.

SAUVÉ, S.; BERNARD, S.; SLOAN, P. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. **Environmental Development**, v. 17, p. 48–56, jan. 2016.

SHELDON, R. A.; NORTON, M. Green chemistry and the plastic pollution challenge: towards a circular economy. **Green Chemistry**, v. 22, n. 19, p. 6310–6322, 2020.

SIDDIQUI, Mohammad Nahid; REDHWI, Halim Hamid; ACHILIAS, Dimitris S. Recycling of poly(ethylene terephthalate) waste through methanolic pyrolysis in a microwave reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 98, p. 214–220, 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237012001714>>. Acesso em: 3 nov. 2023.

SIEKELOVA, A.; PODHORSKA, I.; IMPPOLA, J. J. Analytic Hierarchy Process in Multiple–Criteria Decision–Making: A Model Example. **SHS Web of Conferences**, v. 90, p. 01019, 2021.

SIMON, B. What are the most significant aspects of supporting the circular economy in the plastic industry? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 299–300, fev. 2019.

SLORACH, P. C. et al. Environmental sustainability in the food-energy-water-health nexus: A new methodology and an application to food waste in a circular economy. **Waste Management**, v. 113, p. 359–368, jul. 2020.

- SOARES JUNIOR, A. B. **Produção do Poli(tereftalato de etileno) Modificado com Glicerol e Derivados**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- SOGANCIOGLU, M.; YEL, E.; AHMETLI, G. Pyrolysis of waste high density polyethylene (HDPE) and low density polyethylene (LDPE) plastics and production of epoxy composites with their pyrolysis chars. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 369–381, nov. 2017.
- SPINA, L. D. Multidimensional Assessment for “Culture-Led” and “Community-Driven” Urban Regeneration as Driver for Trigger Economic Vitality in Urban Historic Centers. **Sustainability**, v. 11, n. 24, p. 7237, 17 dez. 2019.
- SRDJEVIC, B.; MEDEIROS, Y. D. P.; FARIA, A. S. An Objective Multi-Criteria Evaluation of Water Management Scenarios. **Water Resources Management**, v. 18, n. 1, p. 35–54, fev. 2004.
- STAHEL, W. R. The circular economy. **Nature**, v. 531, n. 7595, p. 435–438, 24 mar. 2016.
- STAHEL, W. R.; REDAY-MULVEY, G. **Jobs for tomorrow: the potential for substituting manpower for energy**. Vantage Press, 1981.
- STAHEL, W. **The performance economy**. [S.l.]: Springer, 2010.
- STANKEVIČIENĖ, J.; NIKANOROVA, M. Eco-innovation as a pillar for sustainable development of circular economy. **Business: Theory and Practice**, v. 21, n. 2, p. 531–544, 27 ago. 2020.
- STANKEVIČIENĖ, J.; NIKANOROVA, M.; GENTJAN, Ç. Analysis of Green Economy Dimension in the Context of Circular Economy: The Case of Baltic Sea Region. **E+M Ekonomie a Management**, v. 23, n. 1, p. 4–18, 2020.
- STRANTZALI, E. et al. A decision support approach for evaluating liquefied natural gas supply options: Implementation on Greek case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 414–423, jun. 2019.
- STRAT, V. A. et al. The Characterization of the Romanian Circular Economys Potential, at County Level. **Amfiteatru Economic**, v. 20, n. 48, p. 278, maio 2018.
- SU, B. *et al.* A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. **Journal of Cleaner Production**, v. 42, p. 215–227, mar. 2013.
- SUCHEK, N.; FERNANDES, C. I.; KRAUS, Sascha; *et al.* Innovation and the circular economy: A systematic literature review. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 8, p. 3686–3702, 2021.
- SULYMAN, M.; HAPONIUK, J.; FORMELA, K. Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 7, n. 2, p. 100–108, 2016.
- TARIQ, H. et al. Sustainable production of diapers and their potential outputs for the Pakistani market in the circular economy perspective. **Science of The Total Environment**, v. 769, p. 145084, maio 2021.
- TEKE, S. et al. Optimization of PET depolymerization for enhanced terephthalic acid recovery from commercial PET and post consumer PET-bottles via low-temperature alkaline hydrolysis. **Chemosphere**, v. 365, p. 143391, out. 2024.

THIOUNN, T.; SMITH, R. C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. **Journal of Polymer Science**, v. 58, n. 10, p. 1347–1364, 15 maio 2020.

TOMÁS, R. A. F.; BORDADO, J. C. M.; GOMES, J. F. P. p -Xylene Oxidation to Terephthalic Acid: A Literature Review Oriented toward Process Optimization and Development. **Chemical Reviews**, v. 113, n. 10, p. 7421–7469, 2013. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr300298j>>. Acesso em: 6 nov. 2023.

TOMLINSON, M. **The impact of design thinking on driving innovation within large businesses**. 2018. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) – University of Chester, Chester, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324569820>. Acesso em: 11 nov. 2023.

TONINI, D. et al. Quantitative sustainability assessment of household food waste management in the Amsterdam Metropolitan Area. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 160, p. 104854, set. 2020.

TREVISANUTO, T. M. C. Logística Reversa de embalagens Pet no Brasil. **Revista FIBinova**, v. 1, 20 dez. 2019.

TULLO, A. High costs weigh on European PET firms. **C&EN Global Enterprise**, v. 101, n. 41, p. 9–9, 18 dez. 2023.

TUNI, A. et al. Risk assessment for circular business models: A fuzzy Delphi study application for composite materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 389, p. 135722, fev. 2023.

TÜRKELI, S. *et al.* Circular economy scientific knowledge in the European Union and China: A bibliometric, network and survey analysis (2006–2016). **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 1244–1261, out. 2018.

UKPANYANG, D.; TERRADOS-CEPEDA, J.; HERMOSO-ORZAEZ, M. J. Multi-Criteria Selection of Waste-to-Energy Technologies for Slum/Informal Settlements Using the PROMETHEE Technique: A Case Study of the Greater Karu Urban Area in Nigeria. **Energies**, v. 15, n. 10, p. 3481, 10 maio 2022.

URBINATI, A.; CHIARONI, D.; CHIESA, V. Towards a new taxonomy of circular economy business models. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 487-498, 2017.

VALUSYTE, R. TOWARDS A SYSTEMIC APPROACH. A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR CIRCULAR DESIGN IN THE TRANSITION OF A SUSTAINABLE ECONOMY. 15 out. 2023, Albena, Bulgaria. **Anais...** Albena, Bulgaria: [s.n.], 15 out. 2023. p. 217–224.

VELASQUEZ, M.; HESTER, P. T. An analysis of multi-criteria decision-making methods. **International journal of operations research**, v. 10, n. 2, p. 56-66, 2013.

VERA, R. C. et al. El Design Thinking aplicado al desarrollo de Competencias en Estudiantes de la UATF: Caso de Estudio. **Revista Veritas de Difusão Científica**, v. 5, n. 2, p. 1786–1801, 19 set. 2024.

VILAPLANA, F.; KARLSSON, S. Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 293, n. 4, p. 274–297, 14 abr. 2008.

VINODH, S.; PRASANNA, M.; HARI PRAKASH, N. Integrated Fuzzy AHP–TOPSIS for selecting the best plastic recycling method: A case study. **Applied Mathematical Modelling**, v. 38, n. 19–20, p. 4662–4672, out. 2014.

VIRENT. **Technology**. 2023. Disponível em: <https://www.virent.com/technology/>. Acesso em: 18 fev. 2023.

VLACHOKOSTAS, C. et al. Decision Support System to Implement Units of Alternative Biowaste Treatment for Producing Bioenergy and Boosting Local Bioeconomy. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2306, 6 maio 2020.

WANG, H. *et al.* Measuring progress of China's circular economy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 163, p. 105070, dez. 2020.

WEETMAN, C. **A circular economy handbook: how to build a more resilient, competitive and sustainable business**. Second edition. London New York, NY New Delhi: Kogan Page, 2021.

WEISSMANN, D. PET Use in Blow Molded Rigid Packaging. Em: **Applied Plastics Engineering Handbook**. [s.l.] Elsevier, 2024. p. 809–835.

WICHAIUTCHA, N.; DUTTA, A.; CHAVALPARIT, O. Life Cycle Assessment of Plastic Resin: A Case Study of the Petrochemical Industry in Thailand for the Production of HDPE Resin. **Applied Environmental Research**, 23 mar. 2023.

WOODALL, L. C. *et al.* The deep sea is a major sink for microplastic debris. **Royal Society Open Science**, v. 1, n. 4, p. 140317, dez. 2014.

WU, J.; WU, T. Sustainability Indicators and Indices: an overview. In: MADU, C. N.; KUEI, C.-H. (Eds.). **Handbook of Sustainability Management**. [s.l.] WORLD SCIENTIFIC, 2012. p. 65–86.

XIAO, B.; ZHENG, M.; PANG, J.; *et al.* Synthesis and Characterization of Poly(ethylene terephthalate) from Biomass-Based Ethylene Glycol: Effects of Miscellaneous Diols. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, n. 22, p. 5862–5869, 2015. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.5b00487>>. Acesso em: 3 nov. 2023.

XIE, Z.; TIAN, G.; TAO, Y. A Multi-Criteria Decision-Making Framework for Sustainable Supplier Selection in the Circular Economy and Industry 4.0 Era. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16809, 14 dez. 2022.

XU, L.; YANG, J.-B. **Introduction to multi-criteria decision making and the evidential reasoning approach**. Manchester: Manchester School of Management, University of Manchester Institute of Science and Technology, 2001.

YADAV, G. et al. Development of a lean manufacturing framework to enhance its adoption within manufacturing companies in developing economies. **Journal of Cleaner Production**, v. 245, p. 118726, fev. 2020.

YADAV, R. Analytic hierarchy process-technique for order preference by similarity to ideal solution: A multi criteria decision-making technique to select the best dental restorative composite materials. **Polymer Composites**, v. 42, n. 12, p. 6867–6877, 2021.

- YANG, X.; DING, J.; HOU, H. Application of a triangular fuzzy AHP approach for flood risk evaluation and response measures analysis. **Natural Hazards**, v. 68, n. 2, p. 657–674, set. 2013.
- ZADEH, L. Optimality and non-scalar-valued performance criteria. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 8, n. 1, p. 59–60, jan. 1963.
- ZAVADSKAS, E. K.; KAKLAUSKAS, A. Determination of an efficient contractor by using the new method of multicriteria assessment. In: **International Symposium for “The Organization and Management of Construction”. Shaping Theory and Practice**. Bury St. Edmunds, Suffolk, UK: St. Edmundsbury Press, 1996. p. 94-104.
- ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z.; KILDIENĖ, S. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. **Technological and economic development of economy**, v. 20, n. 1, p. 165-179, 2014.
- ZHAO, H.; ZHAO, H.; GUO, S. Evaluating the comprehensive benefit of eco-industrial parks by employing multi-criteria decision making approach for circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2262–2276, jan. 2017.
- ZHAO, R. *et al.* Commercially Available Materials Selection in Sustainable Design: An Integrated Multi-Attribute Decision Making Approach. **Sustainability**, v. 8, n. 1, p. 79, 16 jan. 2016.
- ZHU, Z. *et al.* Packaging Design for the Circular Economy: A Systematic Review. **Sustainable Production and Consumption**, v. 32, p. 817–832, jul. 2022.
- ZIEMBA, P. Energy Security Assessment Based on a New Dynamic Multi-Criteria Decision-Making Framework. **Energies**, v. 15, n. 24, p. 9356, 10 dez. 2022.

APÊNDICE I

N.	Autor	Nível de Circularidade	MCDM	Aspecto da EC	Indicador da EC
1	Alamerew; Brissaud (2019)	Micro	1. Product Recovery Multi-criteria Decision Tool (PR-MCDT).	1. Recuperação de valor.	1. Indicadores de Sustentabilidade
2	Alamerew et al. (2020)	Micro	1. Multi-attribute rating technique (SMART).	1. Recuperação de valor.	1. Indicadores de Sustentabilidade
3	Alaoui (2020)	Micro	1. Fuzzy Logic.	1. Abordagem dos R's; 2. ReSOLVE.	1. Indicadores de desempenho
4	Arantes et al. (2022)	Micro	1. Fuzzy AHP; 2. Fuzzy TOPSIS;	1. Desempenho circular; 2. Recuperação de valor	1. Indicadores de modelos de negócios circulares
5	Aravossis et al. (2019)	Micro	1. AHP.	1. Ciclo de Vida do Produto; 2. Gerenciamento de Resíduos.	1. Indicadores Ambientais
6	Bertoni (2019)	Micro	1. Multi Criteria Decision Making process; 2. AHP.	1. Servitização; 2. Sistemas Produto-Serviço.	1. Valor para o cliente 2. Valor do provedor
7	Cerreta; Daldanise; Sposito (2018)	Macro	1. PROMETHEE-GAIA	1. Aspectos Sociais; 2. Economia Criativa;	1. Indicadores de Sustentabilidade
8	Cerreta et al. (2020)	Macro	1. PROMETHEE-GAIA	1. Sistema Regenerativo	1. Regeneração Ambiental; 2. Regeneração Social; 3. Regeneração Económica.
9	Chauhan; Jakhar; Chauhan (2021)	Macro	1. DEMATEL; 2. Par-wise comparison	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Recuperação de valor.	1. Fim da Vida (EoL).
10	Chew et al. (2023)	Micro	1. AHP; 2. ANN.	1. Abordagem dos R's; 2. Gerenciamento de Resíduos.	1. Eficiência das Técnicas de Descarte.
11	Delouyi; Ranjbari; Esfandabadi (2023)	Meso	1. DEMATEL; 2. ANP.	1. Abordagem dos R's; 2. Uso eficiente de recursos.	1. Custo de implementação.
12	Deshpande et al. (2020)	Macro	1. Multi-Attribute Value Theory (MAVT).	1. Abordagem dos R's; 2. Gerenciamento	1. Fim da Vida (EoL).

				de Resíduos.
13	Erceg; Margeta (2019)	Macro	1. PROMETHEE.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Recuperação de valor.
14	Feng et al. (2022)	Micro	1. DEMATEL; 2. TOPSIS	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Recuperação de valor.
15	Ferronato et al. (2019)	Macro	1. MCDA-questionnaire survey.	1. Índice de Nível de Resíduos; 2. Fatores do lixo eletrônico; 3. Realização de valor.
16	Fidan; Aydoğan; Uzal (2021)	Micro	1. MCDA-questionnaire survey.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Recuperação de valor.
17	Furness; Bello-Mendoza; Maggi (2023)	Micro	1. Interactive and Multicriteria Decision Making - TODIM.	1. Fim da Vida (EV); 2. Potencial de Aquecimento Global; 3. Demanda Cumulativa de Energia (CED)
18	Garcia-Bernabeu et al. (2020)	Macro	1. AHP.	1. Recuperação de valor; 2. Uso Eficiente de Recursos.
19	García-Bustamante et al. (2018)	Meso	1. TOPSIS.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Recuperação de valor.
20	Gomes et al. (2020)	Micro	1. AHP.	1. Uso Eficiente de Recursos.
21	Grippo; Romano; Vastola (2019)	Micro	1. MOORA; 2. TOPSIS.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Recuperação de valor.
22	Gue et al. (2020)	Macro	1. Weighted Linear Combination (WLC); 2. Técnicas Fuzzy; 3. AHP.	1. Indicadores de Sustentabilidade; 2. Indicadores de circularidade de materiais.
23	Gupta; Kumar; Wasan (2021)	Meso	1. Técnicas Fuzzy; 2. DEMATEL.	1. Transição CE em nível macro
			1. Best-Worst Method (BWM);	1. Abordagem dos R's; 2. Recuperação de valor; 3. Eficiência Energética.

24	Islam; Huda (2020)	Macro	1. AHP.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Recuperação de valor.	1. Conteúdo material
25	Hermoso-Orzaez et al. (2019)	Micro	1. PROMETHEE.	1. Eficiência Energética	1. Indicadores de Desempenho Energético
26	Kasztelan (2020)	Macro	1. Taxonomic linear ordering method.	1. Nível de Circularidade	1. Índice de circularidade das economias nacionais
27	Kaźmierczak (2019)	Macro	1. Analytical Hierarchy Process (AHP).	1. Abordagem dos - R's; 2. Gerenciamento de Resíduos.	
28	Kaźmierczak et al. (2018)	Macro	1. AHP.	1. Gerenciamento - de Resíduos.	
29	Kazuva et al. (2021)	Macro	1. AHP.	1. Gerenciamento - de Resíduos.	
30	Khan; Kabir (2020)	Micro	1. Simple Multi Attribute Rating Technique Exploiting Ranks (SMARTER).	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Eficiência Energética.	1. Transformação de resíduos em energia; 2. Indicadores de Sustentabilidade
31	Korhec et al. (2023)	Meso	1. PROMETHEE; 2. TOPSIS.	1. Gestão de Resíduos; 2. Uso Eficiente de Recursos.	1. Indicadores de Sustentabilidade.
32	Krstic et al. (2022)	Meso	1. AHP.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Uso Eficiente de Recursos; 3. Abordagem dos R's.	1. Indicadores de Sustentabilidade; 2. Taxa de reciclagem;
33	Lee; Hu; Lim (2021)	Micro	1. Fuzzy AHP; 2. Fuzzy TOPSIS; 3. Multi-objective linear programming (MOLP).	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Recuperação de valor.	1. Fim de vida; 2. Indicadores de Sustentabilidade
34	Markatos; Pantelakis (2023)	Micro	1. AHP; 2. Weighted Sum Model (WSM).	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Uso Eficiente de Recursos.	1. Componentes de reciclabilidade.
35	Melkonyan et al. (2020)	Micro	1. PROMETHEE I.	1. Uso eficiente de recursos	1. Indicadores de Sustentabilidade.
36	Mishra et al. (2019)	Meso	1. AHP.	1. Manufatura Sustentável	1. Indicadores de Sustentabilidade.
37	Muerza; Urciuoli; Zapata Habas	Meso	1. AHP; 2. TOPSIS.	1. Eficiência Energética; 2. Uso Eficiente	1. Indicadores de Sustentabilidade.

	(2023)			de Recursos.	
38	Nara et al. (2021)	Micro	1. Fuzzy TOPSIS.	1. IoT; 2. Big Data	1. Indicadores de Sustentabilidade.
39	Niero; Kalbar (2019)	Micro	1. TOPSIS.	1. Circularidade dos Materiais; 2. Ciclo de vida do produto	1. Indicadores de Circularidade de Materiais; 2. Indicadores de ACV
40	Nikanorova; Imoniana; Stankeviciene (2020)	Macro	1. MULTIMOORA; 2. TOPSIS.	1. Aspectos Sociais.	1. Indicadores sociais
41	Nikanorova; Stankeviciene (2020)	Macro	1. MULTIMOORA; 2. TOPSIS.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Uso Eficiente de Recursos.	1. Indicadores de Sustentabilidade
42	Nowakowski; Król; Mrówczyńska (2017)	Macro	1. Fuzzy Logic.	1. Gerenciamento de Resíduos.	1. Taxa de arrecadação
43	Ono; Tsusaka (2023)	Macro	1. Multi-attribute value theory (MAVT).	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Abordagem dos R's.	1. Taxa de reciclagem; 2. Indicadores Sociais.
44	Palafox-Alcantar et al. (2020)	Macro	1. AHP.	1. Gerenciamento de Resíduos.	1. Indicadores de gestão de resíduos.
45	Pieratti et al. (2019)	Macro	1. AHP.	1. Bioeconomia; 2. Abordagem dos R's.	1. Indicadores baseados no Quadro 4R.
46	Rivero-Iglesias et al. (2023)	Macro	1. AHP; 2. Técnicas Fuzzy.	1. Uso Eficiente de Recursos.	1. Custo nivelado de fornecimento.
47	Sabaghi; Mascle; Baptiste (2016)	Micro	1. TOPSIS.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Design de produto.	1. Índice de desmontagem
48	San Martin et al. (2020)	Macro	1. AHP; 2. GISWASTE tool.	1. Gerenciamento de Resíduos.	1. Indicadores de Sustentabilidade
49	Slorach et al. (2020)	Micro	1. Multi-attribute value theory (MAVT).	1. Gerenciamento de Resíduos.	1. Recuperação de recursos
50	Spina (2019)	Macro	1. Analytic Network Process (ANP).	1. Reabilitação Urbana; 2. Aspectos Sociais.	1. Indicadores Urbanos; 2. Indicadores Sociais; 3. Indicadores Culturais.
51	Stankeviciene; Nikanorova	Macro	1. MULTIMOORA; 2. TOPSIS.	1. Eco-inovação; 2. Gestão de Resíduos;	1. Indicadores de ecoinovação.

	(2020)			3. Desempenho Circular.	
52	Stankeviciene; Nikanorova; Cera (2020)	Macro	1. MULTIMOORA; 2. TOPSIS.	1. Economia Verde.	1. Indicadores de Sustentabilidade
53	Strantzali et al. (2019)	Macro	1. PROMETHEE II.	1. Logística verde; 2. Eficiência Energética.	1. Indicadores de Sustentabilidade
54	Strat; Teodor; Săseanu (2018)	Macro	1. Other (CEPI).	1. Gerenciamento de Resíduos.	1. Indicador de Potencial da Economia Circular; 2. Recolha de resíduos; 3. Taxa de reciclagem.
55	Tariq et al. (2021)	Macro	1. Fuzzy logic; 2. TOPSIS.	1. Gerenciamento de Resíduos.	1. Ecoeficiência
56	Tonini et al. (2020)	Macro	1. ELECTRE II.	1. Gerenciamento de Resíduos.	1. Indicadores de Sustentabilidade
57	Tuni et al. (2023)	Micro	1. DELPHI.	1. Uso eficiente de recursos.	1. Riscos de aceitação do cliente.
58	Ukpanyang et al. (2022)	Meso	1. PROMETHEE; 2. AHP.	1. Uso eficiente de recursos.	1. Taxa de Geração de Resíduos.
59	Vlachokostas et al. (2020)	Micro	1. ELECTRE III.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Bioeconomia.	1. Indicadores de Sustentabilidade
60	Wohner et al. (2020)	Micro	1. TOPSIS.	1. Gerenciamento de Resíduos; 2. Design de produto.	1. Indicadores de Sustentabilidade
61	Xie; Tian; Tao (2022)	Micro	1. SWARA COPRAS.	1. Uso eficiente de recursos.	1. Indicadores de Sustentabilidade
62	Yadav et al. (2020)	Meso	1. Fuzzy AHP; 2. DEMATEL.	1. Manufatura Enxuta.	1. Motivadores da Gestão Lean
63	Zhao; Zhao; Guo (2017)	Meso	1. Fuzzy logic; 2. VIKOR.	1. Abordagem dos R's; 2. Parques Ecoindustriais.	1. Sistema de índice de avaliação.
64	Ziemba (2022)	Macro	1. Técnicas Fuzzy; 2. PROMETHEE	1. Uso eficiente de recursos.	1. Eficiência Energética.

APÊNDICE II

Formulário de Comparação Pareada para aplicação do Método *Fuzzy-AHP*

Prezado Especialista,

Você está recebendo um questionário cujo objetivo é a avaliação e seleção de rotas químicas para a produção de resinas PET que se alinham com o conceito da Economia Circular, a fim de produzir um produto PET mais circular desde a sua concepção.

Ficaremos agradecidos com sua resposta, uma vez que os resultados empíricos são parte da tese de doutorado desenvolvida no Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Produção da UFSC e contribuirá para o avanço do conhecimento científico nesta área.

Atenciosamente,

Msc. Paulo Vitor dos Santos Gonçalves, Dr^a. Lucila Maria de Souza Campos, Dr. Sérgio Mayerle

Objetivo Principal: Definir os critérios inerentes ao processo de três rotas químicas de produção de resina PET que se alinham com os conceitos da Economia Circular.

Rotas Químicas Avaliadas:

1. DMT
2. TPA
3. EG por Biomassa

Hierarquia de Critérios:

Critérios	Econômico	Ambiental	Técnico
Subcritérios	Custo de produção da Resina (C_1)	Água Consumida (C_2)	Matéria-prima utilizada (C_3)
	Quantidade de matéria-prima por kg de resina PET produzida (C_4)	Energia Consumida (C_5)	Densidade (C_6)
	Custo da matéria-prima (C_7)	Resíduos gerados (C_8)	Temperatura Polimerização (C_9)
	Rendimento (C_{10})	Reciclabilidade (taxa de reciclagem) (C_{11})	Viscosidade intrínseca (C_{12})

Questão 1) Nesta matriz, devem ser comparados os critérios das linhas com relação às colunas, com base na preferência dos especialistas em relação ao objetivo central da hierarquia. Dessa forma, as avaliações serão feitas sob o seguinte raciocínio: "os critérios econômicos são quando comparados aos critérios ambientais." Atribuindo-se, assim, uma nota de 1 a 9 na escala de preferência.

Critérios	Econômico	Ambiental	Técnico
-----------	-----------	-----------	---------

Econômico	1		
Ambiental		1	
Técnico			1

Questão 2) Com relação aos subcritérios do eixo Econômico, como você avalia a preferência dos mesmos, de acordo com a escala de importância relativa.

Subcritérios - Eixo Econômico	Custo de produção da Resina	Quantidade Resina Produzida	Custo Matéria-prima	Rendimento
Custo de produção da Resina	1			
Quantidade Resina Produzida		1		
Custo Matéria-prima			1	
Rendimento				1

Questão 3) Com relação aos subcritérios do eixo Econômico, como você avalia a preferência dos mesmos, de acordo com a escala de importância relativa.

Subcritérios - Eixo Ambiental	Água Consumida	Energia Consumida	Resíduos Gerados	Reciclabilidade
Água Consumida	1			
Energia Consumida		1		
Resíduos Gerados			1	
Reciclabilidade				1

Questão 4) Com relação aos subcritérios do eixo Técnico, como você avalia a preferência dos mesmos, de acordo com a escala de importância relativa.

Subcritérios - Eixo Técnico	Matéria-prima utilizada	Densidade	Temperatura de Polimerização	Viscosidade Intrínseca
Matéria-prima utilizada	1			
Densidade		1		
Temperatura de Polimerização			1	
Viscosidade Intrínseca				1

APÊNDICE III

Questionário para aplicação do Método *Fuzzy* TOPSIS submetido aos especialistas

Prezado Especialista,

Você está recebendo um questionário cujo objetivo é a avaliação e seleção de rotas químicas para a produção de resinas PET que se alinham com o conceito da Economia Circular, a fim de produzir um produto PET mais circular desde a sua concepção.

Ficaremos agradecidos com sua resposta, uma vez que os resultados empíricos são parte da tese de doutorado desenvolvida no Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Produção da UFSC e contribuirá para o avanço do conhecimento científico nesta área.

Atenciosamente,

Msc. Paulo Vitor dos Santos Gonçalves, Dr^a. Lucila Maria de Souza Campos, Dr. Sérgio Mayerle

Objetivo do Questionário

O objetivo pauta-se em mensurar e avaliar sob critérios pertinentes para a Economia Circular, três rotas químicas de produção da resina PET. Desta forma, considerou-se os critérios Ambiental, Técnico e Econômico, subdivididos em 4 subcritérios para cada.

Rotas Químicas Avaliadas:

1. DMT
1. TPA
1. EG por Biomassa

Instruções para o preenchimento do questionário

Para cada uma das três rotas químicas avaliadas, pedimos que marque **apenas uma alternativa** em relação ao grau de aderência dessa rota para a produção de resina PET (por ex.: “muito baixo”, “baixo”, “moderado”, “alto” e “muito alto”) em relação a cada um dos subcritérios pertinentes ao desempenho relativo à economia circular avaliados:

Ex.: No Subcritério fictício "Exemplo", a rota de produção DMT tem importância "baixa", a rota TPA tem importância "Alta" e a rota Biomassa tem importância "Muito alta".

Rota de Produção	Subcritério "Exemplo"				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA		X			
DMT				X	
Etileno Glicol por Biomassa					X

Questionário Método *Fuzzy* TOPSIS**Critério Econômico: subcritérios**

C1: Custo de produção da resina. Esse subcritério avalia o custo para produzir a resina PET com base no tipo de rota química escolhida, indicando que a rota química é importante para estabelecer ganhos econômicos no processo produtivo. O custo de produção “Muito baixa” indica que a rota química é bastante onerosa para o processo produtivo. Enquanto “Muito alta” indica que a rota química tem custo baixo para a produção da resina.

Rota de Produção	Custo de produção da Resina (C1)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

C2: Quantidade de resina produzida. Esse subcritério avalia a quantidade de resina PET produzida com base na rota química adotada, indicando a importância da rota para determinar a quantidade produzida com base na inserção de matéria-prima no processo. A quantidade de resina produzida “Muito baixa” indica que a rota química tem uma eficiência de produção menor em relação às outras rotas. Enquanto “Muito alta” indica que a rota avaliada tem uma eficiência alta.

Rota de Produção	Quantidade de Resina Produzida (C2)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

C3: Custo de matéria-prima. Esse subcritério avalia o custo da matéria-prima para a produção de cada rota química responsável pela elaboração da resina PET. O custo de matéria-prima “Muito baixa” indica que a rota química utiliza bastante matéria-prima. Enquanto “Muito alta” indica que a rota química utiliza uma quantidade menor para a produção da resina.

Rota de Produção	Custo Matéria-prima (C3)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

C4: Rendimento. Esse subcritério avalia o rendimento do tipo de rota química avaliada, considerando a razão entre quantidade de resina PET produzida pela quantidade de matéria-prima utilizada para a elaboração. O rendimento da rota química "Muito baixo" indica que o rendimento é alto com relação às outras rotas. Enquanto "Muito alto" indica que a rota química apresenta rendimento satisfatório.

Rota de Produção	Rendimento (C4)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

Critério Ambiental: subcritérios

C5: Água consumida. Esse subcritério aborda a quantidade de água consumida para a produção de resina PET com base na rota química avaliada. A quantidade de água consumida "Muito baixa" indica que a rota apresenta consumo alto de água no processo de produção. Enquanto "Muito alta" relata uma quantidade diminuta de água para a rota química avaliada.

Rota de Produção	Água consumida (C5)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

C6: Energia Consumida. Esse subcritério aborda a energia consumida para a produção de resina PET com base na rota química avaliada. A energia consumida "Muito baixa" indica que a rota apresenta consumo alto de energia no processo. Enquanto "Muito alta" relata uma quantidade baixa de energia para a rota química avaliada.

Rota de Produção	Energia Consumida (C6)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

C7: Resíduos Gerados. Esse subcritério indica a quantidade de resíduos gerados para a produção de resina PET com base na rota química avaliada. A quantidade de resíduos gerados quando "Muito baixa" indica que a rota apresenta alta geração de resíduos no processo. Enquanto "Muito alta" relata uma quantidade menor de resíduos gerados para a rota química avaliada.

Rota de Produção	Resíduos Gerados (C7)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

C8: Reciclabilidade. Esse subcritério aborda o percentual de reciclabilidade da resina PET com base na rota química escolhida para a sua produção. A reciclabilidade quando "Muito baixa" representa uma taxa menor para esse indicador. Enquanto "Muito alta" apresenta elevada taxa de reciclabilidade para o produto feito a partir dessa rota.

Rota de Produção	Reciclabilidade (C8)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

Critério Técnico: subcritérios

C9: Matéria-prima utilizada. Este subcritério avalia o tipo de matéria-prima utilizada para a produção da resina PET com base na rota química. O tipo de matéria-prima "Muito baixo" indica que ela impacta pouco no desempenho técnico de produção da resina PET. Enquanto "Muito alta" indica que ela impacta bastante no desempenho técnico de produção da resina.

Rota de Produção	Matéria-prima utilizada (C9)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

C10: Densidade. Esse critério avalia a densidade da resina produzida com base na rota química. A densidade "Muito Baixa" indica uma resina mais densa para a produção de garrafas. Enquanto que "Muito alta" indica uma resina com densidade ideal para produção da resina PET.

Rota de Produção	Densidade (C10)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

C11: Temperatura de Polimerização. Indica a temperatura de polimerização no processo de sintetização da resina PET. A temperatura "Muito Baixa" retrata uma temperatura elevada para a rota avaliada. Enquanto "Muito alta" indica uma temperatura baixa para o indicador.

Rota de Produção	Temperatura Polimerização (C11)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

C12: Viscosidade intrínseca. O indicador aborda a viscosidade intrínseca obtida a partir da rota química avaliada. A viscosidade intrínseca "Muito baixa" indica que a rota química precisa aumentar o indicador para a produção da resina PET. Enquanto o "Muito alta" traduz o indicador em taxa ótima para a produção da resina.

Rota de Produção	Viscosidade intrínseca (C12)				
	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
TPA					
DMT					
Etileno Glicol por Biomassa					

ANEXO A – Artigo 1 publicado na revista Environmental Science and Pollution

Environmental Science and Pollution Research
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-18580-w>

RESEARCH ARTICLE



A systemic review for measuring circular economy with multi-criteria methods

Paulo Vitor dos Santos Gonçalves¹ · Lucila M. S. Campos^{1,2}

Received: 2 October 2021 / Accepted: 5 January 2022

© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2022

Abstract

Determining the circularity of a system through a criteria and indicators approach has been the focus of research in many branches of science. In this way, this work aims to review multiple criteria decision-making (MCDM) methods employed for measuring circular economy (CE) indicators and CE aspects at different levels (micro, meso, and macro). For this purpose, a systematic literature review (SLR) was conducted in ISI Web of Science and Scopus databases. Further, the results summarized 22 MCDM techniques, 27 CE aspects, and 36 CE indicators. The SLR provides a concept map highlighting the relation of the level of circularity implementation (subdivided into micro-, meso-, and macro-levels) and MCDM techniques and demonstrates the interaction between CE aspects and indicators. The review provides an outline as to how MCDM techniques can solve problems related to CE aspects and marks the relevance in the use of CE indicators to support circularity aspects and to construct criteria in the methodologies applied.

Keywords Circular economy · Indicators · Circularity · Decision-making · Implementation · Multi-criteria

Introduction

With global primary materials use soaring, issues of supply security of primary materials and the associated environmental impacts of rising materials demand have received increased attention during the last decades (Wang et al. 2020). In this regard, there is a consensus on the need of a gradual transition to a more sustainable economic growth able to solve the challenges mentioned above (Geissdoerfer et al. 2017). The shift towards a sustainable and resource economy requires turning linear economies based on production-consumption-waste models into circular economy

(CE) models relying on production-consumption-reuse frameworks (Garcia-Bernabeu et al. 2020).

The concept of CE emerges as an alternative system aiming to decouple economic growth from resource constraints (Ghisellini et al. 2016). According to Reike et al. (2018), the CE concept claims for absolute resource input reduction and a balance among sustainability dimensions. A CE aims to keep products, components, and materials at the highest utility and value, wherein this value is maintained through extension of products' lifetimes by reuse, refurbishment, and manufacturing as well as closing of resources cycles, through recycling and related strategies (Bocken et al. 2017).

Besides that, CE has become an important field of academic research with a huge increase in the number of articles and journals covering this topic in recent years. Companies are also increasingly aware of opportunities promised by this model and have started to realize its value potential (Ellen MacArthur Foundation 2013; Geissdoerfer et al. 2017). However, several studies (Haas et al. 2015; Elia et al. 2017; Alamerew and Brissaud 2019; Alamerew et al. 2020) pointed out that while the concept of CE is being widely explored in different contexts, the definition of tools, criteria, and analysis methods that can assess different aspects of circular systems and the level of circularity is still lacking.

Responsible Editor: Philippe Garrigues.

✉ Lucila M. S. Campos
lucila.campos@ufsc.br

Paulo Vitor dos Santos Gonçalves
santospaulo.eng@gmail.com

¹ Graduate Program in Production Engineering (PPGEP), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Universitario Trindade, Florianópolis, SC 88062-451, Brazil

² Department of Production Engineering (EPS), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Universitario Trindade, Florianópolis, SC 88062-451, Brazil

Published online: 10 January 2022

Springer