



INTEGRAÇÃO DE PRINCÍPIOS DE ECONOMIA CIRCULAR NAS OPERAÇÕES E CADEIAS DE ABASTECIMENTO DE UMA INDÚSTRIA DE MOTORES ELÉTRICOS: UM CASO DE ESTUDO

GUILHERME DE SOUZA ANDRADE

setembro de 2023

INTEGRAÇÃO DE PRINCÍPIOS DE ECONOMIA CIRCULAR NAS OPERAÇÕES E CADEIAS DE ABASTECIMENTO NA INDÚSTRIA DE MOTORES ELÉTRICOS: UM CASO DE ESTUDO

Guilherme de Souza Andrade

1220520

2022/2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

INTEGRAÇÃO DE PRINCÍPIOS DE ECONOMIA CIRCULAR NAS OPERAÇÕES E CADEIAS DE ABASTECIMENTO NA INDÚSTRIA DE MOTORES ELÉTRICOS: UM CASO DE ESTUDO

Guilherme de Souza Andrade

1220520

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação da Dra. Maria Teresa Ribeiro Pereira e coorientação da Me. Natália Madalena Boelter

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar os meus profundos agradecimentos àqueles cujo apoio foi fundamental ao longo desta jornada. Embora tenha recebido auxílio de inúmeras pessoas, reconheço que uma enumeração exaustiva seria impraticável. Portanto, opto por expressar a minha gratidão aos que estiveram mais próximos durante os dias que culminaram na elaboração desta dissertação.

Aos meus pais, desejo expressar uma gratidão que transcende as palavras. Eles são os meus confidentes e cúmplices em uma jornada que teve início desde os meus primeiros passos neste mundo. A cada instante, eles me sustentaram com um apoio inabalável, infundindo-me com a força necessária para avançar, mesmo quando a minha própria fé vacilava. Eles são a âncora que me mantém firme diante das tempestades da vida, e a luz que ilumina o meu caminho nas noites mais escuras. Obrigado, do fundo do meu coração, por serem os pilares da minha jornada e os maiores exemplos de amor, dedicação e resiliência que conheço.

À instituição que me proporcionou a oportunidade de realizar um intercâmbio, o Instituto Federal de Santa Catarina, dedico os meus agradecimentos. Em particular, gostaria de expressar a minha gratidão à Professora Natalia Madalena Boelter, cuja iniciativa e perseverança foram fundamentais para a concretização da parceria com o ISEP, sob a forma do programa de Dupla Titulação.

Às engenheiras Maria Teresa Pereira e Viviana Pinto, desejo expressar a minha sincera gratidão pela orientação e apoio contínuo. A paciência, a cordialidade e os conhecimentos que compartilharam comigo ao longo deste período tornaram-se as minhas referências inestimáveis.

A todos os amigos que encontrei ao longo desta trajetória, agradeço por terem enriquecido a minha jornada com valiosas lições e por terem partilhado momentos que iluminaram os meus dias.

Por último, desejo expressar o meu agradecimento a todos aqueles que dedicaram o seu tempo para ler estas palavras. O vosso interesse e atenção são verdadeiramente apreciados.

RESUMO

O mercado de motores elétricos está a experienciar um crescimento significativo devido à sua adoção em diversos setores industriais. Esta crescente procura sublinha a importância da gestão do fim de vida dos motores elétricos e a necessidade de estratégias apropriadas para os materiais de alto valor neles incorporados. Esta dissertação tem como objetivo desenvolver um quadro para a implementação de práticas de economia circular na cadeia de abastecimento da indústria de motores elétricos. A revisão da literatura indicou que o tema da metodologia para a seleção do melhor cenário de fim de vida para motores elétricos industriais ainda carece de uma quantidade significativa de abordagens e estudos. A reciclagem, como estratégia de fim de vida do produto, foi identificada como a principal área de foco de pesquisa. A recuperação de motores era uma área pouco explorada, mas reconhecida como crucial para prolongar os ciclos de vida dos produtos. Para compreender a situação atual, foi realizada uma análise dos processos de enrolamento, incluindo uma revisão da cadeia de abastecimento da resina utilizada na impregnação do motor e do cobre usado para o enrolamento. Além disso, foi examinado o setor de serviços responsável pela recuperação de motores. Posteriormente, o quadro de economia circular proposto é aplicado de forma sistemática aos processos e à cadeia de abastecimento da indústria de motores elétricos. Este quadro foi concebido para servir como um ponto de partida, facilitando a adoção de estratégias de economia circular pela indústria. A implementação destas estratégias tem o potencial de melhorar significativamente o desempenho global em termos de sustentabilidade da indústria de motores elétricos.

PALAVRAS-CHAVE

Motores elétricos, Economia circular, Ecologia Industrial, Sustentabilidade, Energia

ABSTRACT

The electric motor market is undergoing remarkable growth, driven by its adoption across various industrial sectors. This increasing demand underscores the critical need for effective end-of-life management strategies for electric motors and the responsible handling of the high-value materials embedded within them. This dissertation endeavors to formulate a comprehensive framework for the integration of circular economy principles into the supply chain of the electric motor industry. The literature review revealed that methodologies for selecting the best end-of-life scenario for industrial electric motors are still a scarce topic. Among the identified strategies, recycling emerges as the primary focus area for research. Motor recovery, albeit underexplored, is recognized as pivotal in extending product lifecycles. To gain a comprehensive understanding of the current landscape, an exhaustive analysis of winding processes has been conducted. This analysis encompasses an in-depth review of the supply chain for the resins utilized in motor impregnation and the copper employed for winding. Furthermore, a close examination of the service sector responsible for motor recovery has been undertaken. Subsequently, the proposed circular economy framework is systematically applied to the processes and supply chain of the electric motor industry. This framework is designed to serve as an inaugural step, facilitating the industry's adoption of circular economy strategies. Implementation of these strategies has the potential to significantly enhance the overall sustainability performance of the electric motor industry.

KEYWORDS

Electric Motors, Circular Economy, Industrial Ecology, Sustainability, Energy

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Contextualização e enquadramento	15
1.2. Objetivos	17
1.3. Metodologia de Trabalho.....	18
1.4. Organização da Dissertação	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Sustentabilidade.....	19
2.1.1. Sustentabilidade Industrial	21
2.2. Economia Circular.....	23
2.2.1. Transição da Economia Linear para a Economia Circular	24
2.2.2. A Origem e os Princípios da Economia Circular	25
2.2.3. Fundamentos da Economia Circular	28
2.2.4. Modelos de Economia Circular	30
2.3. Circular Supply Chain.....	33
2.3.1. Modelos Circulares na Gestão da Cadeia de Abastecimento	35
2.3.2. Estratégias para uma Economia Circular na Cadeia de Abastecimento	36
2.3.3. Barreiras de Cadeias de Abastecimento Circulares	40
2.4. Indicadores e Métricas	42
2.4.1. Indicadores de Sustentabilidade.....	42
2.4.2. Indicadores de Economia Circular.....	43
3. Caso de estudo	48
3.1. Caracterização da Pesquisa	48
3.2. Motores Elétricos	49
3.2.1. Processo de Impregnação	50
3.3. A Cadeia de Abastecimento do Motor Elétrico.....	51
3.3.1. Processo de bobinagem de um estator	52
3.3.2. Processo de reparação de um motor elétrico	56
3.4. Transformação em Economia circular.....	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1. Oportunidade na manufatura e materiais	63
4.2. Oportunidade na manufatura e materiais	64
4.3. Oportunidade na gestão de fim de vida.....	65
4.4. Framework para o ciclo de um motor elétrico.....	66

5. CONCLUSÃO	69
5.1. Conclusões finais	71
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Objetivos de desenvolvimento sustentável [1].	15
Figura 2 – Representação gráfica de um desenvolvimento sustentável. Adaptado de [41].	20
Figura 3 – Economia Circular implementada para alcançar a sustentabilidade. Adaptado de Walker et al. (2022) [51].	22
Figura 4 – Diferença entre economia circular e sustentabilidade. Adaptado de Walker et al. (2022) [51].	23
Figura 5 – A economia circular num sistema industrial [52].	29
Figura 6 – Estratégias de modelos de negócios circulares. Adaptado de [75].	32
Figura 7 – Estratégias da circularidade na cadeia de suprimentos. Fonte: Adaptado de Potting [56].	38
Figura 8 – Colaboração entre modelos de economia circular e cadeias de abastecimento circulares. Adaptado de [103].	40
Figura 9 - Desenvolvimento da pesquisa. Adaptado de Cortez e Cruz [130].	48
Figura 10 - Processo de produção de estatores bobinados. Autoria própria.	53
Figura 12 - Fluxo logístico da resina de impregnação. Autoria própria.	54
Figura 11 - Fluxograma do processo de compra e utilização da resina de impregnação. Autoria própria.	55
Figura 13 - Processo de reparação de um motor elétrico. Autoria própria.	58
Figura 14 - Fluxo do processo de reparação de um motor. Autoria própria.	59
Figura 15 - Ilustração do fluxo sustentável de um processo de manufatura e remanufatura. Adaptado de Mejía-Moncayo et al. [152].	61
Figura 16 - Fluxo de reparação de um motor com conceitos de economia circular. Autoria própria.	65
Figura 17 - Framework proposto para um motor elétrico, com processos e materiais adaptados a economia circular. Autoria própria.	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Definições e interpretações da economia circular	27
Tabela 2 – Definições de gestão de cadeias de abastecimento. Adaptado de Theeraworawit et al. [90].	34
Tabela 3 – Comparação dos quatro conceitos de gestão de cadeia de abastecimentos em um contexto de economia circular. Adaptado de Theeraworawit et al. [90].	35
Tabela 4 – Colaborações para implementar estratégias de GCAC conforme discutido em fluxos de pesquisa relacionados e relevantes. Adaptado de [103].	39
Tabela 5 – Barreiras à circularidade nas cadeias de fornecimento. Adaptado de [110].	41
Tabela 6 - Principais indicadores circulares. Adaptado de Iacovidou et al. [126].	46

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
EC	Economia Circular
GCAC	Gestão da Cadeia de Abastecimento Circular
WCED	World Commision on Environment and Development
MFA	Análise de Fluxo e Material
MCI	Índice de Circularidade do Material
TVMA	Tempo de Vida dos Materiais na Antroposfera
NUM	Número de Utilizações de um Material
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
OEM	Fabricantes de equipamentos originais

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo faz-se o enquadramento e o âmbito da dissertação, definem-se os objetivos dela, assim como a metodologia para o seu desenvolvimento e organização da mesma.

1.1. Contextualização e enquadramento

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada por todos os Estados-Membros das Nações Unidas em 2015 e oficialmente em vigor desde 2016, estabelece as principais prioridades e aspirações para o desenvolvimento sustentável em escala global até 2030. Esta agenda tem como objetivo central mobilizar esforços colaborativos em torno de um conjunto de metas e objetivos compartilhados [1].

Compostos por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), esta iniciativa representa um apelo urgente à ação tanto dos países desenvolvidos quanto dos em desenvolvimento, em busca de uma colaboração global. Os ODS reconhecem que a erradicação da pobreza e outras formas de privação devem ser abordadas em conjunto com estratégias que promovam a melhoria da saúde e educação, a redução das desigualdades e o estímulo ao crescimento económico. Simultaneamente, é também enfatizado o combate às alterações climáticas e a preservação dos ecossistemas [1].

Esses Objetivos de Desenvolvimento Sustentável delineiam as prioridades e aspirações globais até 2030, abrangendo áreas que impactam a qualidade de vida de todos os cidadãos do mundo, bem como das gerações futuras. Os objetivos podem ser observados na Figura 1.



Figura 1 – Objetivos de desenvolvimento sustentável [1].

A relação entre indústria e meio ambiente é crucial para a performance dos negócios industriais, com os impactos ambientais aumentando a pressão sobre eles. A economia mundial cresce aproximadamente três pontos percentuais por ano, indicando um aumento na procura de mercado, assim como na produção para fazer face a essa procura [2]. Devido ao crescimento das sociedades consumidoras e o grande desenvolvimento das atividades industriais, houve o aumento da produção de resíduos, além dos dejetos, o fortalecimento da classe média aumentou a procura por recursos [3].

A sociedade por sua vez, participa de uma filosofia consumista linear, seguindo os princípios de pegar, usar e rejeitar. No longo prazo, não há sustentabilidade desse método, considerando que os recursos são finitos, assim como a capacidade de produção de resíduos. Considera-se assim dois desafios, a escassez de recursos e o desperdício [4]. Com o grande crescimento populacional mencionado anteriormente, estes problemas tornam-se críticos, ao passo que o consumo de recursos, geração de resíduos e emissões crescem diretamente proporcionais.

A quarta revolução industrial possibilitou à indústria métodos que aumentassem a produção em larga escala [5]. Com o crescimento econômico e o desenvolvimento industrial, o custo de produção diminuiu, e o poder de compra cresceu, resultando em um aumento de compra e descarte de produtos, gerando um abastecimento e consumo linear [6]. Devido a este aumento de procura e utilização de recursos naturais, o risco de geração de resíduos e emissões de carbono aumentou, levando a uma preocupação sobre mudanças climáticas e escassez de recursos [3].

A Economia Circular (EC) é referenciada por políticos [7], instituições e pesquisadores [8–10], como uma das principais estratégias para alcançar o desenvolvimento sustentável. A economia circular tem como objetivo quebrar o paradigma de que o crescimento econômico e a utilização de recursos limitados estão atrelados, projetando assim, uma economia industrial restauradora e regenerativa, a qual evita poluição e desperdício, mantém o valor agregado dos materiais e produtos e regenera os recursos naturais [11].

Dentre os objetivos de desenvolvimento sustentáveis, é indicado que a União Europeia está diretamente envolvida na concretização dos ODS 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14 e 15 [12]. O novo modelo de EC tem o potencial de oferecer uma oportunidade de modernizar a economia, tornando-a mais competitiva e, ao mesmo tempo, mais ecológica, garantindo um futuro sustentável. A implementação da EC também contribuirá para a redução das emissões de dióxido de carbono, economia de energia e diminuição da poluição do ar, do solo e da água.

O modelo circular prevê a necessidade de projetar ciclos fechados para os produtos e componentes, através de muitos ciclos de vida, buscando assim a máxima recuperação dos mesmos, visando sua forma original [13], promovendo diversos benefícios econômicos e ambientais para os processos industriais [14]. Essa abordagem requer uma perspectiva holística da gestão de valor de um produto, consistindo dos três principais pilares, a proposta de valor, o design do produto e as cadeias de abastecimento [4].

As cadeias de abastecimento são elemento-chave para a implementação de uma EC, diferenciando de uma cadeia de abastecimento linear [15], [16]. Essa diferença existe, pois, em uma cadeia de abastecimento aplicada a uma EC, suas atividades envolvem a criação de valor, entrega e retenção,

e seu design e performance influenciam significativamente pela proposta de valor e o design do produto [10], [14], [17].

Cadeias de abastecimento circulares são objetos atuais de estudo entre investigadores, sendo considerada uma das práticas mais eficientes para aumentar a performance empresarial nas três dimensões da sustentabilidade, social, económico e ambiental [18]. Ao contrário de cadeias de abastecimento lineares, o pensamento circular visa aspetos de geração de valor e a manutenção de produtos, materiais e componentes em um ciclo para estender a vida útil dos mesmos [19]. A implementação ajuda a aprimorar os materiais, recursos e a eficiência operacional de forma sustentável [20]. Cadeias de abastecimento circulares também exploram os diversos aspetos ambientais de forma sustentável, como design circular, simbiose industrial, parques industriais ecológicos, sistema de produto como serviço, processos integrativos, inovação ecológica, gestão de ciclo de vida dos produtos, economia verde, logística reversa, cadeias de abastecimento verdes, entre outras abordagens [21].

As cadeias de abastecimento circulares possuem o foco em restaurar e regenerar, aspetos estes oriundos da EC, utilização da filosofia dos 6Rs (repensar, recusar, reduzir, reutilizar, reparar, reciclar), princípios estes como reusar, reciclar, reduzir, reprojeter, reparar e remanufatura os produtos, criando cadeias fechadas que minimizam a necessidade de utilização de materiais, o desperdício, poluição e as emissões de carbono através das cadeias de abastecimento [22].

Para uma aplicação bem-sucedida de uma cadeia de abastecimento circular é necessário o conhecimento dos diversos riscos associados, sendo essencial o controlo e redução destes. Necessita-se o desenvolvimento de soluções e estratégias para mitigar os efeitos negativos de uma cadeia de abastecimento circular, e os riscos em sua implementação [23].

1.2. Objetivos

Tendo em conta a importância da sustentabilidade e da economia circular nos dias de hoje, considerou-se pertinente nesta dissertação perceber modelos e normalização desenvolvidos para a sua implementação numa cadeia de abastecimento específica. Esta dissertação tem como objetivo principal o estudo e avaliação da aplicação de conceitos incluídos no tema de Economia Circular às cadeias de abastecimento.

Assim, os objetivos primordiais da tese passam por:

- Perceber e interiorizar conceitos incluídos no tema da economia circular;
- Compreender como os modelos de negócio circulares podem causar impacto nas cadeias de abastecimento, relacionando o tema da economia circular com o das cadeias de abastecimento;
- Perceber como medir o impacto da implementação de modelos de negócio circulares nas cadeias de abastecimento;
- Analisar e/ou desenvolver metodologias, ferramentas ou frameworks a utilizar para compreender e implementar modelos de negócio circulares e o seu impacto nas cadeias de abastecimento

1.3. Metodologia de Trabalho

A metodologia para desenvolvimento dessa dissertação consiste numa revisão de literatura para a compreensão e identificação e sistematização dos modelos existentes em EC e nas cadeias de abastecimento. Com base nesta revisão fazer o desenvolvimento de um *framework/ roadmap* que permita a sua aplicação em um caso de estudo numa cadeia de abastecimento específica. Validação do mesmo a um caso de estudo numa cadeia de abastecimento.

1.4. Organização da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em vários capítulos, nos quais serão abordados os seguintes tópicos:

Capítulo 1, presente capítulo, será abordado o enquadramento do âmbito da dissertação, a definição dos objetivos, a metodologia utilizada no seu desenvolvimento e a sua organização.

Capítulo 2, realizada uma revisão da literatura relacionada com a sustentabilidade e a economia circular, bem como com as cadeias de valor circulares, conhecidas como "*Circular supply chain*". Também serão apresentados alguns *frameworks* e indicadores que servirão de apoio à implementação destes conceitos.

Capítulo 3, neste capítulo, serão apresentados, analisados e desenvolvidos os métodos que orientam o trabalho e a elaboração dos *frameworks*. Além disso, serão abordados materiais de apoio à implementação de cadeias de valor circulares, como o mapeamento dos processos e cadeias, bem como os dados recolhidos para a pesquisa.

Capítulo 4, este capítulo tem como objetivo a validação dos *frameworks* por meio de um estudo de caso realizado num ambiente real.

Capítulo 5, por fim, no quinto capítulo, será apresentada a conclusão do trabalho, juntamente com as perspectivas para futuras investigações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo serão abordados os conceitos de sustentabilidade, economia circular e cadeia de abastecimento circular (*circular supply chain*).

2.1. Sustentabilidade

A sustentabilidade tem desempenhado um papel importante no debate público e acadêmico nos últimos anos, devido ao crescente interesse nos impactos do desenvolvimento social e ambiental [24]. Existe uma consciência coletiva em relação a este tema, motivada pelos impactos profundos e irreversíveis no meio ambiente. Além disso, o aumento significativo da população mundial e, conseqüentemente, dos consumidores, intensifica este problema. Como resultado, as empresas começaram a seguir orientações que visam tornar os seus negócios mais sustentáveis, permitindo uma melhor absorção da procura e do consumo dos novos consumidores [25].

O setor industrial desempenha um papel crucial na busca pelo desenvolvimento sustentável, uma vez que tem vindo a dedicar-se cada vez mais à gestão de questões sociais e ambientais, contribuindo para alcançar os objetivos de sustentabilidade [26]. Várias empresas têm feito esta transição, adotando práticas produtivas sustentáveis e reorientando os seus modelos de negócio tradicionais, que antes se focavam apenas em benefícios económicos. Esta mudança de paradigma permite que as empresas cumpram não só as suas responsabilidades económicas, mas também sociais e ambientais [27], [28].

O termo sustentabilidade origina-se do francês *soutenir* que significa “segurar, manter; fornecer meios de apoio; aguentar” [29]. A palavra “*sustener*” pode ser dividida em um prefixo “*sub*”, que significa abaixo, e “*tener*”, que significa aguentar, o que traz o sentido literal de suportar debaixo. Essa relação entre o termo em francês e o significado atualmente atribuído a ele está no fato de que, sem sustentabilidade, a estrutura de algo pode desmoronar, enquanto maior sustentabilidade permite que um fenómeno dure por mais tempo [25].

A origem do conceito de sustentabilidade remonta ao princípio da silvicultura descrito por Hans Carl von Carlowitz em seu livro ‘*Silvicultura Oeconomica*’ [30]. Nessa abordagem, a quantidade de madeira retirada não poderia exceder o volume que é repostado, criando assim uma harmonia nas cadeias de abastecimento de madeira. A ideia era plantar e cultivar árvores de forma otimizada, levando em consideração as características específicas do solo e os requisitos necessários [31]. Posteriormente o princípio passou a ser utilizado para ecologia, sendo esse a habilidade da natureza de se regenerar, ou manter um certo nível [32]. Embora o conceito tenha sido originalmente concebido como uma regra para a preservação de florestas, ele é reconhecido como um ponto de partida fundamental para a compreensão do conceito de sustentabilidade, já que, em termos gerais, significa não utilizar mais recursos do que é possível renovar dentro de um sistema [31].

O conceito de desenvolvimento sustentável mais aceite é o referido no relatório de Brundtland para a WCED (*World Commission on Environment and Development*) em 1987, onde sustentabilidade é definido como “desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades” [33],

buscando conciliar o desenvolvimento económico com a proteção do equilíbrio social e ambiental. O relatório tem sua importância na introdução do conceito de “desenvolvimento sustentável” e pela introdução da influência social no conceito de sustentabilidade [34]. O conceito de desenvolvimento sustentável é baseado em princípios de sustentabilidade, incluindo uma perspectiva de longo prazo, a importância fundamental das condições locais e uma compreensão da evolução não linear dos sistemas ambientais e humanos [35].

Devido às diversas definições do conceito e de sua aplicabilidade em meio académico e prático, Tøllefsen [36] descreve a definição de Brundtland como um conceito mágico, pois anterior ao seu relatório, a definição de sustentabilidade era monotemática com foco no ambiente, sendo incluídos fatores sociais e económicos, temas estes que são considerados conflitantes com os objetivos sustentáveis e de desenvolvimento. Devido a essa contradição, considerando que desenvolvimento sustentável é considerado insustentável na perspectiva económica, o tema é considerado um oxímoro [37]. Apesar das muitas definições de desenvolvimento sustentável, o Relatório de Brundtland contribuiu para conceituação e colocando-o no topo da agenda da ONU e de outras organizações [38].

A teoria dos três pilares da sustentabilidade é outro conceito amplamente utilizado, onde busca-se alcançar a sustentabilidade por meio do equilíbrio entre os efeitos sociais, económicos e ambientais. Essa abordagem representa a importância de considerar todos os pilares de forma abrangente para expressar a sustentabilidade [39]. Nessa perspectiva, os fatores económicos só podem ser considerados sustentáveis se estiverem em consonância com as esferas sociais, e ambos os aspetos devem estar em harmonia com a capacidade ambiental para serem verdadeiramente sustentáveis [40]. No entanto, a teoria dos três pilares gera controvérsias, uma vez que o crescimento económico, embora necessário para o desenvolvimento da sociedade, muitas vezes é visto como a causa de problemas ambientais e sociais. Os aspetos sociais referem-se a áreas como educação, saúde e sistemas públicos, enquanto os aspetos ambientais dizem respeito à qualidade do ar, da água e aos impactos na biodiversidade [41]. A Figura 2, faz uma representação gráfica de um desenvolvimento sustentável considerando os três pilares.

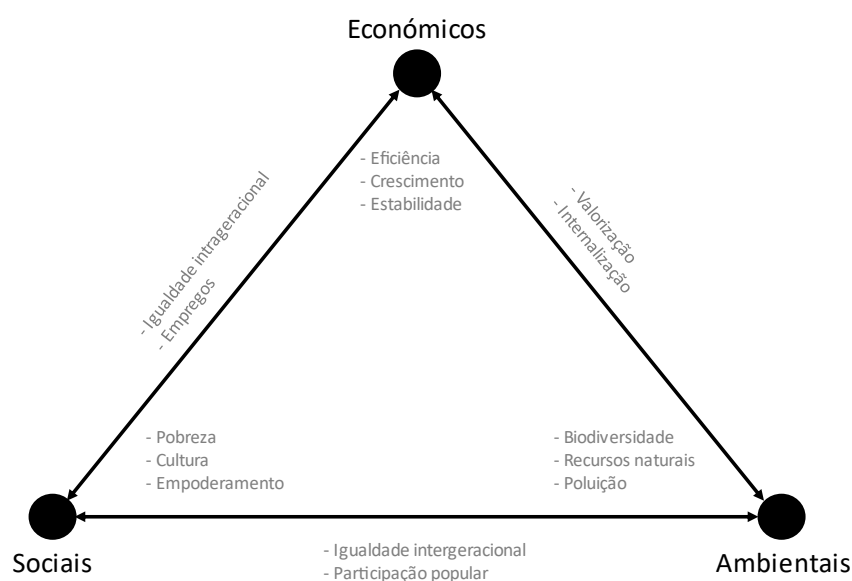


Figura 2 – Representação gráfica de um desenvolvimento sustentável. Adaptado de [41].

Para Salas-Zapata e Ortiz-Muñoz [42], definições muitas vezes não são as melhores ferramentas para entender o significado de um conceito, onde o mesmo pode ser esclarecido através de como a comunidade o utiliza. Desta forma, chegou-se a quatro formas de utilizar o conceito de sustentabilidade, sendo elas:

- Como critérios sociais-ecológicos para guiar as ações humanas;
- Como uma visão da humanidade, através da convergência dos objetivos sociais e ecológicos de um sistema de referência particular;
- Como objeto ou fenómeno que ocorre em certos sistemas sociais-ecológicos;
- Como abordagem que envolve a incorporação de variáveis sociais e ecológicas no estudo de uma atividade.

2.1.1. Sustentabilidade Industrial

Com o crescimento do desenvolvimento sustentável, surgiram várias teorias relacionadas à sustentabilidade industrial, sendo as principais a responsabilidade social corporativa, partes interessadas (stakeholders) e a sustentabilidade corporativa [43]. A responsabilidade social corporativa refere-se às práticas adotadas pelas empresas para melhorar o seu desempenho e alcançar responsabilidade social e sustentabilidade a longo prazo [44]. A teoria das partes interessadas (stakeholders) aborda a perspectiva lógica das corporações na manutenção de relações com os seus stakeholders, visando ao desenvolvimento de recursos e à sustentabilidade dos negócios. Esta abordagem surgiu com o objetivo de tornar as estratégias empresariais mais efetivas [45]. Já a sustentabilidade corporativa concentra-se não apenas no sucesso económico das organizações, mas também nos aspetos sociais e ambientais, auxiliando as empresas a alcançar o crescimento económico sem deixar de cumprir as suas responsabilidades sociais e ambientais [46].

A sustentabilidade corporativa pode ser considerada uma ferramenta de análise para a redução de custos, gestão de riscos, desenvolvimento de novos produtos e promoção interna da cultura, valores e estrutura organizacional de uma empresa. A pressão proveniente de fontes externas, como os stakeholders do negócio, novas leis ou mesmo o receio de perder quotas de mercado, pode levar as organizações a redirecionarem o seu foco para a sustentabilidade [47].

Devido ao consumo excessivo de materiais não renováveis, as práticas industriais geralmente não são sustentáveis. Portanto, é necessário procurar soluções que se enquadrem neste modelo, evitando um consumo destrutivo. Para isso, é essencial integrar aspetos provenientes da teoria dos três pilares, o que requer uma mudança drástica nos processos produtivos. Um processo sustentável, por sua vez, geralmente implica em produzir menos, mas com maior qualidade e durabilidade, causando um baixo impacto ambiental e gerando uma alta lucratividade [47].

Veleva e Ellenbecker [48] sugerem algumas condições necessárias para que uma indústria possa ser considerada sustentável entre elas:

- Redução do uso de matéria prima natural e energia;
- Uma maior conservação dos materiais, reduzindo assim o desperdício;

- Prevenir o desperdício, através da reutilização e reciclagem de produtos;
- Eliminação de produtos não recicláveis e produtos aceitáveis ambientalmente;
- Uso de tecnologias limpas no processo produtivo e ciclo de vida de um produto;
- Redução de necessidade de transporte;
- Projeto de produtos que são facilmente reparáveis, adaptáveis e duráveis;
- Incentivo a questões sociais;
- Viabilidade económica.

A ferramenta para implementação da sustentabilidade nas organizações ainda apresenta algumas limitações, como a necessidade de abranger as organizações como um todo, falta de integração entre os três pilares na avaliação da sustentabilidade como um todo, e a complexidade de suas ferramentas para serem usadas em um processo produtivo nas indústrias [49]. Outro problema encontrado é a independência de cada atributo sustentável e as naturezas qualitativas do tema, gerando problemas de dados fragmentados e limitada transparência nos relatórios [50].

Há diversas maneiras de atingir os objetivos sustentáveis de uma organização, e de entre estas muitas formas, está a aplicação da economia circular nos sistemas. Algumas empresas acreditam que a circularidade é parte da sustentabilidade sendo a economia circular um mais extremamente crítico para atingir e desenvolver os objetivos ambientais e económicos de uma companhia, principalmente no mais que rege os recursos utilizados nos sistemas. A economia circular também ganha força por sua abordagem com foco económico, objetivos claros e aplicação de estratégias, especialmente sobre a gestão de cadeias de abastecimento [51].

Walker et al. [51] identifica duas perspectivas de correlação entre sustentabilidade e economia circular. A primeira perspectiva pode ser observada na Figura 3, onde o conceito de economia circular é aplicado para atingir a sustentabilidade, porém sustentabilidade é um conceito que vai além da economia circular. Já a Figura 4 representa a segunda perspectiva, onde a diferença entre os conceitos não é importante, pois possuem objetivos similares.

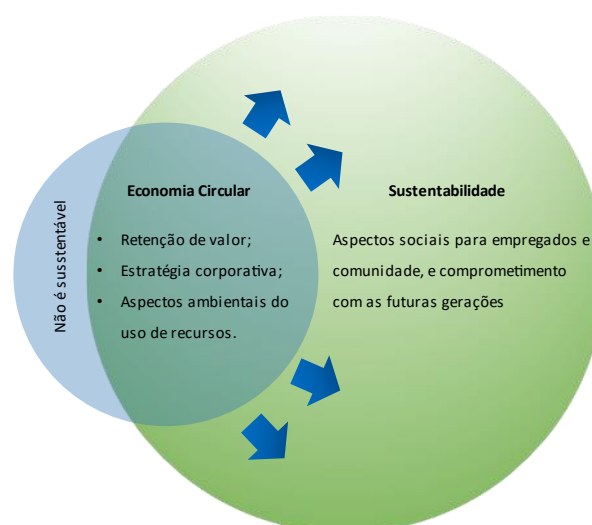


Figura 3 – Economia Circular implementada para alcançar a sustentabilidade. Adaptado de Walker et al. (2022) [51].

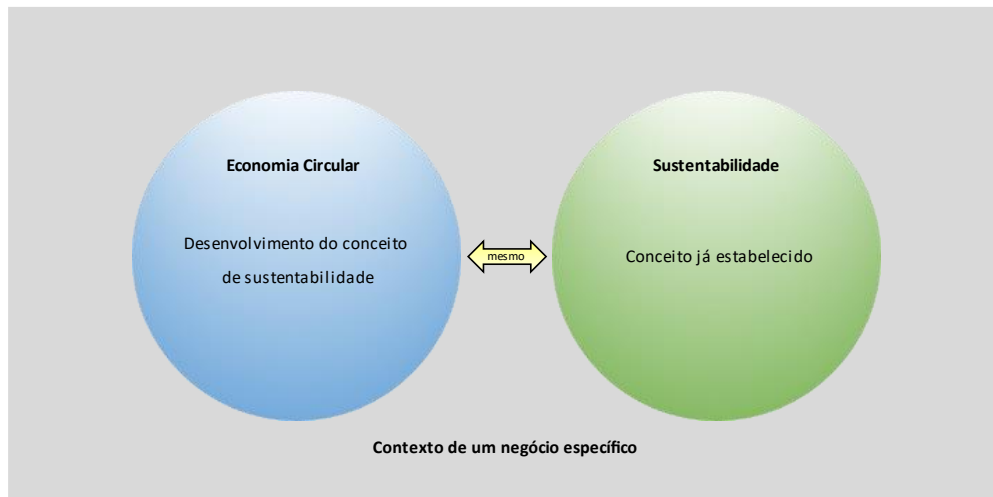


Figura 4 – Diferença entre economia circular e sustentabilidade. Adaptado de Walker et al. (2022) [51].

A economia circular é descrita como uma abordagem mais operacional, prática e compatível com as estratégias de negócio existentes com fins lucrativos e foco nos recursos. Além disso, dentre os três pilares, há um foco maior nos domínios que tangem os aspetos ambientais e económicos em suas métricas [51].

2.2. Economia Circular

Uma das definições de economia circular mais frequentemente citadas, que incorpora elementos de várias disciplinas diferentes, foi fornecida pela Ellen MacArthur Foundation [52], que descreve a economia circular como “um sistema industrial que é intencionalmente restaurador ou regenerativo em sua concepção. Substitui o conceito de ‘fim de vida’ por restauração, promove o uso de energia renovável, elimina o uso de produtos químicos tóxicos que prejudicam a reutilização e busca eliminar o desperdício por meio do design superior de materiais, produtos, sistemas e, dentro disso, modelos de negócios”.

É um sistema económico que substitui o conceito de “fim de vida” pela redução, reutilização alternativa, reciclagem e recuperação de materiais nos processos de produção/distribuição e consumo. Ela opera em níveis micro (produtos, empresas, consumidores), meso (parques eco industriais) e macro (cidade, região, nação e além), com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável, criando simultaneamente qualidade ambiental, prosperidade econômica e equidade social, em benefício das gerações atuais e futuras. Isso é viabilizado por modelos de negócios inovadores e consumidores responsáveis [53].

Este subcapítulo tem como objetivo explorar os princípios fundamentais da economia circular, analisar seus benefícios e desafios, e examinar como essa abordagem transformadora está moldando o futuro da economia global. Ao longo deste subcapítulo, mergulharemos no universo

da economia circular, aprofundando-nos em seus princípios fundamentais e discutindo seu impacto potencial na sustentabilidade e eficiência dos sistemas económicos. Através desta análise, busque-se compreender o papel da economia circular na transição para um modelo mais regenerativo e sustentável, refletindo sobre suas implicações para as empresas, governos e sociedade como um todo.

2.2.1. Transição da Economia Linear para a Economia Circular

Desde a Revolução Industrial, as empresas e os consumidores adotaram um modelo linear de criação de valor, que começa com a extração e termina com o descarte. Este sistema, baseado em “pegar, fazer e deitar fora”, revela-se cada vez mais desperdiçador perante as tendências modernas [54]. Embora tenham ocorrido melhorias significativas na eficiência dos recursos, os sistemas que dependem apenas do consumo, em vez da regeneração desses recursos, resultarão em grandes perdas em toda a cadeia de valor [52]. Uma tendência recente revela o desperdício inerente ao sistema “pega-faz-desperdiça”, tornando possível e prático conservar ao máximo os produtos e seus ingredientes para que deles se obtenham maiores lucros [54].

O modelo de produção linear amplamente utilizado na indústria demonstra ser altamente ineficiente, levando a um desperdício desnecessário de recursos em várias etapas do processo produtivo. Uma das principais formas de perda de recursos ocorre na cadeia produtiva, onde grandes quantidades de material são perdidas desde a extração até à fabricação final. Isto gera resíduos prejudiciais ao meio ambiente e que podem afetar a sustentabilidade da produção [55].

À medida que os materiais chegam ao fim da sua vida útil, as taxas de recuperação convencionais são geralmente mais baixas do que as taxas de produção primária. Isto significa que muitos materiais reaproveitáveis acabam por ser deitados fora, aumentando a procura por novos recursos naturais e levando à escassez de matérias-primas. O consumo de energia também representa um problema para o modelo de produção linear, pois deitar um produto num aterro significa perder toda a sua energia residual. Apenas uma fração dessa energia é recuperada através da incineração ou reciclagem de resíduos, mas a reciclagem economiza significativamente mais energia. No entanto, o uso de recursos energéticos nos modelos de produção linear é tipicamente mais intensivo nas etapas de extração de materiais da terra e transformação em formas comercialmente utilizáveis [55].

Por fim, os modelos de produção linear também podem levar à erosão dos serviços ecossistêmicos, ou seja, aos benefícios ecossistêmicos que sustentam e aumentam o bem-estar humano. Isto é particularmente preocupante para as florestas, um dos serviços ecossistêmicos mais importantes do mundo. [55].

Com base em diversos indicadores, é possível inferir que os modelos lineares frequentemente enfrentam particularidades nos contextos em que operam, exigindo assim uma transformação mais robusta dos paradigmas de funcionamento da economia tradicional. Tais transformações podem ser fundamentais para enfrentar as complexidades atuais e futuras do sistema económico.

Portanto, é fundamental procurar novas abordagens que possam superar as limitações dos modelos lineares e contribuir para um desenvolvimento mais sustentável e eficiente [52]. A

degradação dos sistemas naturais representa uma ameaça significativa para a produtividade das economias e para os sistemas de sustentação da vida no Planeta, com consequências ambientais negativas relacionadas ao modelo linear, incluindo perdas económicas e resíduos [56].

A transição de um modelo linear para um modelo de economia circular é uma mudança disruptiva que exige alterações radicais e soluções inovadoras. É necessário abandonar os métodos de trabalho atuais e abraçar novas ideias e métodos para criar produtos de forma mais sustentável. A economia circular propõe uma abordagem que visa maximizar o valor dos recursos ao longo do seu ciclo de vida, promovendo a redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais, bem como a regeneração de sistemas naturais [57].

Essa transição de uma economia anteriormente linear para um sistema circular vai além de ajustes para reduzir os impactos negativos do modelo de negócio. Representa uma mudança sistémica que promove a resiliência a longo prazo, gerando oportunidades económicas e comerciais, além de proporcionar benefícios ambientais e sociais [52]. Para muitas empresas, aumentar a circularidade dos seus processos implica novos projetos nas suas tecnologias, produtos, serviços, operações e modelos de negócio [58].

De acordo com Lieder et al. [3], para ter sucesso na implementação da economia circular, é necessário adotar uma estratégia combinada de cima para baixo e de baixo para cima, levando em consideração os interesses de todas as partes interessadas, como formuladores de políticas, entidades governamentais e indústrias. É importante evitar a priorização exclusiva dos benefícios ambientais ou económicos em detrimento um do outro. O objetivo final é alcançar uma economia e ambiente natural totalmente regenerativos. Ao nível industrial, é essencial considerar abordagens multidisciplinares que envolvam perspectivas empresariais, desenvolvimentos tecnológicos e políticas. A implementação da economia circular deve começar com o desenvolvimento organizacional, com atenção especial à gestão da mudança e à mentalidade gerencial, aproveitando tecnologias maduras, como a tecnologia da informação e comunicação, para promover a economia circular em grande escala.

Ao adotar uma abordagem holística, considerando os aspetos ambientais, sociais e económicos, a economia circular tem o potencial de criar um sistema mais resiliente, eficiente e sustentável. Ela pode impulsionar o crescimento económico, gerar empregos verdes, reduzir a dependência de recursos naturais finitos e minimizar os impactos negativos no meio ambiente [59], [60].

A força do conceito de economia circular reside na sua capacidade de criar sinergia entre conceitos anteriormente relacionados e atrair formuladores de políticas e empresas para um esforço unificado de reduzir os impactos ambientais negativos das atividades de produção e consumo [61].

A transição para uma economia circular pode exigir mudanças sociais e institucionais, incluindo inovações em tecnologia, design de produtos e modelos de receita, bem como uma revisão de regras codificadas, costumes e crenças [51].

2.2.2. A Origem e os Princípios da Economia Circular

O conceito de economia circular tem origem em diversas áreas e foi introduzido pela primeira vez pelos economistas ambientais David Pearce e Turner [62] no livro *Economics of Natural Resources*

and the Environment, introduzindo o conceito de sistemas de economia circular, baseando-se nas ideias do economista ecológico Boulding [63]. Boulding descreveu a economia como um sistema circular, um pré-requisito para a manutenção da sustentabilidade da vida humana na Terra, com um sistema fechado e baixa troca de matéria com o exterior, enfatizando que a economia e o meio ambiente devem coexistir. De acordo com esses autores, as funções econômicas de um ambiente podem ser identificadas como a provisão de recursos, sistema de suporte à vida e o descarte de desperdício e emissões [64].

O termo economia circular tem tanto um significado linguístico como descritivo. Linguisticamente, é um antônimo de uma economia linear. Uma economia linear é aquela definida como a conversão de recursos naturais em resíduos, por meio da produção. Essa produção de resíduos leva à deterioração do ambiente de duas maneiras: pela remoção do capital natural do ambiente (por meio de mineração/colheita insustentável) e pela redução do valor do capital natural causada pela poluição dos resíduos. A poluição também pode ocorrer na fase de aquisição de recursos. Este é um sistema unidirecional e uma economia baseada nesse sistema tem sido chamada de “economia do cowboy” por Boulding [65].

Atualmente, diversos conceitos são utilizados para descrever o modelo de economia circular. Um deles é “um sistema regenerativo no qual a entrada de recursos e o desperdício, emissão e vazamento de energia são minimizados por meio da desaceleração, fechamento e estreitamento dos circuitos de material e energia, por meio do design, manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, reforma e reciclagem” [32].

Já Lazarevic e Valve [66] definem como “a criação de círculos perfeitos de fluxos lentos de materiais, promovendo assim uma mudança de perfil de consumidor para utilizador, permitindo uma dissociação do uso de recursos e impacto ambiental no crescimento económico”. Outra definição amplamente aceita é que uma economia circular é aquela que é restaurativa e regenerativa por meio do design, visando manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto grau de utilidade e valor em todos os momentos, distinguindo entre ciclos técnicos e biológicos [52].

Blomsma e Brennan [67] utilizam o conceito guarda-chuva, que consiste na criação de uma relação entre conceitos anteriormente não relacionados, concentrando a atenção em uma qualidade ou característica compartilhada entre os conceitos abrangidos. Essa abordagem concentrou-se em diferentes definições e trabalhos em que a circularidade desempenhava um papel importante. A estratégia predominante encontrada foi a busca pela extensão do ciclo de vida dos recursos dentro de um sistema, por meio de um sistema de cascata de substâncias, reuso, reciclagem, serviço como produto e estratégias de longevidade do produto, entre outros. Dessa forma, o conceito está associado à gestão de resíduos e recursos, ao aumento da produtividade dos recursos e a novos modelos de negócio.

A Tabela 1 apresenta algumas das definições e interpretações sobre economia circular presentes na literatura.

Tabela 1 – Definições e interpretações da economia circular

Fonte	Definição/Interpretação
Sauvé et al. (2016) [68]	Economia circular refere-se à “produção e consumo de bens através de fluxos de materiais em circuito fechado que internalizam externalidades ambientais relacionadas à extração de recursos virgens e à geração de resíduos (incluindo poluição)”.
Su et al. (2013) [69]	O foco da economia circular gradualmente estende-se além das questões relacionadas à gestão de materiais e abrange outros aspetos, como eficiência e conservação de energia, gestão de terras, proteção do solo e da água.
Ghisellini et al. (2016) [70]	A remodelação radical de todos os processos ao longo do ciclo de vida dos produtos, realizada por atores inovadores, tem o potencial não apenas de alcançar a recuperação de materiais ou energia, mas também de melhorar todo o modelo de vida e económico.
Ellen MacArthur Foundation (2013) [52]	A economia circular é “um sistema industrial que é intencional e deliberadamente restaurador ou regenerativo. Substitui o conceito de ‘fim de vida’ pela restauração, direciona-se para o uso de energia renovável, elimina o uso de produtos químicos tóxicos que prejudicam a reutilização e visa eliminar o desperdício através do design superior de materiais, produtos, sistemas e, dentro disso, modelos de negócios”. O objetivo geral é “permitir fluxos eficazes de materiais, energia, trabalho e informação para que os capitais naturais e sociais possam ser reconstruídos”.
Geissdoerfer et al. (2017) [32]	Sistema regenerativo no qual a entrada de recursos e a produção de resíduos, emissões e vazamentos de energia são minimizados através da desaceleração, fechamento e estreitamento dos ciclos de materiais e energia.
Lazarevic e Valve (2017) [66]	A criação de círculos perfeitos de fluxos lentos de materiais, promovendo assim uma mudança de perfil de consumidor para utilizador, permitindo uma dissociação do uso de recursos e impacto ambiental no crescimento económico
Blomsma e Brennan (2017) [67]	A economia circular é um termo geral que abrange todas as atividades que reduzem, reutilizam e reciclam materiais nos processos de produção, distribuição e consumo.

Apesar das múltiplas definições e modelos de economia circular, o princípio central pode ser entendido como a redução do fluxo linear de consumo de recursos, buscando uma abordagem que vá além do conceito de “do berço ao túmulo” (*Cradle-to-Grave*), atuando em sistemas e abordagens existentes com o objetivo de torná-los menos destrutivos e desacelerar o esgotamento dos recursos naturais [71].

Alguns dos princípios de uma economia circular, de acordo com a Fundação Ellen MacArthur [52], são os seguintes:

- **Projeto sem desperdício:** Os ciclos técnicos e biológicos devem ser projetados de forma a alcançar uma melhor eficiência energética, reduzindo e reutilizando os resíduos produzidos. O desperdício ocorre quando os componentes não são projetados com a intenção de se encaixarem em seus respectivos ciclos. Os nutrientes biológicos e não-tóxicos podem ser facilmente tratados por meio do processo de compostagem, enquanto os componentes técnicos, como polímeros e ligas, devem ser projetados para serem reutilizados com baixo consumo energético e alta qualidade retida;
- **Criar resiliência através da diversidade:** A modularidade, versatilidade e adaptabilidade são características essenciais que devem ser priorizadas em cenários incertos e de crescimento rápido. Sistemas com muitas conexões tendem a ser mais resilientes a influências externas do que sistemas focados apenas na eficiência, que podem se tornar frágeis;
- **Confiança na energia de fontes renováveis:** A utilização de energias renováveis é essencial no processo produtivo de uma economia circular, tanto em termos de reservas energéticas quanto de capital humano. O objetivo é focar em um melhor consumo energético, considerado o gargalo da sociedade;
- **Pensar em “sistema”:** É crucial ter um entendimento de como as partes interessadas influenciam e se relacionam umas com as outras como um todo, em vez de focar apenas em partes isoladas do projeto, o que prejudica a tomada de decisões. Em sistemas não lineares, a combinação de condições iniciais imprecisas com feedbacks e respostas pode levar a resultados surpreendentes e não proporcionais à entrada.

Reutilização de desperdícios: Tanto nos ciclos técnicos quanto nos biológicos, são gerados resíduos que podem e devem ser tratados e reutilizados, alimentando os respectivos ciclos. Os nutrientes biológicos podem ser reintroduzidos na biosfera por meio de ciclos não-tóxicos. Já os componentes técnicos podem ter a qualidade do resíduo aprimorada por meio da técnica de *upcycling*, que consiste em criar produtos a partir de materiais descartados, em uma função diferente daquela para a qual foram inicialmente projetados.

Esses princípios refletem a necessidade de adotar uma abordagem sistêmica e holística para transformar o atual modelo linear de consumo em um modelo circular, que visa minimizar o desperdício, promover a reutilização e a reciclagem, e aumentar a eficiência dos recursos utilizados. Essa transição para uma economia circular é fundamental para alcançar a sustentabilidade ambiental e econômica a longo prazo [52].

2.2.3. Fundamentos da Economia Circular

Uma economia restaurativa também possui como característica um pensamento cascata, onde diferentes aplicações visam extrair a matéria-prima valiosa de um produto em diferentes fluxos de

valor, armazenando a energia do material, e ao longo da cascata, esta ordem diminui, aumentando sua entropia. A Figura 5 ilustra os fluxos técnicos e biológicos de materiais gerados.

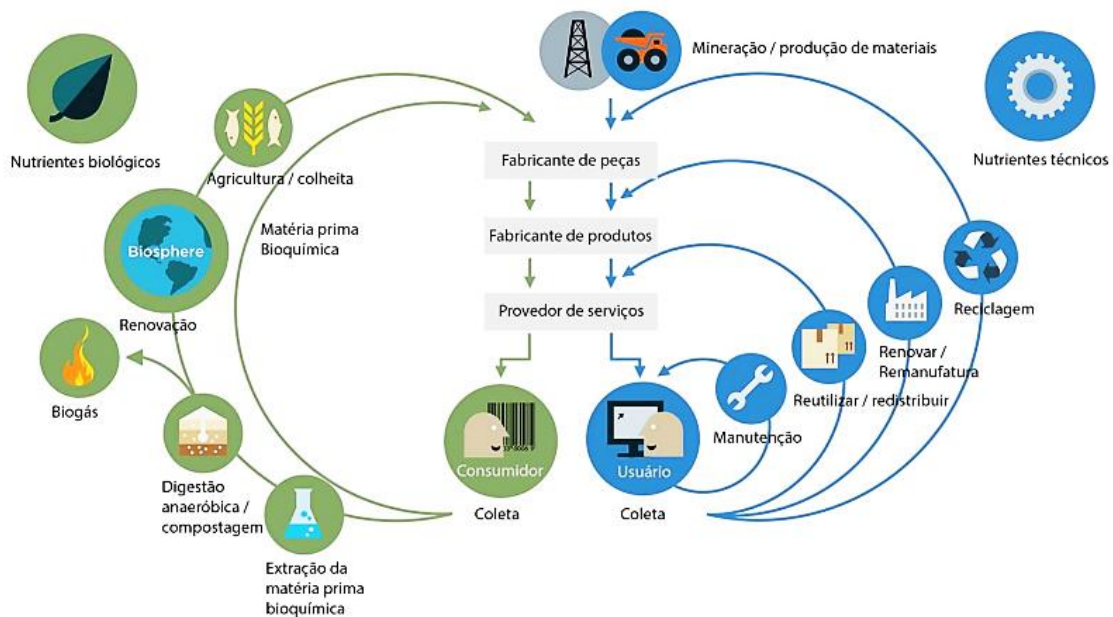


Figura 5 – A economia circular num sistema industrial [52].

No ciclo biológico, o material reentra na biosfera de forma segura, sendo regenerado pelos processos naturais (decomposição por seres vivos). Os materiais são consumidos de forma que seus componentes biológicos perdem a integridade original e suas qualidades, porém podem ser cascadeados para outras atividades, criando assim uma cadeia de valor, à medida que o capital natural é regenerado e mantido. Outro ponto importante é a utilização de energias renováveis, levando a uma redução significativa do consumo de combustíveis fósseis, o que, por sua vez, reduz a quantidade de gases de efeito estufa liberados no processo [72].

No ciclo técnico, é necessário a intervenção humana para a regeneração dos materiais, desde que haja energia suficiente. Nesse ciclo, os materiais são duráveis, e é necessário dissociar o rendimento do crescimento econômico, gerenciando o esgotamento de recursos e distribuindo os custos de trabalho, energia, material e capital de forma a aumentar a integridade do produto e dos componentes, em vez de descartá-los ao final do primeiro uso [72].

Materiais ‘técnicos’ são materiais finitos, utilizados em um sistema de loop fechado por meio do compartilhamento, manutenção, reutilização, remanufatura e reciclagem de produtos. Por outro lado, os materiais biológicos são renováveis e organizados em um sistema de loop aberto, em que os recursos são cascadeados por etapas subsequentes de extração, produção de materiais de base biológica, recuperação de energia e retorno de nutrientes para a biosfera, alimentando o próximo ciclo de produção primária [73].

O modelo de economia circular é projetado com o objetivo de fazer com que os produtos circulem pelo processo sem perder sua qualidade, visando à redução do desperdício de recursos. Medidas

como reutilização, reparação, reforma e reciclagem de materiais e produtos são adotadas para manter os materiais no ciclo produtivo sempre que possível [52].

Para que as práticas de economia circular tenham sucesso, são necessárias uma configuração simultânea e a implementação de quatro blocos construtivos chave, que são: design circular, modelo de negócios circular inovador, gestão de uma cadeia reversa e vários ativadores do sistema, incluindo novas formas de inovar e colaborar por meio de uma cadeia de valor [67]. É essencial concentrar-se em mais de um modelo de negócio para que um sistema não tenha seu potencial reduzido e possa gerar uma cadeia de valor. Um excelente projeto com qualidades e características *cradle-to-cradle*, mas que não possua uma cadeia de suprimentos reversa bem projetada, pode acabar sendo descartado de forma incorreta [72].

O conceito de economia circular tem sido alvo de críticas na literatura devido à consideração de ser impossível devido à segunda lei da termodinâmica [74]. No entanto, na Figura 5, o sistema não é definido como um sistema fechado, permitindo assim a busca pela circularidade e cascata de produtos e materiais sem que seja um pré-requisito que a performance seja igual à original produzida ou manufaturada. Esses fluxos podem ser circulados por meio de ciclos abertos [72].

2.2.4. Modelos de Economia Circular

Um modelo de negócios é a base dos negócios de uma empresa e é considerado um fator-chave para impulsionar a inovação. As decisões que você toma ao escolher seu modelo de negócios determinarão a estrutura e a direção do crescimento de sua empresa. No entanto, uma vez estabelecido um modelo de negócios, as empresas geralmente enfrentam desafios significativos ao fazer mudanças [75].

Evans [76] enfatiza a importância de as empresas entenderem completamente seus modelos de negócios atuais, adotando o conceito de modelos de negócios sustentáveis e potencialmente identificando novos modelos de negócios mais adequados para o futuro. Faz isso entendendo os desafios que as empresas enfrentam na adoção de modelos de negócios, considerando as complexidades dos modelos de negócios inovadores para a sustentabilidade e a necessidade de desenvolver novos modelos por meio da experimentação e do desenvolvimento de estratégias de negócios. É importante levar isso em consideração. Observe que avaliar o impacto de novos modelos é complexo e contextual, portanto, a inovação do modelo de negócios não deve ser tratada superficialmente. No entanto, a iniciativa será de grande valia para os empresários que desejam atender à urgência do desenvolvimento sustentável e da transição para um sistema industrial mais sustentável em meio aos crescentes desafios econômicos, ambientais e sociais.

Ao projetar um sistema de economia circular, vários fatores devem ser considerados. Infelizmente, muitos sistemas atualmente implementados não são totalmente circulares e frequentemente não levam esse conceito em consideração [77]. A transição para um modelo de economia circular é um exemplo de uma grande mudança que requer uma nova abordagem para fazer negócios. Quanto mais radical for uma tecnologia ou inovação de produto, mais difícil será o processo de implementação e maior a probabilidade de serem necessárias mudanças significativas no modelo de negócios tradicional [75].

Desde a década de 1970, a economia circular tem encontrado aplicações práticas em sistemas económicos e processos industriais, resultando no desenvolvimento de diferentes escolas de pensamento, que foram refinadas [17], [78]. Entre as escolas temos:

- **Design regenerativo:** associado à ideia de que todos os sistemas podem ser organizados de maneira regenerativa, com seus materiais e energias renovados ou regenerados.
- **Economia de Performance:** tem como objetivo principal estender a vida útil de um produto, promovendo bens duráveis, além de atividades de recondição e prevenção do desperdício. Também estimula a venda de serviços em vez de produtos, sendo referido como “economia de serviço funcional”.
- **Cradle to Cradle:** é uma filosofia que considera todos os materiais envolvidos nos processos industriais, sejam eles técnicos ou biológicos. Esse design compreende processos naturais seguros e produtivos e os utiliza como modelo para um fluxo de materiais industriais, onde os componentes são projetados para recuperação contínua e reutilização. Divide os materiais em dois metabolismos: o biológico e o técnico. O metabolismo biológico corresponde a nutrientes que são biodegradáveis, podendo ser retornados à natureza de forma segura. Isso inclui materiais naturais, mas também bio polímeros e outros materiais sintéticos que podem ser decompostos de forma não nociva. Já o metabolismo técnico é composto por materiais que têm o potencial de permanecer em um ciclo fechado, sendo reutilizados, recuperados e reusados, mantendo seu valor agregado ao longo de vários ciclos. No âmbito técnico, pode-se utilizar a estratégia de “produtos como serviço”, onde o consumidor utiliza o produto, mas é o fabricante que o possui, mantendo o controle do material valioso, com a estratégia de recuperar esses materiais e reinseri-los no ciclo [71]. O propósito, então, é substituir materiais tóxicos e descartáveis por produtos naturais que possam ser decompostos e utilizados em um ciclo industrial contínuo [79].
- **Ecologia Industrial:** envolve o estudo dos fluxos de materiais e energia nos sistemas industriais, visando a criação de processos de ciclo fechado, nos quais os resíduos se tornam insumos, eliminando a ideia de produtos descartáveis.
- **Biomimética:** é uma disciplina que estuda os princípios presentes na natureza e os utiliza para imitar e produzir designs e processos que resolvam problemas humanos. Essa abordagem busca simular formas, processos e estratégias encontradas na natureza para a solução de problemas, utilizando-a como medida de sustentabilidade e como inspiração, valorizando a natureza como fonte de conhecimento, em vez de apenas uma fonte de recursos.
- **Blue Economy:** é um movimento que se concentra na otimização dos recursos disponíveis por meio de um sistema de cascata, no qual os resíduos de um produto se tornam matérias-primas para criar um fluxo de valor.

Modelos de negócios circulares podem ser definidos como modelos de negócios que possuem circularidade, estendendo, intensificando e desmaterializando os ciclos de energia e materiais, reduzindo assim a necessidade de recursos, resíduos e emissões no sistema. Isso inclui medidas de reciclagem (circularidade), extensão da vida útil (extensão), intensificação da fase de utilização do produto (intensificação) e substituição de produtos

por serviços e software (desmaterialização) [80]. As quatro estratégias para um modelo de negócio circular podem ser observadas na Figura 6.

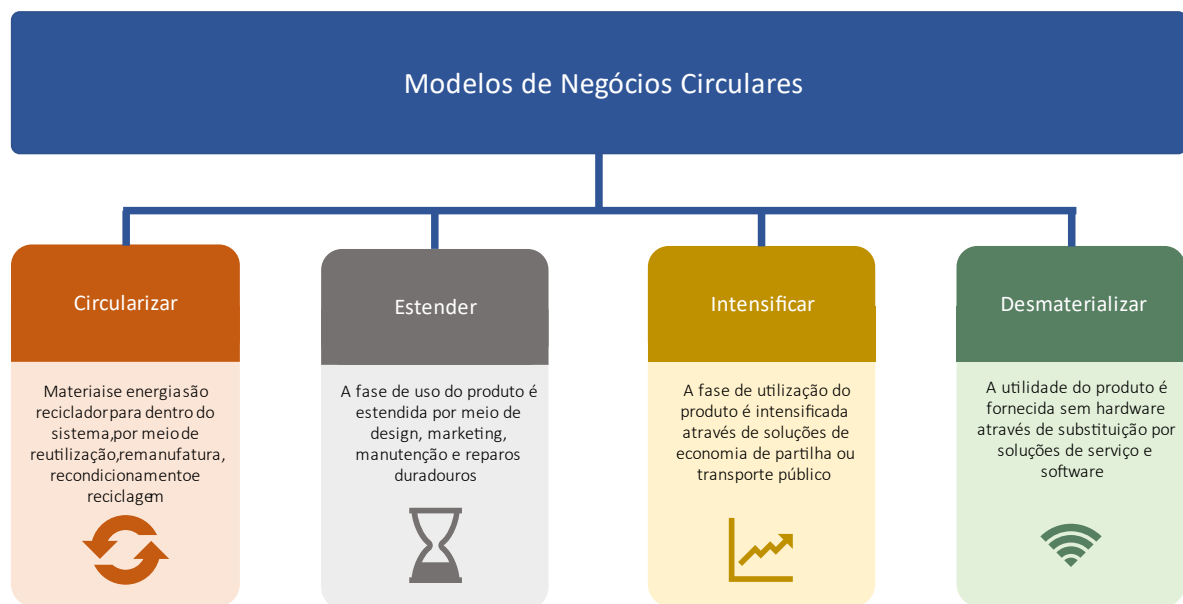


Figura 6 – Estratégias de modelos de negócios circulares. Adaptado de [75]

Circularizar envolve a reciclagem interna dos materiais dentro do próprio sistema, por meio de práticas como reuso, remanufatura, reforma e reciclagem. Por outro lado, estender os recursos em cada estágio do ciclo de vida de um produto implica em projetos que garantam a continuidade, designs atemporais, estratégias de marketing que incentivem a utilização por longos períodos, além de práticas de manutenção e reparo. Intensificar os recursos dentro dos ciclos implica em utilizar soluções que maximizem sua eficiência. Já a desmaterialização descreve a transição de uma abordagem baseada em hardware para serviços e soluções em software [81].

As estratégias de economia circular podem impulsionar modelos de negócios inovadores que vão além da mera preservação do produto. Estratégias como redundância, multifuncionalidade e intensificação do uso de produtos promovem a circularidade ao evitar o consumo de novos produtos ou criar padrões de consumo. Moraga et al. [82] propõem uma classificação das estratégias de economia circular, onde as cinco primeiras reconhecem as estratégias de preservação, enquanto o último grupo considera a medição do cenário de referência. Essas estratégias são classificadas da seguinte forma:

Estratégia de preservação da função: envolve modelos de negócios circulares que preservam a função dos produtos ou serviços, como plataformas de compartilhamento e esquemas que promovem a redundância e multifuncionalidade do produto;

Estratégia de preservação do próprio produto: foca em aumentar a vida útil do produto por meio de estratégias como durabilidade, reutilização, restauração, recondicionamento e remanufatura;

Estratégia de preservação dos componentes do produto: consiste na reutilização, recuperação e reaproveitamento de peças e componentes do produto.

Estratégia de preservação dos materiais: busca preservar os materiais por meio da reciclagem e do *downcycling*;

Estratégia de preservação da energia incorporada: visa a recuperação de energia durante processos como a incineração e o gerenciamento de resíduos;

Estratégia de medição da economia circular: refere-se à avaliação do progresso em direção à economia circular, comparando-o a um cenário de referência ou a ausência de uma estratégia de preservação.

2.3. Circular Supply Chain

Atualmente, devido ao crescimento das sociedades consumistas e ao desenvolvimento dramático das atividades industriais, a produção de resíduos sólidos e aterros tem-se intensificado cada vez mais. Além disso, devido ao crescimento da população mundial e, especialmente, ao forte crescimento da classe média, espera-se um rápido aumento na procura por recursos [3]. O aumento da globalização das fontes de abastecimento na década de 1980 levou ao desenvolvimento de várias definições e conceitos de cadeias de abastecimento e gestão da cadeia de abastecimento [83].

As cadeias de abastecimento são a unidade-chave de ação na transição para um negócio circular [84]. Dada a crescente população e o aumento do consumismo no mercado global, a abordagem da economia circular por si só não é suficiente para a produção, partes interessadas, fabrico etc., mas é necessário transformar a cadeia de abastecimento de um modelo linear para um modelo circular [85]. A integração entre economia circular e a gestão de cadeias de abastecimento é um desses conceitos que vem ganhando força [86].

Na realidade, são necessários modelos integrados de cadeia de abastecimento para a cadeia de abastecimento circular, na qual os produtos são devolvidos aos utilizadores finais através de operações de recuperação, incluindo reutilização, reparação, reconstrução ou reciclagem. Além disso, o objetivo dessa gestão é otimizar o consumo de recursos ao longo do ciclo de vida do produto, utilizando a reciclagem [87].

Este subcapítulo se concentra em explorar o conceito de Gestão da Cadeia de Abastecimento Circular (GCAC) e sua relevância no contexto da economia circular. Nesse sentido, o capítulo apresenta diferentes definições de GCAC propostas por pesquisadores.

Hassini et al. [88] definem a gestão de cadeias de abastecimento sustentáveis como a gestão das operações, recursos, informações e investimento de uma cadeia de abastecimento com o objetivo de aumentar o lucro das mesmas, ao mesmo tempo em que se minimiza o impacto ambiental e se aumenta o impacto no bem-estar social. Batista et al. [85], por sua vez, definem cadeia de abastecimento circular como “as cadeias de abastecimento coordenadas progressivamente e regressivamente através da integração do ecossistema de negócios para a criação de valor a partir de produtos/serviços, subprodutos e resíduos úteis que fluem ao longo da vida, prolongando ciclos que melhoram a sustentabilidade económica, social e ambiental das organizações”.

Além disso, Amir et al. [10] definem como “fechar o ciclo através de um design com foco no desperdício zero, onde os avanços e os fluxos reversos são integrados e otimizados para vários produtos ao longo do ciclo de vida, permitindo a restauração e regeneração de ciclos técnicos”, e citam que a definição tem o objetivo de mitigar as incertezas referentes à qualidade, quantidade e ciclos reversos. Já Seuring e Muller [89] definem como “a gestão dos fluxos de materiais, informações e de capital, bem como cooperação entre as empresas ao longo da cadeia de abastecimento enquanto objetificam todas as três dimensões do desenvolvimento sustentável, isto é, económico, ambiental e social, em conta quais são derivados dos requisitos do cliente e das partes interessadas”.

Farooque et al. [18] também mencionam que as definições por si só não refletem os principais aspetos que tornam o conceito de GCAC especial, que são a sua capacidade de restaurar e regenerar os ciclos por meio de um pensamento circular e a visão de desperdício zero, que é intrínseca à filosofia da economia circular. Levando isso em consideração, o autor propõe uma definição que integra os princípios ausentes no conceito, sendo esta: “a gestão da cadeia de abastecimento circular é a integração do pensamento na gestão da cadeia de abastecimento e seus ecossistemas industriais e naturais circundantes. Ela restaura sistematicamente materiais técnicos e regenera materiais biológicos em direção a uma visão de desperdício zero, por meio de inovação em todo o sistema, desde o design de produtos/serviços até o fim de vida útil e a gestão de resíduos, envolvendo todas as partes interessadas ao longo do ciclo de vida do produto/serviço, incluindo fabricantes de peças/produtos, prestadores de serviços, consumidores e utilizadores”.

Theeraworawit et al. [90] examinaram os conceitos propostos que envolvem a integração de conceitos de gestão da cadeia de abastecimento, sendo eles: gestão da cadeia de abastecimento verde, sustentável, de loop fechado e circular. Estes conceitos podem ser observados na Tabela 2. Os autores também mencionam que cada um dos conceitos tem uma perspectiva diferente em relação ao conceito de economia circular. Além disso, apenas a gestão das cadeias de abastecimento sustentáveis e circulares apresentam impacto nas três dimensões da economia circular (económica, social e ambiental).

Tabela 2 – Definições de gestão de cadeias de abastecimento. Adaptado de Theeraworawit et al. [90].

Conceito	Definição
Gestão da Cadeia de Abastecimento Verde	Integração do pensamento ambiental na gestão da cadeia de abastecimento, incluindo o design do produto, a seleção e o fornecimento de materiais, os processos de fabrico, a entrega do produto final aos consumidores, bem como a gestão do fim de vida do produto após o seu ciclo útil.
Gestão da Cadeia de Abastecimento Sustentável	A gestão dos fluxos de material, informação e capital, bem como a cooperação entre as empresas ao longo da cadeia de abastecimento, integrando objetivos nas três dimensões do desenvolvimento sustentável – económica, ambiental e social – que são derivados das exigências dos clientes e das partes interessadas.

Gestão da Cadeia de Abastecimento de Loop Fechado	O design, controle e operação de um sistema para maximizar a criação de valor ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, com recuperação dinâmica de valor de diferentes tipos e volumes de devoluções ao longo do tempo
Gestão da Cadeia de Abastecimento Circular	A coordenação das cadeias de abastecimento direta e reversa por meio da integração intencional do ecossistema de negócios para a criação de valor a partir de produtos/serviços, subprodutos e fluxos de resíduos úteis através de ciclos de vida prolongados que melhoram a sustentabilidade econômica, social e ambiental das organizações.

Tabela 3 – Comparação dos quatro conceitos de gestão de cadeia de abastecimentos em um contexto de economia circular. Adaptado de Theeraworawit et al. [90].

Conceito	Características	Resultados Esperados
Gestão da Cadeia de Abastecimento Verde	Integração da cadeia de abastecimento de ida e volta	Foco ambiental
Gestão da Cadeia de Abastecimento Sustentável	Envolvimento de clientes e stakeholders	Triple bottom line holístico
Gestão da Cadeia de Abastecimento de Loop Fechado	Maximização da criação de valor ao longo do ciclo de vida do produto	Foco ambiental e econômico
Gestão da Cadeia de Abastecimento Circular	Criação de valor por meio do ecossistema de negócios	Triple bottom line holístico

2.3.1. Modelos Circulares na Gestão da Cadeia de Abastecimento

Os modelos circulares desempenham um papel fundamental na gestão da cadeia de abastecimento, buscando a sustentabilidade econômica, ambiental e social. Mais et al. [91] aglomera os princípios do GCAC e define três diferentes modelos, parques eco industriais, cadeias de abastecimento verdes, e cadeias de abastecimento de ciclo fechado. Cada uma dessas configurações tem o objetivo de otimizar o fluxo de recursos e promover a eficiência ao longo do ciclo de vida dos produtos.

Parques Eco industriais: representam uma abordagem geograficamente limitada da cadeia de abastecimento, com o objetivo de fechar os fluxos de recursos através da circulação de resíduos e subprodutos entre diferentes processos industriais. Além disso, procuram aumentar a eficiência através do compartilhamento de estruturas e recursos, como energia, água e informações. O objetivo é minimizar o consumo de energia e matéria-prima, reduzir o desperdício e promover relações sustentáveis de forma econômica, ecológica e social. Para que um Parque Eco industrial seja bem-sucedido, é necessário o apoio de incentivos econômicos governamentais e a participação

ativa da comunidade. É também essencial criar consciência sobre os benefícios para as operações existentes e promover o efetivo compartilhamento de recursos [92].

Cadeia de Abastecimento Verde: A configuração da Cadeia de Abastecimento Verde vai além dos limites geográficos dos Parques Eco industriais, abrangendo fornecedores e clientes ao longo de toda a cadeia de abastecimento. O seu principal foco é aumentar a variedade e a eficiência em processos logísticos, armazenamento, embalagem, compras e outros, com o objetivo de prevenir resíduos e otimizar a utilização dos recursos [91]. Ao implementar práticas da economia circular em colaboração com fornecedores e clientes, as cadeias de abastecimento sustentáveis podem alcançar maior eficiência e obter ganhos significativos tanto a nível ambiental como económico [93]. Genovese et al. [94] afirmam que a integração dos princípios da Cadeia de Abastecimento Verde com uma economia circular é altamente benéfica, embora a sua viabilidade dependa do apoio governamental.

Cadeias de Abastecimento de Ciclo Fechado: são uma abordagem que se concentra na manutenção e racionalização do ciclo de vida dos produtos [91]. Genovese et al. [94] realiza a comparação entre uma cadeia de abastecimento de ciclo aberto de diversos materiais e produtores com uma cadeia de abastecimento focada em um produtor específico. O propósito das duas cadeias é a reutilização e recuperação do valor presente no material e evitar desperdícios, o que pode ser realizado através de logística reversa [95] e a integração de mercados secundários [91]. A filosofia subjacente às Cadeias de Abastecimento de Ciclo Fechado envolve projetar produtos de forma a facilitar melhorias, reparos, recuperação e remanufatura, a fim de evitar a obsolescência e a degradação física. Ao adotar esta abordagem, as organizações podem reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar o impacto ambiental [96].

2.3.2. Estratégias para uma Economia Circular na Cadeia de Abastecimento

Na cadeia de abastecimento, a estratégia é definida pelos elementos de proposta de valor (satisfação das necessidades dos segmentos de clientes), criação de valor (recursos e processos necessários para criar valor, incluindo relacionamentos com fornecedores e clientes), entrega de valor (recursos e processos necessários para entregar valor aos clientes) e captura de valor (estrutura de custos e fluxos de receita) [75]. Com o objetivo de atingir metas económicas e sociais, tem havido um foco especial na otimização do fluxo de recursos. Esse fluxo pode ser otimizado de três formas: estreitando-o (aumentando a eficiência do ciclo), desacelerando-o (aumentando o ciclo de vida dos produtos através de medidas como reparação, manutenção e remanufatura) ou fechando-o (fechando o ciclo entre a produção e o uso) [97].

A implementação de modelos circulares na cadeia de abastecimento pode ocorrer através de três estratégias principais:

- **Fechamento dos ciclos:** envolve medidas de reciclagem e visa o ciclo entre o pós-uso e a produção;
- **Desaceleração do ciclo:** intensifica o período de uso do produto através do design de produtos de longa duração e prolonga a vida útil através de reparação ou remanufatura, diminuindo assim o fluxo de recursos;

- Estreitamento do ciclo: melhora a eficiência dos recursos utilizados em cada produto [98].

Além disso, é possível encontrar a intensificação dos ciclos, aumentando o valor nas fases dos materiais e produtos, bem como a desmaterialização dos ciclos, substituindo produtos por serviços para aumentar a utilidade e a longevidade dos materiais [17].

A gestão da cadeia de abastecimento de forma circular abrange tanto os fluxos tradicionais como os ciclos reversos [95]. Isso gera relações e colaborações entre agentes económicos e não económicos, além de envolver as empresas na facilitação dos fluxos reversos nas cadeias de abastecimento [97].

Um dos principais focos no desenvolvimento das cadeias de abastecimento tem sido a utilização da metodologia Lean, que visa a redução de desperdício em todas as suas formas. Essa abordagem difere da abordagem circular e pode ser aplicada em diversos contextos da indústria. No entanto, estabeleceu-se uma conexão entre o Lean e a sustentabilidade, resultando no conceito de Lean Green, que se concentra em fazer mais com menos, reduzindo o uso de recursos e, conseqüentemente, as emissões do processo. No entanto, problemas como a complexidade operacional e os riscos de implementar sistemas focados apenas na eficiência levaram ao fim dessa abordagem exclusiva do *Lean* [83].

As cadeias de abastecimento orientadas para sistemas operacionais estáveis podem enfrentar dificuldades, mas quando projetadas com métodos mais flexíveis, podem contornar essas situações. A gestão das cadeias de abastecimento em uma era de constante turbulência pode ser encarada como uma oportunidade em vez de um risco, desde que se compreenda a sua natureza e impacto. Dessa forma, a adoção de cadeias de abastecimento circulares demonstra que as organizações acreditam que os problemas ambientais e os problemas relacionados ao ciclo de vida podem ser superados por meio de cadeias mais sustentáveis, em vez da abordagem tradicional. Essa mudança começa com um foco na eficiência sustentável, ou seja, um alinhamento entre os participantes da cadeia de abastecimento para reduzir seus impactos no produto e no processo. Além disso, é importante destacar o considerável investimento inicial nos fluxos produtivos de todas as partes envolvidas na distribuição do produto e em seu ciclo de vida [83].

O modelo tradicional de criação de valor nas cadeias de abastecimento geralmente baseia-se num fluxo unidirecional, conhecido como modelo linear [99]. Neste modelo, a ênfase na geração de receita recai no processo produtivo e nas vendas, e não no final do ciclo, onde frequentemente são os órgãos públicos que incentivam a recolha de resíduos [100]. Existe uma necessidade de um quadro holístico que abranja e integre medidas tangíveis e intangíveis, incluindo aspetos ambientais, económicos, logísticos, operacionais, organizacionais e de marketing [101].

Várias estratégias podem ser empregadas para criar uma economia circular (EC) na cadeia de suprimentos e reduzir o uso de recursos e materiais naturais e a geração de resíduos. Essas estratégias são organizadas em uma hierarquia de prioridades com base no grau de rotação, conforme mostra a Figura 7. Você pode implementar essas estratégias para atingir suas metas de EC em sua cadeia de suprimentos. Considerando a sequência dos dez Rs que vão desde recusar (R0) até recuperar (R9), passando por repensar (R1), Reduzir (R2), Reutilizar (R3), Reparar (R4), Restaurar (R5), Remanufatura (R6), Resinificar (R7) e reciclar (R8). É claro que a inovação tecnológica é uma condição constante para a criação de uma economia circular (EC) baseada no (R7), Reciclar (R8) e Economia Linear (EL). A transição para CE geralmente requer inovação e mudança institucional. A inovação pode estar relacionada à tecnologia, design de produtos e

qualquer tipo de receita financeira relacionada ao negócio. A mudança socioinstitucional envolve revisões de regras, costumes e crenças.

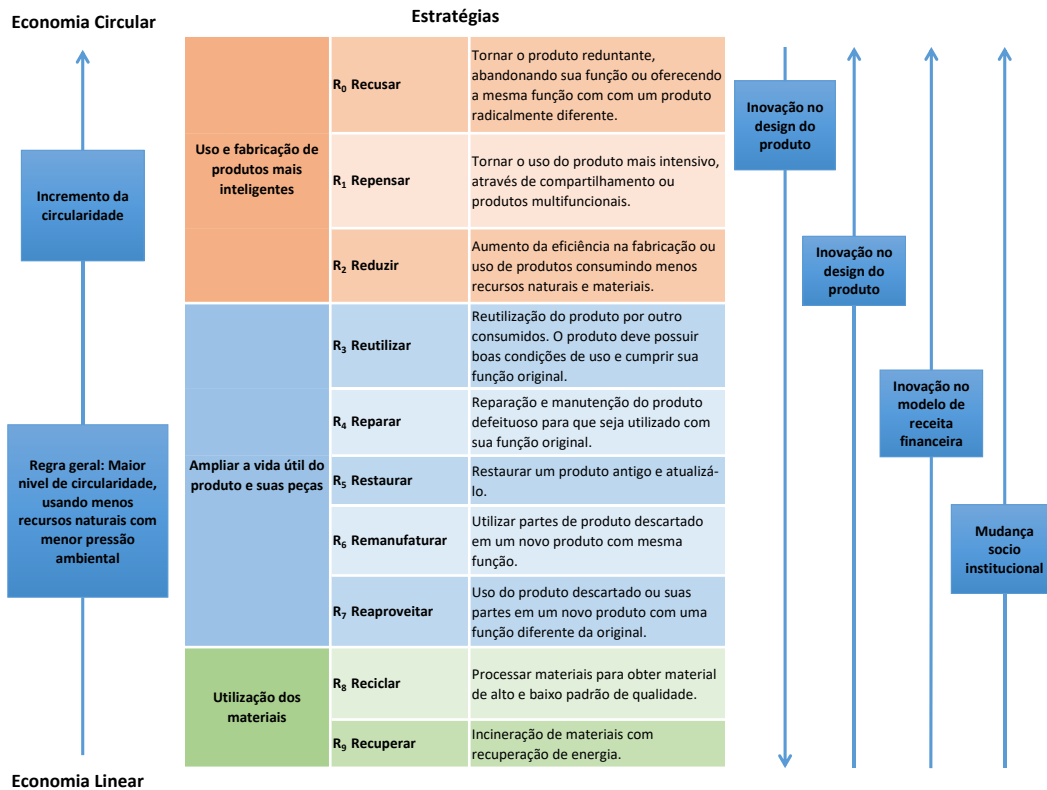


Figura 7 – Estratégias da circularidade na cadeia de suprimentos. Fonte: Adaptado de Potting [56].

A implementação de modelos circulares de negócio desafia as empresas a repensar sua criação, transferência e captura de valor além dos limites organizacionais [97]. As cadeias de abastecimento circulares permitem por sua vez o gerenciamento do fluxo de produtos, subprodutos e resíduos nas cadeias de suprimentos e seus ecossistemas industriais e naturais [102]. Isso é o que separa de outros conceitos similares, como cadeias de suprimento verdes, cadeias de abastecimento sustentáveis, logística reversa, cadeias de suprimento de circuito fechadas e simbiose industrial [103].

Os modelos de negócios circulares se concentram nas micro práticas das empresas para gerar valor a partir da circularidade, como na criação, captura e transferência de valor, já gestões das cadeias de abastecimento se concentram na colaboração para implementação das estratégias circulares, como fechar, desacelerar e estreitar os ciclos de recurso [103].

Para a implementação das estratégias para circularização das cadeias de abastecimento é fundamental estender a compreensão dos mapeamentos gerais das partes interessadas para as colaborações versáteis entre os atores das cadeias de suprimentos, particularmente na desaceleração e nas estratégias de fechamento [104]. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o entendimento existente sobre como colaborar para a implementação de estratégias de economia circular aplicadas a cadeias de abastecimento, sendo fragmentada em vários fluxos de pesquisa, segundo Aarika-Stenroos et al. [103].

Tabela 4 – Colaborações para implementar estratégias de GCAC conforme discutido em fluxos de pesquisa relacionados e relevantes. Adaptado de [103].

	Pesquisa de produção e fabrico	Pesquisa em gestão da cadeia de abastecimento, operações e logística	Pesquisa em Sustentabilidade e Economia Circular	Negócios industriais e pesquisa B2B
	Discussão crescente com foco principalmente na perspectiva da cadeia de suprimento	Fluxo estreito tomando a perspectiva de cadeias de abastecimento para investigar a implementação da Economia circular	Fluxo considerando cadeia de abastecimento como parte de modelos de economia circular como facilitador de diferentes dimensões da sustentabilidade	Análise da circularidade dos negócios industriais
Colaborações para implementação de estratégias de gestão de cadeias de abastecimento	<ul style="list-style-type: none"> - Colaboração para logística reversa, cadeias de abastecimento de circuito fechado e incentivos de devolução - <i>(re)design</i> colaborativo de produtos com princípios de economia circular e identificação de componentes, exclusão de matérias tóxicas e recolha aprimorada após o uso - Controlar os fluxos de materiais entre os colaboradores da cadeia de suprimentos, integrando tecnologia/digitalização nos processos - Colaborar para arrendar, alugar e compartilhar com modelos de serviço - Desenvolver parcerias e confiança entre os diferentes participantes da cadeia de abastecimento; engajando os membros em redes de abastecimento, em cadeias de abastecimento concorrentes e entre setores industriais 	<ul style="list-style-type: none"> - Colaboração para logística reversa e cadeias de abastecimento de circuito fechado; - Estender a colaboração para desenvolver as capacidades dos fornecedores em melhorar iniciativas de economia circular em toda a cadeia de abastecimento; - <i>(re)design</i> colaborativo de produtos com princípios de economia circular - Colaborar para alugar e utilizar serviços, habilitados por sistemas digitais - Envolver a rede de abastecimento multiatores em colaboração e redução de desperdícios em todas as etapas de produção, incluindo integração e coordenação entre parceiros logísticos e clientes interessados em descarbonizar a logística 	<ul style="list-style-type: none"> - Colaboração para logística reversa, cadeias de abastecimento de circuito fechado e simbiose industrial - Colaboração no desenvolvimento de produtos que aplica modelagem de longa vida e Design for X (por exemplo, design para durabilidade e extensão da vida) - Colaboração para modelos de negócio do sistema produto serviço e serviços de compartilhamento, leasing e aluguel, possibilitados pela utilização de tecnologias digitais - Desenvolver colaborações com clientes com objetivos de CE, utilizando diversas práticas de comunicação e compartilhamento de conhecimento ao longo da cadeia de abastecimento para garantir maior intensidade nos relacionamentos, e pactuar a distribuição de lucros para coordenar o sistema sob um grau fixo de compartilhamento de riscos - Selecionar os fornecedores corretos, construindo capacidade de relacionamento e desenvolvendo colaborações estreitas com eles para uma gestão eficiente e compartilhada de recursos e diminuição de desperdícios em todas as etapas da produção - Colaborar para alugar e utilizar serviços, habilitados por sistemas digitais 	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicar os benefícios económicos e ambientais aos colaboradores da cadeia de abastecimento, preparando propostas de valor por meio da ressurreição de lógicas de valor - Inclusão e fluxo de informações em colaboração entre todos os parceiros da cadeia de abastecimento, desde fornecedores de design e matéria-prima até usuários finais, prestadores de serviços e recicladores - Implementar modelos de contrato bem definidos que assegurem a coordenação das colaborações circulares da cadeia de abastecimento - Colaboração para modelos de negócio do sistema produto-serviço

Para promover a circularidade em seus sistemas, as empresas podem adotar práticas de gestão relacionadas à logística reversa e à criação de cadeias fechadas [105]. Isso permite que elas colaborem na produção em circuito fechado e na recuperação de materiais e recursos, fechando o ciclo entre o pós-uso e a produção[106]. Para prolongar a vida útil de seus produtos e seguir uma abordagem de desaceleração, as empresas podem aplicar o pensamento orientado para serviços em seus modelos de negócios [107] e adotar novas práticas de design de materiais e recursos incorporados aos produtos [83].

Além disso, as empresas também utilizam técnicas como o Design for X, sistemas de pagamento com base no uso, parcerias com fornecedores, envolvimento dos clientes e comunicação com partes interessadas para identificar e recolher produtos residuais, bem como maximizar sua utilização. Para implementar uma estratégia de eficiência de recursos energéticos e materiais, as empresas podem recorrer a políticas de colaboração ou adotar modelos de serviço que se baseiam no desempenho [103], [104].

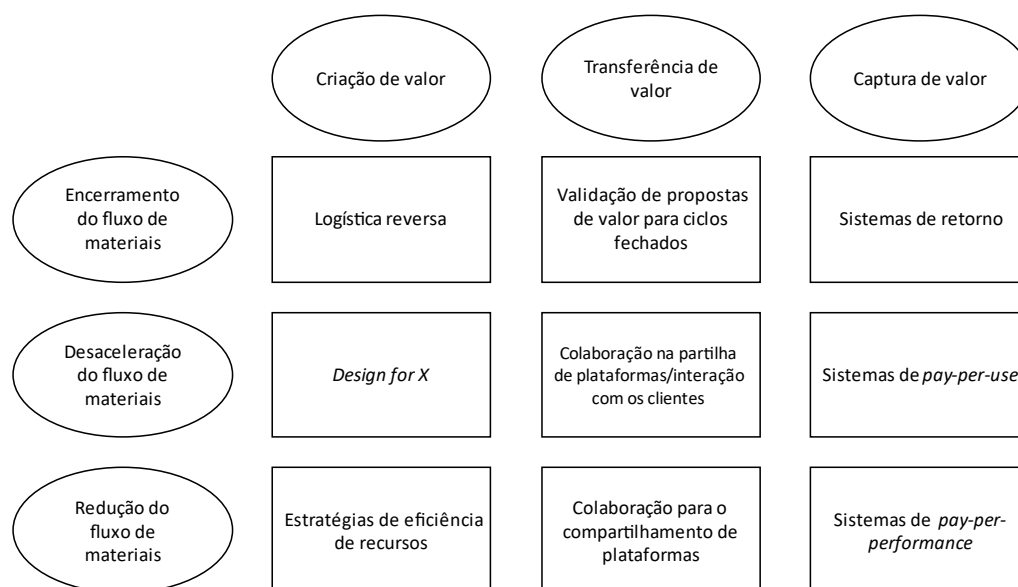


Figura 8 – Colaboração entre modelos de economia circular e cadeias de abastecimento circulares. Adaptado de [103].

2.3.3. Barreiras de Cadeias de Abastecimento Circulares

A transição de cadeias de suprimentos lineares para circulares é desafiadora para as organizações, necessitando de uma investigação e estudo para aplicar as estratégias mais efetivas, mitigando os problemas da implementação [6]. Determinar as barreiras da circularidade na cadeia de suprimentos é essencial para uma transformação total em termos de elementos organizacionais, operacionais, gerenciais, tecnológicos e financeiros [108]. Bressanelli et al. [109] afirmaram que é improvável que uma empresa redesenhe toda a cadeia de suprimentos repentinamente, sendo mais possível focar nos elementos da economia circular individualmente.

Segundo Kazancoglu et al. [110] é necessário enfrentar os desafios nas dimensões económica, social e jurídica, ambiental e tecnológica da gestão da cadeia de suprimentos para obter vantagem competitiva. A Tabela 5 aborda as barreiras para criar cadeias de abastecimentos mais sustentáveis e circulares.

Tabela 5 – Barreiras à circularidade nas cadeias de fornecimento. Adaptado de [110].

Dimensão principal	Barreiras
Económico	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de incentivo económico pela implementação de economia circular; • Alto custo de implementação de várias iniciativas “R”; • Maior custo de pesquisa e desenvolvimento; • Alto custo de investimento para transformação de Sistema circular.
Sociais e Jurídicos	<ul style="list-style-type: none"> • Inadequação dos sistemas jurídicos para construir um Sistema circular; • Transferência de conhecimento inadequada entre diferentes parceiros • Falta de mão de obra qualificada para aplicação de economia circular; • Falta de comprometimento do fornecedor na construção de um Sistema circular.
Meio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> • Padrões ambientais ineficientes para adoção de economia circular; • Problemas relacionados a emissões de carbono; • Falta de uso eficiente de recursos.
Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de incentivo para o desenvolvimento; • Problemas relacionados a dados, segurança, integração e privacidade; • Deficiência de infraestrutura técnica na adoção de economia circular; • Falta de integração entre processos tecnológicos e eco eficientes; • Falta de implementação de tecnologias emergentes;
Cadeia de abastecimento	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade em estabelecer o equilíbrio entre oferta e procura; • Pouco entendimento e conhecimento sobre economia circular na cadeia de abastecimentos; • Sistemas ineficientes de compartilhamento de informações em toda a cadeia de valor; • Falta de transparência em toda a cadeia de valor; • Incapacidade de lidar com a natureza dinâmica e a complexidade da cadeia de abastecimento.
Estratégias	<ul style="list-style-type: none"> • Falta políticas e missões corporativas na adoção da economia circular; • Comprometimento e suporte ineficiente da alta administração;

- Falta de colaboração, coordenação e cooperação entre as partes interessadas;
- Falta de modelos e estruturas de negócios eficazes na implementação da economia circular.

Segundo Kalmykova et al. [111], muitas partes da cadeia de valor, como manufatura, distribuição e vendas raramente estão envolvidas no quesito de economia circular, com o âmbito de produtos, materiais e setores sendo bem definidos, enquanto o âmbito do sistema raramente é abordado.

A falta de integração da sustentabilidade como assunto em todos os processos é considerada uma barreira para a transição para uma economia circular, se referindo aos diversos aspectos que tangem a implementação dela. A perspectiva de negócio precisa ser integrada, levando as questões de sustentabilidade a um nível estratégico crítico, e para que a mudança ocorra é necessário algo próximo de uma capacidade de gestão para inovações radicais, atuando em diferentes níveis hierárquicos, desde os participantes da cadeia de valor até os usuários finais [112].

2.4. Indicadores e Métricas

A palavra “indicador” deriva do verbo latino “indicare”, que significa “revelar” ou “indicar”, assim como “anunciar” ou “tornar público” [113]. Um indicador é uma representação do desempenho de um atributo, como a qualidade, características ou propriedades de um sistema, utilizando uma variável quantitativa ou qualitativa. Esses indicadores são acompanhados por dados que representam medições reais [48].

Os indicadores desempenham um papel fundamental na medição da sustentabilidade de uma organização industrial. Eles vão além de simples dados, fornecendo informações-chave sobre os sistemas físicos, sociais e económicos, revelando relações de causa e efeito. Essas medidas numéricas têm como objetivo oferecer perspectivas, orientar decisões e monitorar o progresso em relação a metas estabelecidas [48].

Avaliar o desempenho da sustentabilidade em uma organização industrial é crucial para verificar as condições ambientalmente sustentáveis que a envolvem. As decisões tomadas e a gestão do desempenho industrial servem como guia para ações futuras da empresa. Essa avaliação abrange a análise do impacto dos fatores internos e externos ambientais, sociais e económicos relacionados à empresa [114].

2.4.1. Indicadores de Sustentabilidade

Docekalová e Kocmanova [114] definem que para um modelo ser apto de medir a sustentabilidade de uma organização industrial é necessário que algumas condições sejam atendidas, entre elas:

- A integração dos aspectos da teoria dos três pilares;
- Ser baseado em indicadores financeiros e não financeiros;
- Refletir particularidades das atividades da indústria;

- Ser fácil de interpretar os seus resultados;
- Incluir princípios de benchmarking;
- Possuir dados disponíveis para o cálculo;
- Ter um cálculo simples.

No entanto, a medição da sustentabilidade em organizações industriais enfrenta dificuldades devido aos níveis elevados de incerteza e aos impactos que podem dificultar sua quantificação, além da natureza subjetiva do conceito [47]. Adicionalmente, muitas empresas ainda enfrentam resistência em adotar métodos sustentáveis em seus processos produtivos [115].

2.4.2. Indicadores de Economia Circular

Para avaliar o progresso em direção à economia circular e determinar quão eficazes são as estratégias circulares implementadas em níveis nacional, regional e local, é fundamental introduzir ferramentas de monitoramento e avaliação. Essas ferramentas incluem indicadores que permitem medir e quantificar o avanço dessas estratégias [116].

Os líderes responsáveis pela tomada de decisões precisam contar com instrumentos eficazes para avaliar se a adoção de práticas de economia circular é viável e se pode ser implementada uma abordagem de abastecimento que seja lucrativa, eficiente, circular e sustentável. As ferramentas de apoio à tomada de decisão utilizam uma variedade de indicadores de economia circular que abrangem diversos impactos, tanto dentro como entre as empresas, considerando todas as dimensões da sustentabilidade, ou seja, as vertentes econômica, ambiental e social [117].

Atualmente, a monitorização da economia circular em escala macro inclui métodos como a Análise de Fluxo e Material (MFA), análise de energia e análise de entrada e saída. A contabilização dos fluxos de materiais permite acompanhar as mudanças ao longo do tempo e analisar a eficiência dos programas de economia circular [111]. No entanto, a abundância de indicadores de economia circular torna difícil monitorar, controlar e avaliar o progresso da implementação de uma economia circular [72].

Alguns dos indicadores utilizados para medir a circularidade incluem o Índice de Circularidade do Material (MCI), que avalia as características de um produto, componente ou material, bem como o seu potencial de geração de resíduos. Além disso, temos o Tempo de Vida dos Materiais na Antroposfera (TVMA), que mensura o tempo que os materiais permanecem no ciclo da economia circular, e o Número de Utilizações de um Material (NUM), que se concentra na quantidade de vezes que um material é utilizado em diferentes grupos de produtos [82].

Para a seleção dos indicadores, a Comissão Europeia adotou critérios específicos, incluindo relevância política, abrangência de todas as categorias e recursos relevantes, consistência e abrangência, transparência quanto a possíveis compensações e impactos negativos, bem como aplicabilidade em diversas atividades econômicas. Além disso, existem outras listas de critérios que auxiliam na definição e escolha de indicadores, tais como os critérios RACER (relevante, aceitável, crível, fácil e robusto), SMART (específico, mensurável, alcançável, relevante e temporal) e CREAM

(clareza, relevância, económico, adequado e monitorável). Essas siglas representam critérios amplamente reconhecidos para indicadores de desempenho [118].

Os indicadores podem ser divididos em indicadores orientados à informação e a ação. Os indicadores orientados à informação consistem em uma longa lista de indicadores para cada setor socioeconómicos e não económico categorizados com base no tipo de informação que fornecem, como informações genéricas, económicas, relacionadas à água nutrientes e substâncias, energia e biodiversidade. Não são usados diretamente para a avaliação da circularidade do sistema, mas sim para apoiar a avaliação, fornecendo informações significativas para a interpretação dos resultados [119].

Os indicadores podem ser divididos em indicadores orientados à informação e indicadores orientados à ação. Os indicadores orientados à informação fornecem informações significativas para a interpretação dos resultados, mas não são usados diretamente para avaliar a circularidade do sistema. Por outro lado, os indicadores orientados à ação avaliam a circularidade dos sistemas multissetoriais e comunicam os resultados aos diferentes stakeholders. A escolha dos indicadores varia com base nos requisitos, finalidade e especificidade de cada sistema [119].

No entanto, não existe um conjunto de indicadores de economia circular amplamente aceito, entretanto, Nika et al. [119] referem que a circularidade máxima alcançável (indicador aspiracional que estima a procura de recursos/materiais que pode realmente atender aos seus requisitos usando fontes alternativas em relação ao requisito total do sistema), o índice circular (que combina os indicadores de uso circular e o fluxo circular) e a capacidade regenerativa (que compara a exploração de recursos naturais e a capacidade da natureza de se regenerar) estão entre os indicadores mais críticos, seguidos pelo uso e fluxo circulares, índice de *commodities* e resíduos.

É importante ter em mente que os indicadores circulares são apenas um elemento no processo geral de transição para a economia circular. A implementação bem-sucedida dessas práticas depende da sinergia entre os principais blocos de construção, incluindo o design de produtos, novos modelos de negócios, logística reversa, facilitadores e condições de sistemas. Os indicadores são considerados facilitadores dessa mudança, mas suas informações devem ser traduzidas em ações adequadas para gerenciar essa transição [118].

Vários tipos de medidas e indicadores são considerados para avaliar a eficiência da implementação de modelos de economia circular pelos participantes da cadeia de valor. Vários estudos sugerem indicadores e medidas que devem ser monitorizados durante a implementação de modelos de economia circular. Além disso, várias estruturas foram desenvolvidas para medir a circularidade, organizar o conhecimento existente, como melhores práticas e casos de uso, e monitorar sistematicamente as aplicações para que possam ser reaplicadas sempre que possível [120].

Quando as empresas pretendem melhorar o desempenho ambiental de seus produtos, normalmente realizam uma avaliação ambiental inicial, como uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) [121]. A ACV é uma ferramenta útil para avaliar o impacto ambiental de um produto em todas as fases do seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima até a disposição final. A partir dos resultados da ACV, as empresas podem identificar oportunidades para melhorar suas cadeias produtivas e implementar medidas para reduzir os impactos ambientais negativos [122].

Embora a economia circular ofereça uma visão mais ampla dos fluxos de energia e materiais dentro e entre as indústrias, técnicas quantitativas como a ACV são usadas para medir esses fluxos para a

tomada de decisões [123]. Os métodos baseados na ACV tornaram-se a ferramenta quantitativa mais amplamente utilizada para avaliar o desempenho da economia circular. Embora as avaliações do ciclo de vida sejam comumente usadas por fabricantes de equipamentos originais (OEMs), a economia circular expandiu o uso da ACV além de apenas quantificar o impacto ambiental de produtos e processos, tornando-a mais poderosa para a sustentabilidade corporativa. Este modelo pode ser ainda mais desenvolvido para avançar na busca de soluções duradouras [123].

No entanto, apesar dos desafios e limitações existentes, o desenvolvimento e uso de métricas de circularidade são essenciais para avaliar o desempenho e o progresso em direção à economia circular. Essas métricas fornecem uma base objetiva para medir e comparar o impacto das estratégias e práticas adotadas pelas empresas e setores. Para garantir a eficácia das métricas de circularidade, é necessário considerar a sua aplicação em diferentes níveis do sistema. A categorização em níveis nano, micro, meso e macro ajuda a adaptar as métricas aos diferentes atores envolvidos na cadeia de valor, desde produtos individuais até governos. Isso permite uma abordagem mais abrangente e adequada às necessidades e realidades específicas de cada contexto [120].

No contexto da indústria automotiva, Kanellou et al. [120] propõem indicadores relevantes que visam melhorar a eficiência energética, a reciclagem de materiais e a reutilização de componentes. Esses indicadores, como o tempo de desmontagem de baterias em minutos por carro, a aceitabilidade de componentes remanufaturados e a recuperação de materiais de reciclagem de baterias, são cruciais para aumentar a circularidade dos materiais e reduzir o impacto ambiental dessa indústria.

Um aspecto importante da adoção de modelos de economia circular é a necessidade de considerar o cenário econômico, político e tecnológico em constante mudança e em constante mudança. Em particular, os rápidos avanços tecnológicos podem criar novas necessidades entre os produtores da cadeia de valor, que devem estar alinhadas tanto com as resoluções de inovação do setor quanto com a necessidade de mudança da prática atual para incluir a sustentabilidade para manter a liderança no mercado. Em suma, é importante que as empresas estejam preparadas para se adaptarem aos desenvolvimentos tecnológicos e às necessidades do mercado para uma transição bem-sucedida para uma economia circular [120].

Para avaliar como as estratégias de economia circular (EC) apoiam o progresso em direção à sustentabilidade, o conceito de circularidade é frequentemente usado e quantificado por meio do desenvolvimento e uso de métricas de circularidade (*C-metrics*). As *C-metrics* visam simplificar a tomada de decisão, ao condensar a complexidade do que queremos medir e devem ser fáceis de usar, transparentes e acessíveis aos profissionais de EC [118]. Estas métricas são frequentemente categorizadas com base no nível do sistema em que podem ser usadas: nano (produtos), micro (empresas), meso (simbiose industrial) e macro (governos) [124].

Brändström e Saidani [125] concluem que as *C-metrics* podem ser orientações valiosas para os praticantes da economia circular se forem utilizadas corretamente. Ao desenvolver métricas de circularidade para situações específicas e garantir sua conformidade, elas podem servir tanto a um propósito pedagógico para os praticantes da economia circular quanto orientá-los para um aumento no desempenho ambiental. Também definem que as métricas podem oferecer uma abordagem alternativa ou complementar para comparar o impacto em uma categoria específica, simplificando a avaliação das estratégias de economia circular.

Iacovidou et al. [126] realizou uma revisão crítica da série existente de métricas ambientais, económicas, sociais e técnicas que têm sido regularmente observadas e utilizadas em estudos de avaliação de sistemas de gestão de resíduos e recuperação de recursos, a montante e a jusante do ponto onde os resíduos são gerados. Algumas das principais métricas estabelecidas podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Principais indicadores circulares. Adaptado de Iacovidou et al. [126]

Métrica	Descrição	Unidade	Categoria
Eficiência energética	Estimada convertendo energia de uma forma em outra, usando a relação entre a soma da energia útil de saída de um processo e a soma da energia de entrada para um processo ou sistema de conversão de energia especificado.	% (em kWh)	Eficiência
Eficiência de conservação de recursos	Medida com base na economia de energia de diferentes opções de gerenciamento de resíduos por entrada de material em cada opção, dividida pela economia de energia alcançada pela melhor prática de gestão.	% (em MJ/t)	Eficiência
Fração de material reciclado	Soma do material reciclado dividido pela entrada de matéria-prima para um MCP específico.	% peso	Eficiência
Custo de matérias-primas e intermediários	Soma dos custos de entrada de material por unidade de saída (MCP).	% (£ sobre £) ou £/t	Económicos
Vendas líquidas	Soma das vendas registadas menos os descontos de vendas, devoluções e abatimentos por unidade de saída (MCP).	£/t	Económicos
Custo operacional e de manutenção	Soma dos custos, incluindo: depreciação de instalações, com base na vida útil esperada (usando dados de fabricação); reparos regulares e extraordinários e custos de inspeção - podem ser calculados como percentagem do custo do equipamento;	£	Económicos
Função social e equidade	Distribuição equitativa dos benefícios e impactos do sistema dentro de uma comunidade e função social fornecida pelo sistema (incluindo uma variedade de aspetos sociais, como tempo necessário, conveniência, prestígio, género, grupos vulneráveis).	Não especificado (potencialmente semi-quantificado ou qualitativo)	Social
Reutilizabilidade	Quantidade de MCPs que mantêm sua funcionalidade e atributos físicos após o fim de sua vida útil primária, com base no peso ou no número de itens.	t (ou item) /t (ou item) de entrada no sistema	Técnicos
Remanufaturabilidade	Potencial de restaurar um componente/produto em condições semelhantes a novas por meio de medição, desmontagem, limpeza, inspeção e classificação, reparo/reforma/substituição de peças, montagem e teste final, com base no peso ou no número de itens.	% peso ou item	Técnicos
Reciclabilidade em massa	Quantidade de MCPs recolhidos e/ou classificados para reciclagem, com base no peso.	t/t de entrada no sistema	Técnicos

Reciclabilidade técnica	Proporção do material ou componente feito de apenas um material recolhido para reciclagem que será reciclado para produzir MCPs reciclados de alta qualidade.	% peso	Técnicos
Recuperabilidade em massa	Quantidade de MCPs e/ou proporção do material no componente/produto que é capturado após a fase de Fim de Vida.	t ou % peso	Técnicos
Recuperabilidade de energia	Energia incorporada nos materiais, componentes (feitos de apenas um material) e partes do componente e do produto recuperadas pelas fábricas na forma de eletricidade e calor.	kWh/t de entrada	Técnicos

O entendimento do contexto da Economia Circular é vital para criar uma estratégia holística para implementar indicadores de circularidade com sucesso. No entanto, pesquisas mostram que muitas vezes eles abrangem grandes quantidades de informações, resultando em avaliações superficiais de circularidade por meio de indicadores pouco abrangentes [124].

Para Corona et al. [127] os principais desafios das métricas de circularidade atuais estão relacionados a dificuldades em medir os objetivos da economia circular em todas as dimensões da sustentabilidade, avaliar a escassez de materiais utilizados e sub-representar as complexidades de múltiplos ciclos e as consequências da reciclagem degradante de materiais. Também constata que a maioria das métricas ainda está longe de conseguir representar os benefícios de diferentes opções de valorização de resíduos.

Uma métrica de circularidade eficaz deve ser abrangente e evitar transferir os ônus do consumo reduzido de materiais para impactos ambientais, económicos ou sociais aumentados. Ela deve considerar como os benefícios da reciclagem são distribuídos entre os recicladores e os usuários de materiais reciclados, além de medir o aumento de valor por meio de uma maior utilidade do produto e medidas de valor económico agregado [127].

3. CASO DE ESTUDO

Este capítulo tem como propósito apresentar os procedimentos metodológicos que foram adotados para dar resposta à questão de pesquisa e alcançar os objetivos deste trabalho, além de caracterizar o motor elétrico e seus processos. Para isso, o tópico encontra-se dividido da seguinte forma: caracterização da pesquisa, descrição da instituição alvo da investigação, bem como os instrumentos utilizados para recolher e analisar os dados.

3.1. Caracterização da Pesquisa

Esta investigação aborda a contribuição da economia circular para a sustentabilidade da cadeia de abastecimentos e de produção de motores elétricos. O objetivo geral é desenvolver um *framework* alinhado às metodologias de economia circular para o processo de produção de motores elétricos. Os objetivos específicos orientam a pesquisa.

O estudo foi conduzido em uma renomada empresa multinacional especializada em motores elétricos, automação e energia. O foco da pesquisa recai especificamente sobre motores elétricos e contou com a colaboração do departamento de engenharia industrial.

Devido à sua imersão direta no problema, este estudo é classificado como um caso de estudo, pois examina um fenómeno num contexto específico [128]. Focando num grupo restrito, uma empresa de manufatura e soluções no ramo dos motores e quadros elétricos, qualifica-se como pesquisa de campo, que investiga relações que exigem observação minuciosa [129]. A natureza descritiva da pesquisa [128] visa a descrição de factos e fenómenos, sendo também qualitativa, já que procura compreender a atuação de um grupo ou organização. Este enfoque permite flexibilidade na introdução de novas questões durante e após a pesquisa, analisando e interpretando o mundo a partir de representações.

Neste sentido, a pesquisa se baseou nas etapas elaboradas por Cortez e Cruz [130], para o desenvolvimento de um *framework*, conforme Figura 9.

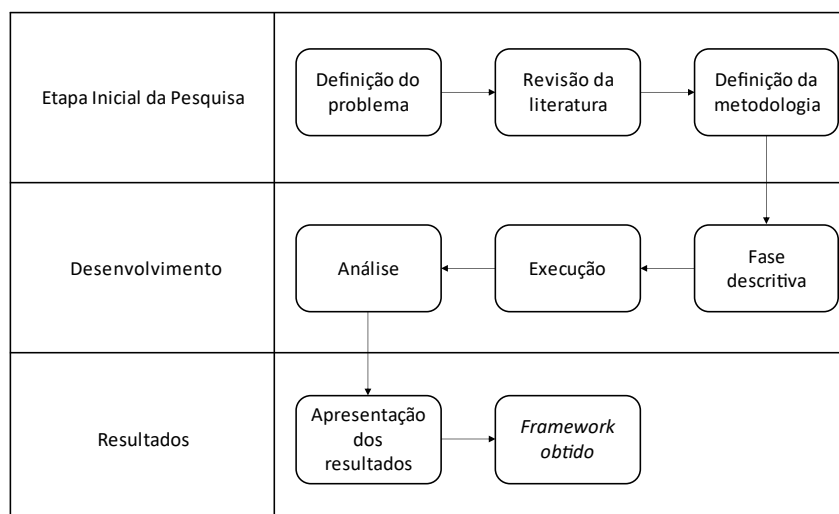


Figura 9 - Desenvolvimento da pesquisa. Adaptado de Cortez e Cruz [130].

3.2. Motores Elétricos

Em 2019, o fornecimento de eletricidade em Portugal estava dividido entre energias renováveis (53%), principalmente eólica e hidrelétrica, e combustíveis fósseis (47%), principalmente gás natural e carvão. A descarbonização da geração de eletricidade é principalmente apoiada por meio de leilões anuais para energia solar fotovoltaica e tarifas de alimentação para geração de eletricidade renovável. Também há suporte para a eletrificação da procura, especialmente para veículos elétricos [131].

O consumo anual de eletricidade em Portugal atingiu seu pico em 2010, atingindo 50,6 TWh, diminuindo até 2014 e, desde então, vem aumentando, chegando a 48,8 TWh em 2019. Esse aumento recente foi impulsionado principalmente pelo crescimento na procura de eletricidade nos setores residencial e industrial, juntamente com o aumento das exportações de 2016 a 2018 [131].

Michael Faraday introduziu ao mundo, em 1831, a possibilidade concreta de converter energia elétrica em energia mecânica. Esse empenho pioneiro, fundamentado na exploração da força eletromagnética derivada do movimento dos elétrons, culminou na concepção das primeiras máquinas elétricas. Estes dispositivos, verdadeiras inovações de sua época, desencadearam uma transformação radical na indústria global [132].

As máquinas elétricas se destacam como um dos mais notáveis avanços da humanidade no campo do desenvolvimento tecnológico, devido à sua habilidade ímpar de converter energia elétrica em energia mecânica. Os motores elétricos são renomados por sua eficiência superior, uma vez que uma parcela substancial da energia elétrica consumida é transformada diretamente em energia mecânica. Contudo, é importante ressaltar que, nesse processo, ocorre uma inevitável dissipação de energia na forma de calor e som, resultando em um certo grau de perda energética [132].

Os dois principais componentes de um motor elétrico são o estator e o rotor. O estator, a porção estacionária e vital do motor, compreende três elementos essenciais: a carcaça, o núcleo de lâminas e os enrolamentos. A carcaça, fabricada com materiais robustos como ferro fundido, aço ou alumínio, é estruturada para garantir resistência à corrosão por meio de aletas e serve como a base sólida para sustentar tanto as partes fixas quanto os móveis do motor. O núcleo magnético, por sua vez, é construído com múltiplas lâminas finas de material magnético. Essas lâminas, compostas por chapas de aço magnético, estão firmemente fixadas ao estator. Sua função principal é potencializar o fluxo magnético do campo gerado pelas bobinas, resultando na formação de eletroímã nos polos do motor [132].

O enrolamento deve ser composto por material condutor isolado, sendo predominantemente feito de cobre, e pode ser configurado como trifásico ou monofásico. Colocados sobre o núcleo, esses enrolamentos são posicionados nos intervalos da estrutura do estator. Eles são isolados uns dos outros por meio de um revestimento de verniz, com suas extremidades amarradas por um cordão isolante e posteriormente cobertas novamente com verniz para garantir a compactação do material [132].

Já o rotor é composto por três elementos essenciais. O primeiro deles é o eixo, desempenhando um papel central na transmissão da potência mecânica gerada pelo motor. Em seguida, temos o núcleo de lâminas, que consiste em placas magnéticas fixadas no eixo. O campo magnético originado pelo estator induz o movimento rotativo do rotor, gerando torque. É justamente esse

movimento de rotação do rotor que resulta na conversão da energia elétrica em energia mecânica, conferindo à máquina elétrica sua característica central [132].

3.2.1. Processo de Impregnação

O processo de impregnação tem como objetivo preencher os espaços vazios entre os fios dos estatores ou rotores com bobinados. Para atingir esse propósito, são empregados materiais impregnantes à base de poliéster, epóxi ou silicone, os quais geralmente se apresentam em estado líquido para facilitar a penetração entre os fios. Embora o impregnante possa ter uma certa viscosidade, é necessário adaptar o processo para garantir que ele flua de maneira eficaz pelos interstícios do bobinado, podendo envolver medidas como o aquecimento da peça [133].

A impregnação visa conferir ao estator um conjunto de características cruciais para o seu desempenho otimizado. Um dos principais objetivos é fortalecer a resistência mecânica das bobinas, proporcionando maior durabilidade e confiabilidade operacional. Além disso, a impregnação desempenha um papel significativo na melhoria da eficiência de troca térmica. Isso é alcançado ao favorecer a condução eficaz do calor gerado no centro das bobinas para a estrutura circundante, que compreende o pacote ou carcaça do motor. Essa otimização térmica contribui para um funcionamento mais eficiente e estável do estator [133].

Outro aspecto importante da impregnação é a proteção do estator contra as intempéries e ambientes hostis. Ao aumentar a resistência do estator à umidade, poeira, microrganismos e outros elementos adversos, a impregnação desempenha um papel crucial na garantia da durabilidade e vida útil prolongada do motor elétrico. Além disso, a impregnação também desempenha um papel significativo no reforço do isolamento elétrico entre diferentes bobinas e entre as bobinas e a carcaça do estator. Isso é essencial para a prevenção de curto-circuito e outros problemas elétricos que podem comprometer o funcionamento adequado do motor [133].

O processo de impregnação é composto por três etapas essenciais: pré-aquecimento, impregnação propriamente dita e a fase de cura. A etapa de cura, em particular, é crucial para a obtenção das características desejadas mencionadas anteriormente. Quanto aos métodos empregados para realizar a impregnação, há uma variedade de abordagens possíveis. No contexto do presente estudo, foi escolhida a técnica de Impregnação por Fluxo Contínuo, ou gotejamento, que oferece uma abordagem específica para a impregnação do estator, contribuindo para alcançar os objetivos de desempenho e durabilidade esperados [133].

Neste processo, a peça em questão passa por uma etapa de pré-aquecimento, criada para aprimorar a permeabilidade do impregnante pelos fios do bobinado. Em seguida, ela é fixada em um dispositivo que a posiciona a um ângulo de inclinação de 15°, durante esse posicionamento, entra em rotação. Uma vez que a resina atravessa integralmente as ranhuras, a peça é então retornada à posição horizontal, permitindo assim a impregnação simultânea das duas cabeças da bobina. Após a fase de impregnação, a resina passa por um processo de gelificação e cura, que é realizado por meio do aquecimento da peça em uma estufa [133].

Após a impregnação, ocorre a raspagem meticulosa dos excessos de resina tanto no diâmetro interno quanto externo do estator. Além disso, uma etapa crucial envolve a limpeza minuciosa do

estator e dos tabuleiros de resina por meio de ar comprimido, visando eliminar qualquer resina acumulada nos tabuleiros e transferi-la para um local apropriado.

A gestão dos resíduos de resina sólida apresenta um desafio substancial, devido à quantidade significativa gerada e aos custos envolvidos em seu descarte apropriado. Estes resíduos têm sua origem, em grande parte, no excesso de resina que goteja nos tabuleiros durante o processo de impregnação. O excedente de resina ocorre principalmente durante a aplicação subsequente de resina, realizada como uma medida de reforço à impregnação anterior.

3.3. A Cadeia de Abastecimento do Motor Elétrico

À medida que a economia global continua a evoluir, a habilidade de compreender e adaptar-se a essas mudanças torna-se um requisito crucial para o planejamento, gerenciamento e controle dos fluxos de materiais, com o objetivo de aprimorar as práticas industriais. Muitos dos desafios contemporâneos relacionados às cadeias de abastecimento destacam a importância do mapeamento dessas cadeias [134], [135].

De acordo com Batista et al. [136] a gestão de cadeia de abastecimento circular é definida como a coordenação das cadeias de abastecimento diretas e reversas, integrando ecossistemas de negócios com o objetivo de criar valor a partir de produtos, subprodutos e fluxos de resíduos ao longo de ciclos de vida prolongados. Essa abordagem visa aprimorar a sustentabilidade econômica, social e ambiental das organizações. Portanto, o mapeamento da cadeia de abastecimento é crucial para analisar e otimizar os fluxos envolvidos, com a finalidade de aumentar a incorporação de práticas circulares, desacelerando o processo.

Um mapa da cadeia de abastecimento é uma representação diagramática que oferece uma visão simplificada da cadeia, destacando informações-chave. Ele deve apresentar informações de forma clara e precisa, facilitando a compreensão e contribuindo para a visibilidade, análise e integração da cadeia de abastecimento [137].

Ghadge et al. [138] destacam que a abordagem crescente em relação à sustentabilidade na cadeia de abastecimento requer a recolha, monitoramento e acompanhamento de diversos tipos de dados, incluindo emissões de CO₂, processos de reciclagem de produtos e até mesmo questões de direitos trabalhistas para combater a escravidão moderna.

Os motores elétricos são parte de um setor com um impacto econômico significativo e um grau bastante elevado de globalização, além disso, os podem ser produzidos em diferentes tamanhos e direcionados para mercados distintos, mas o elemento a montante da Cadeia de Abastecimento (os fornecedores e o processo de produção) permanece mais ou menos o mesmo para todos os intervenientes [134]. Por esta razão, o estudo pode avaliar as práticas já existentes e as possíveis melhorias de gestão da cadeia de abastecimento global de empresas deste seguimento, seguindo uma ótica interna, permitindo assim discriminar os efeitos específicos da indústria de motores e efeitos globais que tangem a economia circular.

Golini et al. [134] identificam quatro etapas principais de uma cadeia de abastecimento, sendo elas:

1. Produção de materiais e componentes (aço, fios e barras de cobre, componentes elétricos, alumínio, peças de reposição, materiais isolantes, eixos, rolamentos);
2. Fabricação e montagem do motor elétrico;
3. Integração e instalação do sistema;
4. Utilizadores industriais, que podem ser divididos em dois grupos. Motores para aplicações de processo ou motores para aplicações de produtos.

O foco do estudo é referente a produção de materiais e componentes, principalmente a cadeia de cobre, material essencial para o desenvolvimento de uma economia circular, já que possui alta capacidade de reciclagem, e houve foco no setor da assistência técnica, com a reparação de motores através de serviços prestados a clientes.

Estratégias comuns da economia circular para motores elétricos incluem reutilização, recondiçãoamento, remanufatura e reciclagem. A reutilização, que é uma estratégia de extensão da vida do produto na economia circular, envolve o processo de usar um componente novamente após limpeza e teste, sem necessidade de processamento adicional significativo. A remanufatura é uma estratégia circular de extensão da vida do produto que visa manter o produto ou componente com sua máxima utilidade e valor. Isso envolve a desmontagem completa de um produto e a recuperação em nível de componente. O recondiçãoamento é também uma estratégia circular de extensão da vida do produto e compartilha algumas semelhanças com a remanufatura. Produtos recondiçãoados são retornados às condições de uso com garantia mais curta do que um produto recém-manufaturado, enquanto produtos remanufaturados são restaurados para uma vida útil com garantia e qualidade comparáveis a um produto recém-manufaturado [139].

No contexto da pesquisa atual, foram selecionados dois setores e processos dentro da empresa para análise e sugestões de implementação de conceitos de economia circular em suas cadeias de suprimentos e processos. O primeiro processo, relacionado à assistência técnica, visa o diagnóstico e a reparação de motores elétricos de clientes, alinhando-se com os princípios da economia circular.

Dentro da composição dos motores elétricos, há uma alta proporção de matérias-primas e componentes eletrônicos, o que muitas vezes leva as empresas a depender de fornecedores estrangeiros ou intermediários locais.

Quanto ao lado da distribuição, a Cadeia de Valor Global revela a existência de dois tipos de mercados finais: aplicações industriais de processo e produtos. Os integradores de sistemas atuam como intermediários entre os fabricantes de motores elétricos e o mercado final. Todos esses clientes requerem produtos personalizados e alguma proximidade entre os fabricantes e os usuários. As unidades de vendas desempenham um papel intermediário, tornando a compra mais "local". A dimensão da empresa também influencia, com as grandes empresas tendo uma presença global.

3.3.1. Processo de bobinagem de um estator

O processo de fabrico de estatores bobinados engloba desde o momento em que os estatores são isolados até à etapa final do processo, na qual ocorre a impregnação do estator bobinado com uma

mistura de resina e iniciador. A Figura 10 apresenta de forma esquemática todo este processo de bobinagem, oferecendo uma visão detalhada das etapas envolvidas, bem como das entradas e saídas dos materiais utilizados.

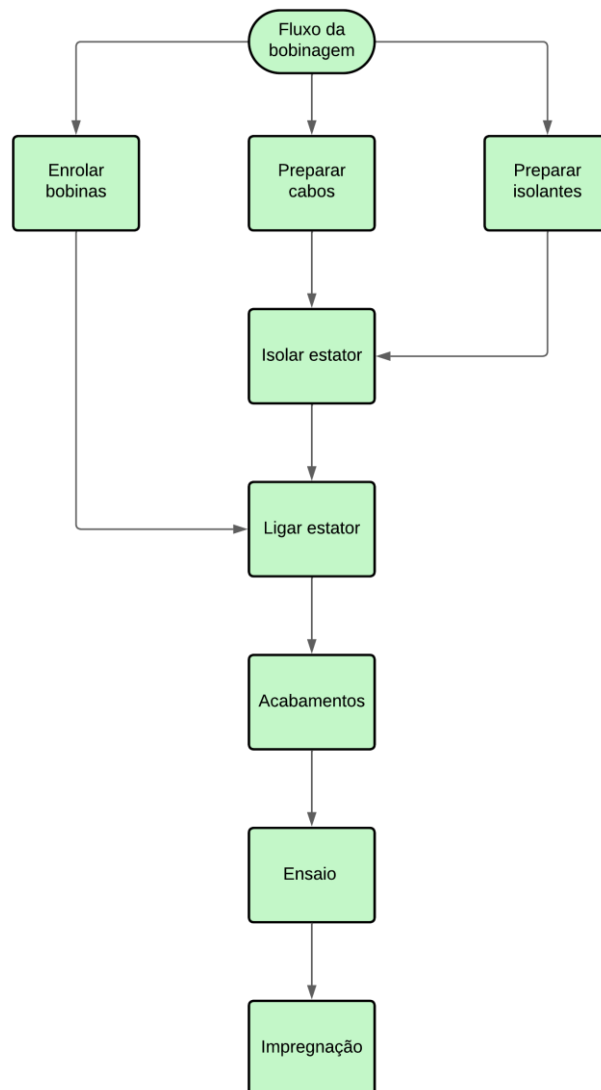


Figura 10 - Processo de produção de estatores bobinados. Autoria própria.

Iniciando o processo, os estatores são cuidadosamente isolados para garantir um isolamento elétrico adequado. Em seguida, a etapa de bobinagem começa, na qual os condutores são habilmente posicionados e enrolados nos estatores de acordo com especificações precisas. Essa etapa é crucial para garantir o desempenho e a eficiência do motor final, pois a disposição correta dos condutores influencia diretamente o campo magnético gerado.

Após a conclusão da bobinagem, chega a etapa de impregnação, realizada através do método de gotejamento. Nesta fase, o estator bobinado é exposto à uma mistura cuidadosamente preparada de resina e iniciador. Essa mistura é aplicada gota a gota, preenchendo todos os espaços vazios, revestindo os condutores e blindando-os contra fatores externos, como umidade e pó.

Adicionalmente, a impregnação contribui significativamente para o aumento da rigidez estrutural do estator, amplificando a sua durabilidade e confiabilidade a longo prazo.

Após a etapa de impregnação através do método de gotejamento, é importante considerar a gestão dos resíduos resultantes desse processo. A aplicação da resina e do iniciador pode gerar subprodutos, como resíduos líquidos e materiais descartados durante o processo. A resina utilizada frequentemente contém substâncias químicas que, se não forem geridas corretamente, podem afetar negativamente os ecossistemas circundantes e recursos hídricos.

Dessa forma, o processo de fabrico de estatores bobinados é um conjunto complexo e interdependente de etapas que visa produzir componentes fundamentais para a eficiência e o funcionamento confiável de motores elétricos. Entretanto, durante o processo de bobinagem, emergem resíduos excedentários que merecem consideração atenta no contexto da economia circular. O descarte de fios de cobre e isolantes excedentes na etapa de preparação de cabos e isolantes, assim como o excesso de pontas de prata e fios durante a fase de ligação, se destacam como desafios. Além disso, a geração de resíduos de resina, solventes contaminados e panos sujos, juntamente com o descarte inadequado de latas contaminadas, agravam a problemática. Adicionalmente, as emissões atmosféricas resultantes do processo de impregnação também entram no cenário de resíduos.

Uma subdivisão adicional dos resíduos de resina é crucial. Existem dois grupos distintos: os que passam por um processo térmico, solidificando e sendo armazenados em caixotes de madeira; e os que permanecem líquidos, sem esse processo, sendo armazenados em bidões de 200 litros. Ambos são considerados resíduos perigosos, conforme definido pelas normas da Lista Europeia de Resíduos (LER), e sua disposição final envolve a destruição por meio de processos físico-químicos. É necessário realçar a cadeia de abastecimento da resina utilizada no processo de impregnação, sendo que a Figura 12 esclarece o fluxo de aquisição do material desde a sua aquisição até à sua utilização. Este procedimento possui fundamentalmente dois fornecedores, um situado na América do Sul e o outro em Itália.

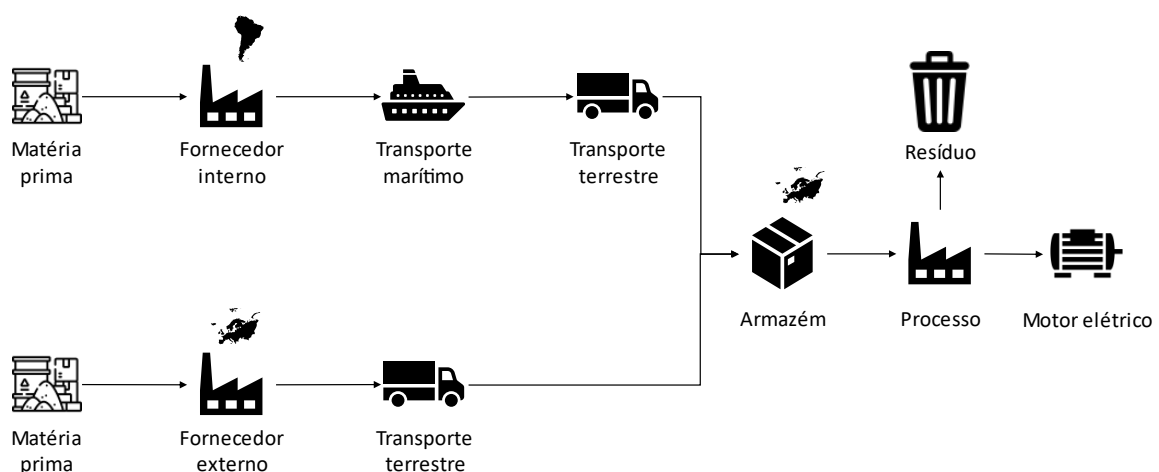


Figura 11 - Fluxo logístico da resina de impregnação. Autoria própria.

Visto que ambos os fornecedores garantem a qualidade dos seus produtos, a escolha é determinada através de uma avaliação da rentabilidade. Se a opção recair sobre o fornecedor do Brasil, torna-se necessário um envio marítimo até ao porto selecionado, seguido de um transporte terrestre até à unidade. Por sua vez, o fornecedor italiano envia a resina através de transporte terrestre até à unidade. A cadeia de abastecimento da resina utilizada no processo de impregnação pode ser observada na Figura 11.

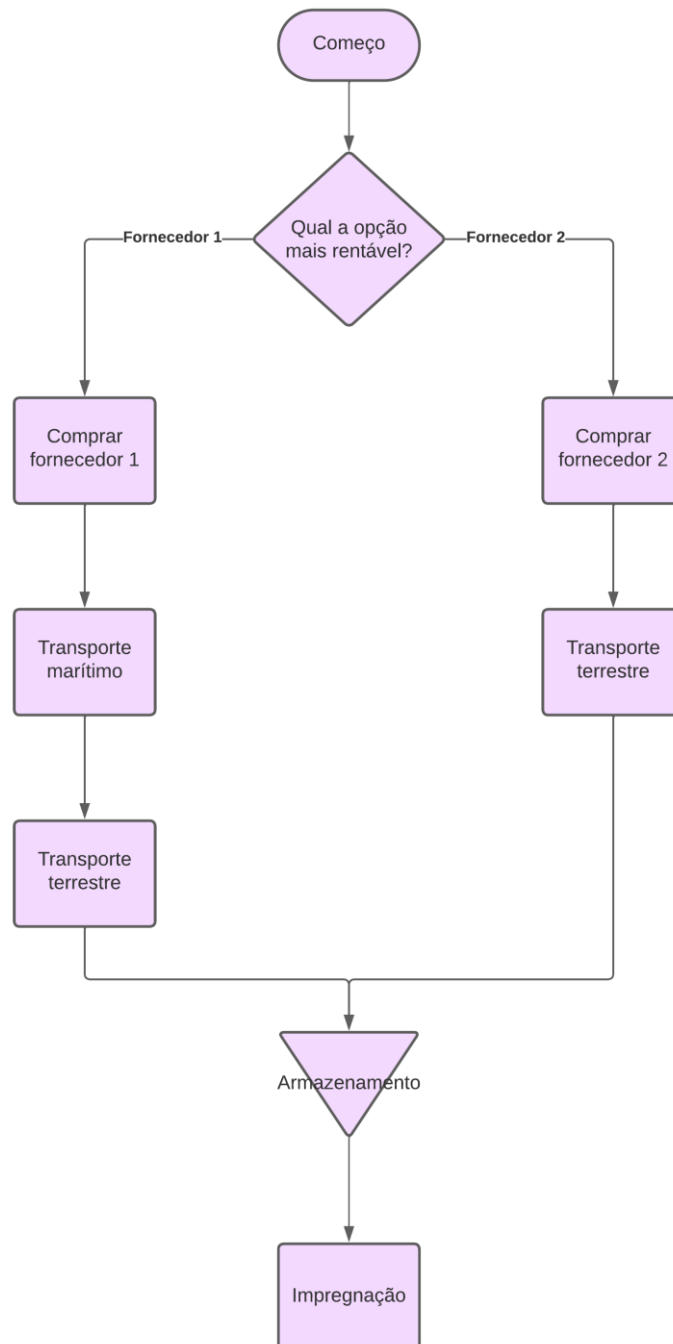


Figura 12 - Fluxograma do processo de compra e utilização da resina de impregnação. Autoria própria.

No contexto dos resíduos gerados durante o processo de impregnação, é fundamental enquadrar a resina em relação à sua classificação dentro das diretrizes definidas pela Agência Portuguesa do Ambiente [140]. De acordo com essa classificação, a resina pode ser categorizada como não perigosa sob as definições HP1 (não explosiva), HP2 (não comburente) e HP3 (não inflamável), conforme comprovado por testes conduzidos anteriormente pela empresa. Essa categorização alinha-se à definição estabelecida pelo regulamento n.º 1357/2014, segundo a qual a resina:

- não demonstra suscetibilidade em produzir gases em temperaturas, pressões ou velocidades que poderiam causar danos nas suas proximidades;
- não é capaz de provocar ou contribuir para a combustão de outras substâncias, principalmente mediante o fornecimento de oxigênio;
- não tem a capacidade de inflamar ou gerar emissões de substâncias inflamáveis.

A Lista Europeia de Resíduos (LER) refere-se a uma lista padronizada de resíduos que considera tanto a origem quanto a composição desses resíduos. O código LER, por sua vez, constitui um sistema de identificação de resíduos sólidos utilizado com o objetivo de facilitar a gestão e tratamento apropriado dos mesmos, além de permitir sua identificação em qualquer ponto da Europa [140]. Quanto à resina sólida produzida, ela é atribuída ao código 08 04 09 (*). A decomposição deste código revela que o grupo 08 corresponde a resíduos provenientes de fabricação, formulação, distribuição e utilização de revestimentos, como tintas, vernizes e esmaltes vítreos, bem como colas, vedantes e tintas de impregnação. O grupo 04 engloba resíduos resultantes do uso de colas, vedantes e até produtos impermeabilizantes, enquanto o grupo 09 trata de resíduos de colas ou vedantes que contenham solventes orgânicos ou outras substâncias perigosas. Vale notar que o asterisco indica que esse resíduo é considerado perigoso quando comparado com um resíduo espelho [141].

3.3.2. Processo de reparação de um motor elétrico

De forma geral, os principais passos nas operações de reparo de um motor elétrico são: recolha dos produtos devolvidos, inspeção e seleção inicial, diagnósticos elétricos e mecânicos, desmontagem, acondicionamento e reparo, testes e montagem e pintura final.

Os processos chaves, podem ser descritos como:

Inspeção primária: Uma inspeção é realizada com base na condição física do produto, incluindo a realização de testes iniciais, como, testes de medição de resistência e isolamento do invólucro, para determinar se o produto possui uma falha elétrica, uma falha mecânica ou ambas [139];

Desmontagem: A sequência de desmontagem de um produto devolvido nem sempre é uma inversão exata de sua sequência de montagem, devido à variação no grau de degradação ou danos aos componentes durante o uso, componentes ausentes e atualizações do produto durante manutenções ou tarefas de reparo anteriores. Alguns componentes de um motor elétrico, como o rotor, muitas vezes podem ser reutilizados sem a necessidade de desmontagem completa, enquanto outros componentes, como rolamentos ou enrolamentos, requerem um

recondicionamento adequado e desmontagem para que possam ser utilizados em um produto remanufaturado [142];

Inspeção da bobinagem: Durante a desmontagem, quando o estator é separado do rotor, os enrolamentos podem ser inspecionados visualmente quanto a danos, como marcas de queimaduras. Qualquer dano na cavidade do núcleo do estator causado pelo contato do rotor também pode ser detetado. Os enrolamentos são testados eletricamente usando diversos métodos de teste padrão para detetar problemas no condutor, nas terminações ou, mais provavelmente, no isolamento elétrico. Se uma falha nos enrolamentos for detetada, geralmente é realizada uma rebobinagem. Para remover os enrolamentos, o verniz e o isolamento precisam ser degradados em um forno controlado a uma temperatura elevada [139];

Inspeção, diagnóstico de falhas e testes finais: Uma inspeção dos componentes é realizada para investigar a condição atual de um componente e detetar quaisquer falhas. Geralmente, os componentes podem ser categorizados da seguinte forma [139]: (a) podem ser reutilizados diretamente, (b) podem ser reutilizados após reparo ou recondicionamento e (c) não podem ser reparados ou recondicionados. Componentes que podem ser reutilizados após reparo ou recondicionamento são encaminhados para limpeza, diagnóstico de falhas e prognóstico, enquanto os componentes que não podem ser reparados ou remanufaturados são enviados para descarte. A estratégia de recondicionamento depende do estado atual do produto ou componente e do modo de falha. Uma peça danificada ou desgastada pode ser reparada ou substituída, dependendo da gravidade do dano. O estator e o rotor são montados antes dos testes finais na linha de produção, após os quais o produto é finalmente montado [143].

Após desmontagem de acordo com o plano de desmontagem do motor, primeiramente, é necessário realizar a limpeza das partes mecânicas do motor. Substituem-se as peças irreparáveis e, em seguida, procede-se à inspeção dimensional, marcação, registo, entre outros. Posteriormente, é necessário detetar fissuras em rolamentos e outras peças, para substituí-los.

Os danos às peças mecânicas são divididos em três estágios: início de fissura, propagação da fissura e fratura instantânea. O início de fissura ocorre sempre nas partes com maior tensão e menor resistência. O envelhecimento por vibração pode reduzir a elevada tensão residual, tornar a distribuição uniforme e retardar o início das fissuras. No estágio de propagação da fissura, o envelhecimento por vibração também possui um certo efeito de retardo.

O fluxograma do processo de reparação de um motor elétrico pode ser observado na Figura 13.

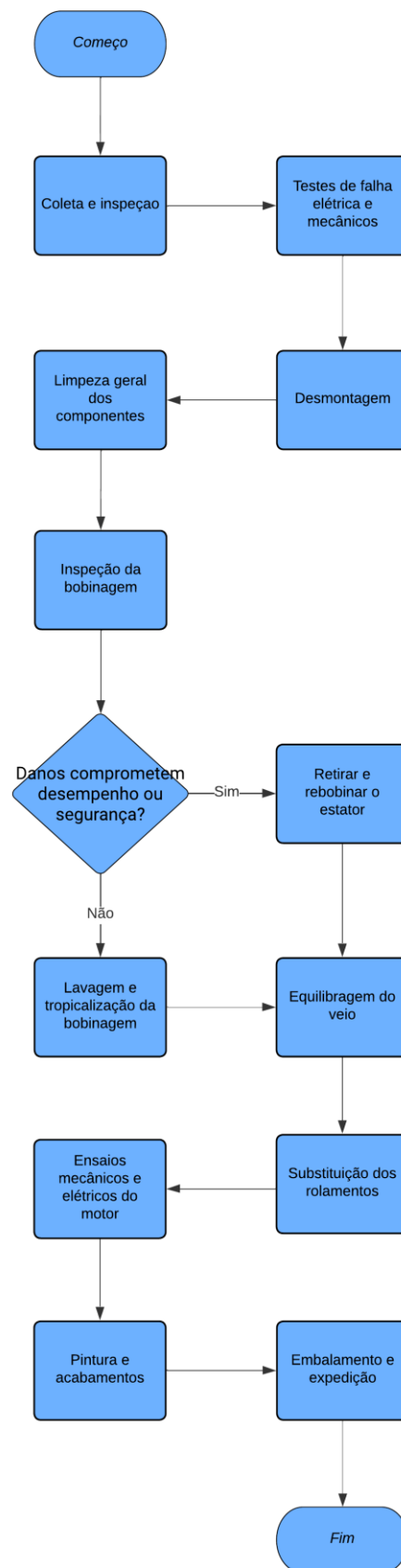


Figura 13 - Processo de reparação de um motor elétrico. Autoria própria.

O processo de remanufatura engloba não apenas os aspectos técnicos, mas também considera as partes envolvidas, incluindo os clientes originais e potenciais novos clientes, que podem ser captados através de revitalizações de motores para revenda posterior pela empresa. Além disso, a fase de recolha e transporte desempenha um papel fundamental em todo o fluxo operacional.

Nesse contexto, a remanufatura não é apenas uma atividade interna de restauração, mas também envolve um aspecto de engajamento com os diferentes públicos interessados. Isso abrange tanto os clientes que adquiriram inicialmente os produtos quanto os possíveis novos clientes que podem se beneficiar das ofertas de motores recuperados. Os serviços não solicitados, que englobam a reabilitação de motores para posterior revenda, ampliam o escopo da remanufatura para além das procuras diretas.

A etapa de recolha e transporte é um elo essencial nesse processo. Garantir a eficiência energética no deslocamento dos motores desempenha um papel crítico para a conclusão bem-sucedida de todo o ciclo de forma sustentável. Isso abrange desde a logística da recolha dos motores até a entrega para a remanufatura. O fluxo descrito pode ser observado na Figura 14.

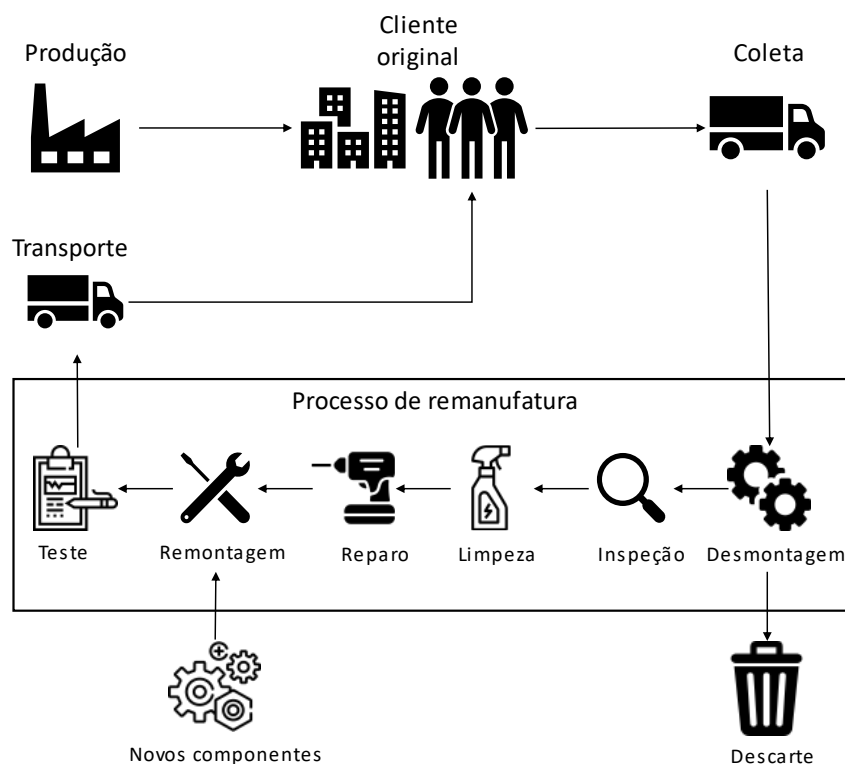


Figura 14 - Fluxo do processo de reparação de um motor. Autoria própria.

Se o descarte ou gerenciamento de resíduos não for adequado no processo de reciclagem, isso pode resultar não apenas no desperdício de materiais e energia, mas também pode poluir o ambiente, como no caso dos gases residuais gerados pela fusão do aço reciclado e das águas residuais geradas pela lavagem dos componentes internos do motor. A reciclagem correta e eficaz pode minimizar esse tipo de poluição e reduzir os custos de aquisição de matérias-primas e fabricação de produtos [144].

A assistência técnica, possui um grande impacto na circularidade de cadeias de abastecimento, através da remanufatura, que é considerada um processo de retenção de valor posicionado no topo da hierarquia de resíduos, implicando a preservação da funcionalidade do produto, a extensão da sua vida útil e perdas de materiais mínimas [145]. Nos últimos anos, o setor de manufatura passou por transformações que reestruturaram ainda mais as suas áreas e exerceram influência no desenvolvimento da prática de remanufatura. Este processo engloba um entendimento crescente da escassez de recursos, dos riscos inerentes às cadeias de valor globais e da criação de novos modelos de negócio, tais como o produto como serviço e a economia circular.

Em relação às tendências para a assistência técnica, presentes na literatura, se encontram:

- Fabricação aditiva: a durabilidade do equipamento depende da disponibilidade de peças de reposição. A solução mais sustentável é uma combinação de peças remanufaturadas com outras produzidas usando a tecnologia de impressão 3D baseada em bibliotecas digitais, desde que seja uma alternativa mais vantajosa do ponto de vista ambiental e económico [146]. Alguns estudos promissores na área, indicam que os principais componentes, como o rotor e o estator, podem ser impressos com uma impressora de modelagem de deposição fundida, utilizando termoplásticos [147];
- Novos modelos de negócio e logística reversa: os sistemas de serviço de produto (PSS) oferecem proposições de valor, que fazem parte de um modelo de negócios, através dos quais os fabricantes vendem produtos integrados com serviços, em oposição aos produtos isolados. A transição de empresas tradicionais baseadas em produtos para uma orientação de serviços é complexa e contextual, necessitando uma reconsideração na gestão das cadeias de suprimento e procura. Muitos pesquisadores consideram os PSS como modelos de negócios sustentáveis promissores, pois têm o potencial de reduzir a produção e o consumo total ao longo de todo o ciclo de vida do produto [148];
- Eletromobilidade: na maioria dos cenários, realizar reparos em motores elétricos frequentemente exige o deslocamento do equipamento até uma oficina especializada, gerando uma emissão significativa de carbono devido ao transporte envolvido. Embora ainda subsistam incertezas quanto aos ganhos efetivos da eletrificação da frota de veículos, atribuíveis em parte às dificuldades na adoção de fontes de energia renovável para alimentar tais veículos, bem como aos impactos concretos da produção destes automóveis sobre a pegada de carbono, é factível antever um horizonte mais ecologicamente equilibrado por meio de uma mudança progressiva na composição da frota automotiva. Uma alternativa inovadora para abordar esta problemática residiria na reposição das baterias de veículos elétricos inativos, as quais poderiam ser empregues como sistemas de armazenamento energético e como provedoras de serviços complementares à infraestrutura elétrica [149]. Outra alternativa seria a utilização de combustíveis alternativos como o metanol, como um combustível de baixo teor de carbono ou como componente de mistura, portador de energia e matéria-prima química [150], e o hidrogénio, que quando aliado com uma produção através de energias renováveis e uma correta distribuição, apresenta baixas taxas de produção de CO₂ [151].

3.4. Transformação em Economia circular

Segundo Mejía-Moncayo et al. [152] um motor elétrico representa um produto amplamente utilizado e um candidato promissor para a remanufatura com múltiplas aplicações. No contexto de Modelos de Negócios, é possível vender o tempo de operação do motor como uma unidade genérica, na qual o cliente paga pelo uso do motor elétrico sob condições de desempenho estabelecidas por um contrato. A empresa mantém a propriedade dos motores, realiza a manutenção, recupera os motores usados, remanufatura, recicla ou os descarta no final de sua vida útil.

A Figura 15 apresenta uma visão esquemática proposta das correntes de materiais e informações para o sistema de fabricação e remanufatura sustentável.

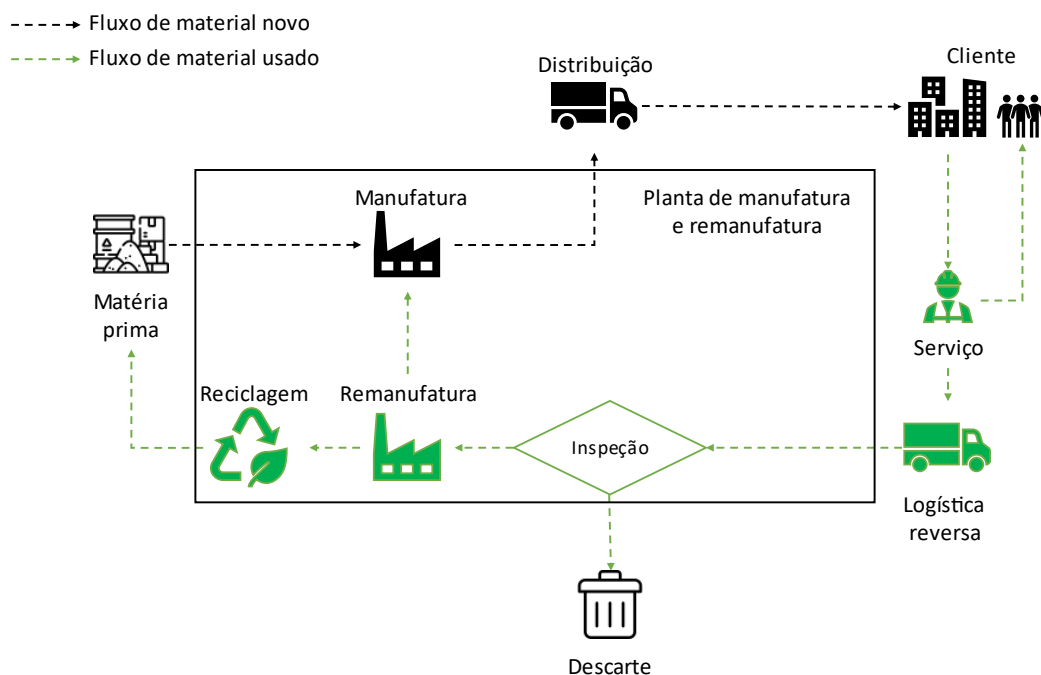


Figura 15 - Ilustração do fluxo sustentável de um processo de manufatura e remanufatura. Adaptado de Mejía-Moncayo et al. [152]

A pesquisa sobre as características de múltiplas vidas de produtos eletromecânicos descartados é a questão principal na avaliação da viabilidade de remanufatura de um produto, e é um pré-requisito importante para redução de riscos associados, garantindo a qualidade dos produtos e maximizando o valor do processo [144].

Segundo Li et al. [144], o ambiente operacional do motor exerce um impacto significativo em sua durabilidade. Assim, é comum que o utilizador do motor estabeleça o intervalo de atualização do equipamento de acordo com as características específicas do ambiente, geralmente situando-se entre 5 e 15 anos. No que concerne à componente isolante do motor, esta tipicamente envelhece ao alcançar o término de sua vida útil, dispensando, portanto, a necessidade de avaliação dessa duração. A análise da vida útil concentra-se primordialmente nas partes mecânicas do motor. Com

base em experiências acumuladas, exceto em casos de desgaste acentuado nas peças rotativas, a longevidade das outras parte mecânica costuma oscilar entre 3 a 5 vezes a da componente isolante.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise literária e do trabalho de campo realizados, conforme detalhado no capítulo 3. Adicionalmente, procederemos à apresentação do *framework* proposto para a aplicação dos conceitos de economia circular na cadeia de produção de um motor elétrico.

4.1. Oportunidade na manufatura e materiais

A primeira etapa do ciclo de vida de motor elétrico, onde os fabricantes têm maior controle direto sobre seus produtos, é a fase de materiais e fabricação. Decisões sobre a obtenção de materiais, design do produto, seleção de processos e gestão logística associada têm consequências importantes para o desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida do produto e para a sustentabilidade geral da cadeia de valor [153].

A fabricação de materiais engloba a mineração/extração, refino, transporte e processamento de substâncias em materiais com a qualidade desejada, necessários para a fabricação subsequente de produtos e peças. Um aspecto essencial da seleção de materiais numa perspectiva de economia circular é eliminar, substituir ou reduzir o uso de elementos escassos, não renováveis e tóxicos [52].

No quesito de materiais utilizados na produção dos motores elétricos, as rotas de reciclagem para ligas de alumínio e aço, assim como para o cobre, estão muito bem estabelecidas e devem desempenhar apenas um papel secundário nas considerações de reciclagem. Para maximizar a rentabilidade desses materiais, é recomendado aproveitar as correntes de reciclagem existentes e as suas vantagens associadas em termos de economias de escala [154].

Se por um lado as cadeias de abastecimentos de materiais como alumínio, aço e cobre já são muito bem definidas, com processos de recuperação, a cadeia para a resina utilizada no processo de impregnação da bobinagem ainda se baseia completamente na destruição dos resíduos através de processos físico-químicos, conforme norma LER da Associação Portuguesa do Ambiente. Em relação à resina líquida resultante, por não ter sofrido ação térmica, e ainda apresentar características próximas às originais, a não ser por alguns resíduos obtidos no processo, se torna provável a sua capacidade de reciclagem, mediante processos semelhantes aos utilizados em termoplásticos, por exemplo [155].

Já em relação ao ciclo de resíduos da resina sólida, suas utilizações para fins de retorno energético se tornam pouco prováveis, devido a sua ausência de atividade perante a aplicação de carga calorífica. Entretanto, por ser considerado um resíduo não perigoso, é possível que através de um processamento, possa ser utilizado por outros setores, como uma matéria de baixo custo de aquisição, reduzindo assim seu impacto ambiental [156]. Representando assim, um componente benéfico no espectro socio económico, reduzindo o despejo de matéria-prima, e validando-se da abordagem de ciclo fechado para reintegração em outro setor económico.

Do ponto de vista do projeto do produto, algumas estratégias para alcançar uma maior circularidade poderiam incluir a desmaterialização, através da manutenção da qualidade e funções oferecidas, porém com uma redução de materiais empregados; maior eficiência de material, em que uma parcela maior de matérias-primas é convertida em produtos acabados; seleção de

materiais, em que materiais alternativos com menor impacto são reutilizados ou reciclados de aplicações anteriores; e a reintegração de materiais reciclados durante as etapas do processo, através de retorno do cliente ou recuperação através dos serviços [153].

A realização de projetos mais longevos e duradouros também é uma estratégia de circularidade, projetar para uma longevidade ótima implica em estender a vida dos motores através do uso de materiais e peças mais duráveis, adaptáveis e confiáveis, que possam ser facilmente mantidos, remanufaturados ou reutilizados. Também neste seguimento, motores que podem ser desmontados com maior facilidade, simples, bem identificados e com menos partes consolidadas, resultariam em um maior percentual de partes recuperadas durante manutenções e serviços de beneficiações de motores.

Num nível de processo, estratégias de economia circular incluem substituição de processos, técnicas de fabricação com menor geração de resíduos; medidas de eficiência energética, como a substituição de lâmpadas incandescentes/sódio/lâmpadas de iodetos metálicos por LEDs que reduzem o consumo de eletricidade; redução do uso de água por meio de tratamento ou reciclagem no local; controlo de fluxos de materiais para minimizar efluentes e resíduos; evitar a desvio de resíduos para tratamento ou aterro através da utilização de subprodutos; controlo de inventário e práticas de manipulação de materiais, como a maximização da utilização de paletes e a promoção de materiais de embalagem renováveis ou recicláveis; e planeamento de layout de processos/instalações para minimizar a área ocupada e as perdas [153].

Os canais logísticos de distribuição que se originam tanto a montante como a jusante das suas instalações, são parte vital para o alcance da circularidade nas cadeias de abastecimento de um material. A montante, os materiais e componentes de entrada são entregues nas fábricas de montagem de veículos, no caso específico da resina, esta é oriunda através de canais marítimos e terrestre. Já jusante (pós-montagem), os motores estão prontos para o envio. A otimização destes processos pode ser feita através da implementação de estratégias orientadas para a distribuição, como melhorias na economia de combustível no transporte de carga, a utilização de veículos com combustíveis alternativos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a utilização mais eficiente de transportadoras e redes de transporte.

4.2. Oportunidade na manufatura e materiais

Durante a fase de utilização, que compreende todas as operações do motor para sua função designada, podem ser aplicadas algumas características de modelos circulares para aumentar a sustentabilidade dos processos.

A manutenção de um motor inclui limpeza, manutenção propriamente dita, troca de rolamentos e lubrificantes, reparação e remanufatura. Os encargos provenientes da manutenção são relativamente pequenos, com a substituição de alguns componentes que fazem a vida de um motor prolongar. Já a remanufatura pode evitar que peças usadas sejam descartadas em aterros, dando o destino correto para os componentes, além de garantir que os novos componentes utilizados na reparação, possuam uma cadeia sustentável e que sigam princípios da economia circular, como a modularidade e simplicidade.

Atualmente, existem principalmente três métodos de remanufatura: reduzir a capacidade do motor elétrico por meio da remanufatura e colocá-lo em uso novamente; substituir o enrolamento do estator; e substituir o rotor de cobre. O motor elétrico pode alcançar altos níveis de eficiência após ser manufaturado aplicando qualquer um dos esquemas mencionados acima [157].

Na remanufatura de alto desempenho de motores elétricos, medidas correspondentes serão tomadas com base nos resultados dos testes dos diferentes componentes. No entanto, como regra geral, o rotor ou o estator serão substituídos, mediante a análise do reparador, e a base do motor, sua carcaça, será mantida. Os rolamentos, sensores e outros componentes periféricos, sempre passam por uma avaliação para verificar sua vida restante, porém por norma, são substituídos por novos componentes [157].

Na Figura 16 é possível observar o ciclo de reparação projetado com alguns conceitos da economia circular aplicados.

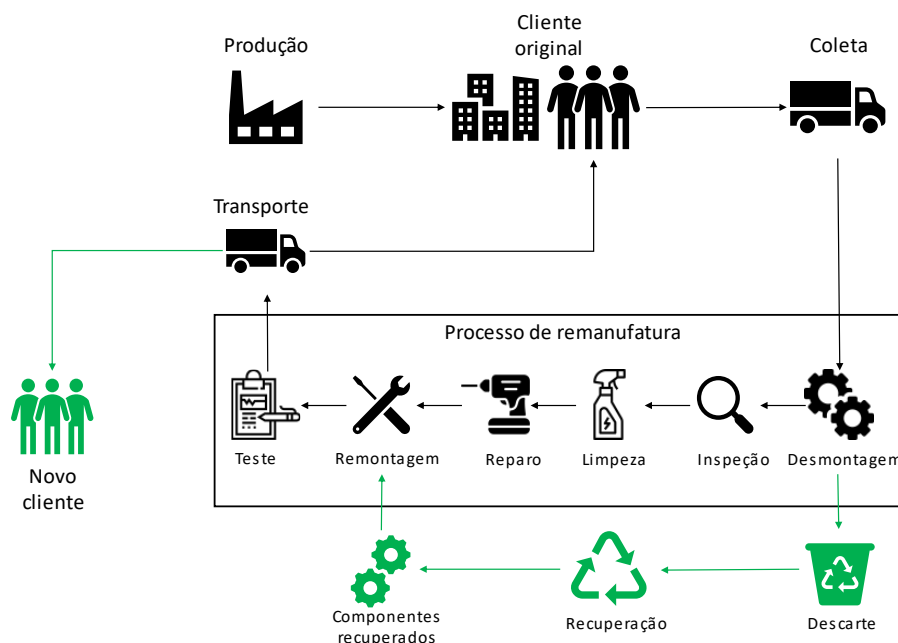


Figura 16 - Fluxo de reparação de um motor com conceitos de economia circular. Autoria própria.

4.3. Oportunidade na gestão de fim de vida

Os motores geralmente atingem a fase de final de vida, devido a deterioração ou danos graves decorrentes de sua utilização ou imprevistos ocorridos. O procedimento se dá realizando uma análise para verificar se é possível e viável financeiramente a recuperação do motor em questão. Caso não seja, inicia-se a desmontagem e separação dos componentes. Aqueles que possuem sua gestão da cadeia de suprimentos bem definida, seguem o curso já estabelecido, como aço, alumínio e cobre.

Os processos de recuperação de recursos são essenciais para fechar o ciclo e alcançar processos mais circulares. O sucesso dessas estratégias de recuperação depende tanto dos mercados económicos de materiais valiosos quanto de aspetos de design do veículo, como durabilidade e

confiabilidade dos componentes, facilidade de desmontagem e montagem, facilidade de limpeza, inspeção e manutenção, características estas já mencionadas anteriormente. Uma estratégia é a reciclagem de componentes, envolvendo a transformação de materiais de uma forma para serem refeitos em um novo produto, seja no próprio ciclo, ou abastecendo de maneira sustentável outro ciclo.

4.4. Framework para o ciclo de um motor elétrico

O *framework* proposto na

Figura 17 exemplifica a proposta de adaptação do ciclo de vida de um motor elétrico a economia circular. Composto por cinco etapas, sendo elas o uso de materiais, o processo produtivo, a cadeia de abastecimento, a fase de utilização e os serviços e projeto do motor.

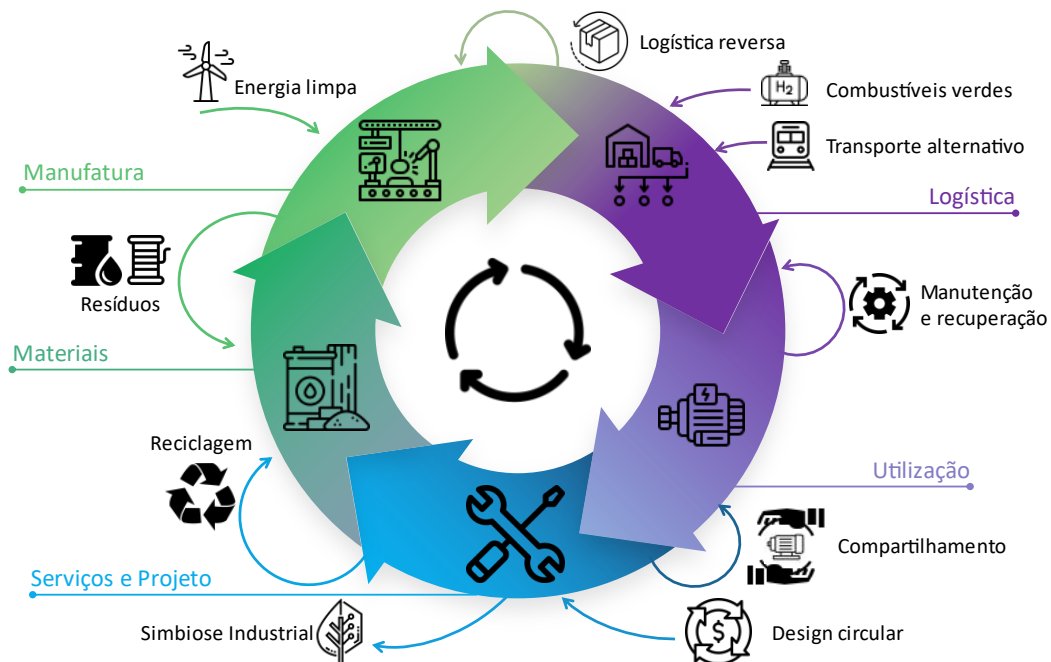


Figura 17 - Framework proposto para um motor elétrico, com processos e materiais adaptados a economia circular. Autoria própria.

O quadro desenvolvido tem início com a utilização de materiais mais consciente, seja com a utilização dos recuperados durante serviços desempenhados em outros motores, ou com materiais certificados obtidos de outros processos industriais, fomentando a construção de parques eco industriais e a simbiose industrial.

Na fase de manufatura, a estratégia circular é composta pela utilização de fontes de energia limpa, cadeias de fornecimento de alumínio, aço e cobre fechadas, com uma elevada taxa de reutilização. Além disso, integram-se materiais renováveis e outros componentes reutilizáveis no processo de produção. Adicionalmente, a busca constante pelo desperdício zero, uma gestão eficiente dos

resíduos, a descarbonização da produção, a implementação de iniciativas sustentáveis e a adoção de embalagens reutilizáveis são práticas essenciais nas instalações.

No setor logístico, a prioridade é a redução das emissões de carbono. Para atingir esse objetivo, são implementadas estratégias como a utilização de meios de transporte alternativos que reduzem a necessidade de uma frota extensa, a preferência por combustíveis mais ecológicos e a otimização da cadeia de fornecimento por meio do compartilhamento de fretes, visando aumentar a eficiência logística.

Na fase de utilização e prestação de serviços, adotam-se planos de manutenção periódica, promove-se o compartilhamento de motores em situações pontuais, investe-se na recuperação de motores previamente utilizados para revenda a preços mais acessíveis, estimula-se a recuperação de recursos e fomenta-se a simbiose industrial, estabelecendo parcerias com foco na sustentabilidade.

Esta abordagem holística e integrada ao longo de toda a cadeia produtiva visa não apenas aprimorar a eficiência e a sustentabilidade da produção de motores elétricos, mas também a contribuir para a construção de um futuro mais responsável e circular.

5. CONCLUSÃO

A implementação de processos circulares para motores elétricos não é uma tarefa de solução simples. No entanto, esta abordagem tende a ser explorada e aprimorada à medida que elementos políticos e econômicos influenciam a adoção dos princípios da economia circular em diversos setores da economia, especialmente na indústria. Isso acontece em resposta ao crescimento da demanda industrial e à adoção de práticas sustentáveis por parte deste setor, sendo a indústria de soluções energéticas um elemento importante nessa análise.

A implementação dos princípios da economia circular em uma empresa exige a realização de múltiplas avaliações relacionadas a custos, eficiência técnica e econômica. Para alcançar esse objetivo, é fundamental possuir um conhecimento aprofundado de cada fase do processo produtivo e realizar um mapeamento minucioso deste.

A dissertação atingiu três dos quatro objetivos definidos. Foi obtida uma compreensão abrangente dos principais conceitos no âmbito da economia circular, além do estudo de como os modelos de negócios circulares podem influenciar as cadeias de abastecimento, estabelecendo uma sólida conexão entre os princípios da economia circular e a dinâmica destas. Por fim, foi possível analisar e desenvolver um *framework* para a implementação de modelos de negócios circulares e como estes podem impactar as cadeias de abastecimento na indústria de motores elétricos.

Embora a maioria dos objetivos tenha sido alcançada, o trabalho permanece incompleto em um aspecto - a capacidade de medir a circularidade com precisão. Durante a pesquisa, não foi possível implementar técnicas de medição de circularidade em ambientes industriais. No entanto, isso representa uma oportunidade para pesquisas e desenvolvimentos futuros, uma vez que a exploração de metodologias, ferramentas e estruturas para compreender e implementar modelos de negócios circulares dentro das cadeias de abastecimento estabeleceu uma base que poderá ser aproveitada.

Durante a revisão bibliográfica, foram consultados um total de 103 artigos com o intuito de aprofundar a compreensão dos temas abordados. Para este fim, foram utilizadas as plataformas *Google Scholar* e *Web of Science*, com palavras-chave como sustentabilidade, economia circular e cadeias de abastecimento circulares. Essa pesquisa foi fundamental para embasar e sustentar todo o referencial teórico posteriormente utilizado para desenvolver o *framework*. Entre os tópicos analisados, destacam-se estudos de caso, revisões bibliográficas, pesquisas qualitativas e modelos de circularidade propostos.

A metodologia aplicada na consecução dos nossos objetivos revelou-se altamente eficaz. Através dela, não apenas acumulamos conhecimento a partir de artigos previamente publicados, mas também desenvolvemos estratégias e métodos viáveis para a implementação da economia circular em um contexto prático. Ao longo da pesquisa, dedicamos esforços para identificar e analisar diversas abordagens destinadas a solucionar desafios similares. Essa abordagem nos permitiu reconhecer a importância das medidas adotadas em cada etapa do processo de fabricação de um motor elétrico, desde a aquisição da matéria-prima até o pós-venda, enfatizando a significativa redução dos impactos ambientais quando comparada aos padrões de consumo atuais.

O *framework* desenvolvido para avaliar o estado atual da indústria de motores elétricos e demonstrar as potenciais aplicações da economia circular, por meio de um estudo de caso, destaca-

se como uma contribuição significativa. Abordar essa questão em uma perspectiva global permitiu-nos caracterizar a empresa em questão e visualizar oportunidades de melhoria.

Os setores que receberam maior atenção revelaram uma notável capacidade para contribuir com a sustentabilidade dos processos. O setor de bobinagem, que utiliza o cobre como principal matéria-prima, desempenha um papel crucial devido à sua alta reciclabilidade e versatilidade na produção e reparação de motores, tanto em novas máquinas quanto na manutenção das já existentes.

Outro setor que mereceu destaque foi o de assistência técnica, notório pelo recondicionamento, uma ferramenta poderosa para aumentar a circularidade do ciclo de vida dos produtos. Quando combinado com uma estratégia de simbiose com os processos na cadeia de produção, pode gerar resultados ainda mais significativos.

No entanto, um dos desafios identificados que limita a sustentabilidade dos processos está relacionado com a matriz energética, tanto no fabrico e reparação, como no abastecimento da frota responsável pelo transporte de matérias-primas e produtos finais. Organizações globais já estabeleceram metas para o desenvolvimento de energias renováveis, como a Diretiva 2018/2001 da União Europeia [158], que visa acelerar a transição energética e alcançar uma quota de 42,5% de energias renováveis até 2030 [159].

No que diz respeito aos transportes, a maior parte da logística é realizada por veículos terrestres pesados, como camiões, e, muitas vezes, suas capacidades não são totalmente aproveitadas para reduzir os tempos de entrega. Nesse sentido, a eletrificação da frota pode reduzir as emissões de carbono [160], bem como a utilização de combustíveis verdes, como o hidrogénio. É responsabilidade das empresas oferecer incentivos às suas parceiras que optem por veículos mais sustentáveis. Outra opção seria otimizar as emissões por quilómetro para envios mais longos, como a utilização de ferrovias.

A cadeia de abastecimento de matérias-primas, especialmente no que se refere aos metais raros, desempenha um papel fundamental na promoção da economia circular na indústria de motores elétricos. A indústria já possui um entendimento sólido dos ciclos de reciclagem de materiais essenciais, como aço, alumínio e cobre, com sistemas bem definidos e implementados, muitas vezes incentivados por incentivos financeiros. No entanto, persiste uma subutilização de materiais dentro desses ciclos, como peças que são devolvidas e substituídas, que, por meio do recondicionamento, poderiam prolongar sua vida útil e permanecer no ciclo por mais tempo. Além disso, o atual quadro de incentivos e diretrizes para a economia circular na indústria de motores elétricos não está totalmente claro, já que, em alguns casos, o impacto econômico e ambiental das atividades de economia circular não se alinha perfeitamente com os benefícios da extensão da vida útil do produto ou componente.

O setor de serviços desempenha um papel de destaque na promoção da circularidade nos serviços, especialmente no recondicionamento de motores elétricos, que pode significativamente aumentar sua vida útil. Este processo frequentemente envolve pequenos reparos e a substituição de componentes desgastados, como rolamentos. Além disso, há uma avaliação metódica do potencial de reaproveitamento de peças de motores, juntamente com a fabricação de estruturas destinadas a substituir apenas as partes consideradas inaptas para uso. No entanto, é importante destacar que a predominância de operações manuais e a falta de automação representam desafios significativos nesse contexto. Esses fatores tendem a aumentar os custos com mão de obra, o que

pode afetar a viabilidade econômica da abordagem de economia circular. Além disso, a baixa automação das operações relacionadas ao setor de assistência técnica para motores elétricos pode resultar em produtividade inferior, afetando a capacidade de atender à demanda de forma eficiente e ambientalmente sustentável.

Este trabalho pode servir como um modelo e referência para diversas áreas de pesquisa e aplicação (i) Estudos de caso em economia circular em diferentes indústrias, proporcionando uma estrutura para avaliar o estado atual e as potenciais aplicações da economia circular; (ii) Exploração da integração da sustentabilidade na indústria de motores elétricos, com foco em estratégias de implementação; (iii) Análise aprofundada das cadeias de abastecimento e da reciclagem de materiais, considerando desafios relacionados à matriz energética e transporte na sustentabilidade industrial; (iv) Avaliação do papel crucial do setor de pós-vendas em uma indústria orientada pelos princípios da economia circular.

5.1. Conclusões finais

Este estudo abordou a aplicação da economia circular na indústria de motores elétricos, com foco especial na assistência técnica, reparações e na área de bobinagem, que foram áreas de pesquisa destacadas. Os resultados destacam os benefícios e desafios intrínsecos a essa abordagem.

A economia circular desempenha um papel crucial na promoção da sustentabilidade, na redução da dependência de matérias-primas escassas e na minimização do impacto ambiental. Através de uma avaliação abrangente, identificaram-se áreas críticas de foco, como a reciclagem eficaz de materiais e sua reutilização no processo produtivo, otimização da logística e eletrificação da frota de transporte. Além disso, reconhece-se a importância de aprimorar os processos de recondição e aplicar conceitos de economia circular, como a simbiose industrial e a servilização de produtos.

No contexto da cadeia produtiva como um todo, a indústria está aprimorando seus ciclos de reciclagem de materiais-chave, como aço, alumínio e cobre, o que contribui para a redução dos impactos ambientais em comparação com os padrões de consumo convencionais. Além disso, medidas financeiras estão sendo cada vez mais adotadas para impulsionar a circularidade de materiais, tornando a economia circular uma opção economicamente atrativa.

Na assistência técnica e reparações, a economia circular se destaca ao aumentar consideravelmente a vida útil dos motores elétricos. O recondição, incluindo a substituição de peças desgastadas e pequenos reparos, desempenha um papel crucial nesse processo. Essa abordagem não apenas prolonga a vida útil dos produtos, mas também reduz significativamente a quantidade de resíduos gerados, contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

A eficiência de recursos é um dos pilares da economia circular, e a assistência técnica abraça esse conceito ao aproveitar ao máximo os materiais e componentes existentes, reduzindo a necessidade de novas matérias-primas. Isso resulta em economias significativas de custos tanto para as empresas quanto para os clientes.

No entanto, persistem desafios, incluindo a necessidade de políticas claras e incentivos para promover a economia circular, especialmente quando o impacto econômico e ambiental das

práticas não é imediatamente equilibrado pelos benefícios da extensão da vida útil dos produtos. A questão da matriz energética também é crítica, com a transição para fontes de energia renovável desempenhando um papel fundamental na redução das emissões de carbono.

A indústria de motores elétricos tem um papel crucial a desempenhar na transição para uma economia mais circular e sustentável, dada sua atuação abrangente em diversos setores e atividades. Através de uma abordagem estratégica e melhoria contínua, as empresas deste setor podem não apenas reduzir seu impacto ambiental, mas também fortalecer sua posição competitiva em um mundo cada vez mais orientado para a sustentabilidade.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Uma limitação significativa deste estudo é a falta de implementação prática das medidas concebidas para aumentar a circularidade dos processos. Isso resulta na incapacidade de gerar resultados mensuráveis que poderiam enriquecer ainda mais a pesquisa. A ausência de implementação prática torna difícil a realização de análises comparativas e a criação de um *roadmap* detalhado para a implementação de práticas de economia circular.

Para orientar futuras investigações de forma mais precisa, é fundamental adotar uma abordagem mais focalizada. Isso implica determinar quais estratégias de economia circular podem proporcionar as maiores reduções nas emissões de gases de efeito de estufa e no consumo de recursos. Além disso, é crucial realizar uma análise detalhada das emissões relacionadas com os processos logísticos, comparando os diferentes meios de transporte em relação ao lead time, visando a otimização e a viabilidade para as empresas.

Trabalhos futuros devem abordar a eficiência dos materiais, a reutilização e a reciclagem de componentes, bem como o design de motores elétricos e tecnologias de baixo teor de carbono. Essas análises são fundamentais para desenvolver estratégias específicas de economia circular. Adicionalmente, os estudos devem considerar o tempo necessário para alcançar a circularidade, as implicações de motores mais circulares na descarbonização global e o papel das tecnologias disruptivas, como a robótica e a inteligência artificial, na superação desses desafios.

É igualmente importante examinar a influência dos indicadores que mensuram a circularidade dos processos, incluindo suas definições, implementações e impactos. Somente ao considerar todas essas dimensões é que a indústria automóvel poderá avançar em direção a um futuro verdadeiramente sustentável e circular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministério dos Negócios Estrangeiros, «Relatório nacional sobre a implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável», Nova Iorque, 2017.
- [2] S. P. N. Samani, N. Khani, M. Bahrami, e A. M. Sharifabadi, «Different concepts of supply chain sustainability: an approach on circular supply chain», *Nexo Revista Científica*, vol. 35, n. 02, pp. 626–640, Jun. 2022, doi: 10.5377/nexo.v35i02.14642.
- [3] M. Lieder e A. Rashid, «Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry», *Journal of Cleaner Production*, vol. 115. Elsevier Ltd, pp. 36–51, 1 de Março de 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.042.
- [4] F. M. Asif, «Circular Manufacturing Systems A development framework with analysis methods and tools for implementation», KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2017.
- [5] M. Xu, J. M. David, e S. H. Kim, «The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges», *International Journal of Financial Research*, vol. 9, n. 2, pp. 90–95, Abr. 2018, doi: 10.5430/ijfr.v9n2p90.
- [6] T. Roy, J. A. Garza-Reyes, V. Kumar, A. Kumar, e R. Agrawal, «Redesigning traditional linear supply chains into circular supply chains—A study into its challenges», *Sustain Prod Consum*, vol. 31, pp. 113–126, Mai. 2022, doi: 10.1016/j.spc.2022.02.004.
- [7] European Commission Directorate, «circular economy action plan», 2020.
- [8] M. A. Taleb e O. al Farooque, «Towards a circular economy for sustainable development: An application of full cost accounting to municipal waste recyclables», *J Clean Prod*, vol. 280, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124047.
- [9] M. Demartini, F. Tonelli, e K. Govindan, «An investigation into modelling approaches for industrial symbiosis: A literature review and research agenda», *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 3. Elsevier Ltd, 1 de Março de 2022. doi: 10.1016/j.clscn.2021.100020.
- [10] S. Amir, N. Salehi, M. Roci, S. Sweet, e A. Rashid, «Towards circular economy: A guiding framework for circular supply chain implementation», *Bus Strategy Environ*, 2022, doi: 10.1002/bse.3264.
- [11] T. Domenech e B. Bahn-Walkowiak, «Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe: Policy Lessons From the EU and the Member States», *Ecological Economics*, vol. 155, pp. 7–19, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.11.001.
- [12] J. M. Rodriguez-Anton, L. Rubio-Andrada, M. S. Celemín-Pedroche, e M. D. M. Alonso-Almeida, «Analysis of the relations between circular economy and sustainable development goals», *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, vol. 26, n. 8, pp. 708–720, Nov. 2019, doi: 10.1080/13504509.2019.1666754.

- [13] K. Govindan, «Tunneling the barriers of blockchain technology in remanufacturing for achieving sustainable development goals: A circular manufacturing perspective», *Bus Strategy Environ*, Dez. 2022, doi: 10.1002/bse.3031.
- [14] M. Roci *et al.*, «Towards circular manufacturing systems implementation: A complex adaptive systems perspective using modelling and simulation as a quantitative analysis tool», *Sustain Prod Consum*, vol. 31, pp. 97–112, Mai. 2022, doi: 10.1016/j.spc.2022.01.033.
- [15] S. Lahane e R. Kant, «Investigating the sustainable development goals derived due to adoption of circular economy practices», *Waste Management*, vol. 143, pp. 1–14, Abr. 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2022.02.016.
- [16] D. Vegter, J. van Hillegersberg, e M. Olthaar, «Performance measurement systems for circular supply chain management: Current state of development», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, n. 21. MDPI, 1 de Novembro de 2021. doi: 10.3390/su132112082.
- [17] S. Geisendorf e F. Pietrulla, «The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition», *Thunderbird International Business Review*, vol. 60, n. 5, pp. 771–782, Set. 2018, doi: 10.1002/tie.21924.
- [18] M. Farooque, A. Zhang, M. Thürer, T. Qu, e D. Huisingh, «Circular supply chain management: A definition and structured literature review», *Journal of Cleaner Production*, vol. 228. Elsevier Ltd, pp. 882–900, 10 de Agosto de 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.303.
- [19] L. Batista, M. Bourlakis, Y. Liu, P. Smart, e A. Sohal, «Supply chain operations for a circular economy», *Production Planning and Control*, vol. 29, n. 6. Taylor and Francis Ltd., pp. 419–424, 26 de Abril de 2018. doi: 10.1080/09537287.2018.1449267.
- [20] S. Lahane e R. Kant, «Evaluation and ranking of solutions to mitigate circular supply chain risks», *Sustain Prod Consum*, vol. 27, pp. 753–773, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.spc.2021.01.034.
- [21] R. Merli, M. Preziosi, e A. Acampora, «How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review», *Journal of Cleaner Production*, vol. 178. Elsevier Ltd, pp. 703–722, 20 de Março de 2018. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.112.
- [22] G. Bressanelli, N. Saccani, D. C. A. Pigosso, e M. Perona, «Circular Economy in the WEEE industry: a systematic literature review and a research agenda», *Sustainable Production and Consumption*, vol. 23. Elsevier B.V., pp. 174–188, 1 de Julho de 2020. doi: 10.1016/j.spc.2020.05.007.
- [23] G. Yadav, S. Luthra, S. K. Jakhar, S. K. Mangla, e D. P. Rai, «A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: An automotive case», *J Clean Prod*, vol. 254, Mai. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120112.
- [24] A. Huang e F. Badurdeen, «Metrics-based approach to evaluate sustainable manufacturing performance at the production line and plant levels», *J Clean Prod*, vol. 192, pp. 462–476, Ago. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.234.

- [25] N. Abramovich e A. Vasiliu, «Sustainability as fairness: A Ralwsian framework linking intergenerational equity and the sustainable development goals (SDGs) with business practices», *Sustainable Development*, 2022, doi: 10.1002/sd.2451.
- [26] S. Ahmad e K. Y. Wong, «Development of weighted triple-bottom line sustainability indicators for the Malaysian food manufacturing industry using the Delphi method», *J Clean Prod*, vol. 229, pp. 1167–1182, Ago. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.399.
- [27] M. Hashim, M. Nazam, M. Abrar, Z. Hussain, M. Nazim, e R. Shabbir, «Unlocking the Sustainable Production Indicators: A Novel TESCO based Fuzzy AHP Approach», *Cogent Business and Management*, vol. 8, n. 1, 2021, doi: 10.1080/23311975.2020.1870807.
- [28] A. T. Mengistu e R. Panizzolo, «Analysis of indicators used for measuring industrial sustainability: a systematic review», *Environment, Development and Sustainability*. Springer Science and Business Media B.V., 2022. doi: 10.1007/s10668-021-02053-0.
- [29] B. J. Brown, M. E. Hanson, D. M. Liverman, e R. W. Merideth, «Global Sustainability: Toward Definition», 1987.
- [30] H. von Carlowitz, *Sylvicultura oeconomica hausswirthliche Nachricht und naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht*. Leipzig, 1713.
- [31] M. Vogt e C. Weber, «Current challenges to the concept of sustainability», *Global Sustainability*, vol. 2, 2019, doi: 10.1017/sus.2019.1.
- [32] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, e E. J. Hultink, «The Circular Economy – A new sustainability paradigm?», *Journal of Cleaner Production*, vol. 143. Elsevier Ltd, pp. 757–768, 1 de Fevereiro de 2017. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
- [33] G. H. Brundtland, «Our common future: report of the world commission on environment and development», 1987.
- [34] M. Paziienza, M. de Jong, e D. Schoenmaker, «Clarifying the Concept of Corporate Sustainability and Providing Convergence for Its Definition», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, n. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/su14137838.
- [35] B. Moldan, S. Janoušková, e T. Hák, «How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets», *Ecol Indic*, vol. 17, pp. 4–13, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.ecolind.2011.04.033.
- [36] T. O. Tøllefsen, «Sustainability as a “magic concept”», *Cuadernos Europeos de Deusto*, n. 64. University of Deusto, pp. 29–52, 2021. doi: 10.18543/CED-64-2021PP29-52.
- [37] S. Sarkar e C. Searcy, «Zeitgeist or chameleon? A quantitative analysis of CSR definitions», *J Clean Prod*, vol. 135, pp. 1423–1435, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.157.
- [38] M. Ashrafi, G. M. Magnan, M. Adams, e T. R. Walker, «Understanding the conceptual evolutionary path and theoretical underpinnings of corporate social

- responsibility and corporate sustainability», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, n. 3, Fev. 2020, doi: 10.3390/su12030760.
- [39] B. Purvis, Y. Mao, e D. Robinson, «Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins», *Sustainable Science*, 1987, doi: 10.1017/S0376892900011449.
- [40] A. Clément, É. Robinot, e L. Trespeuch, «Improving ESG Scores with Sustainability Concepts», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, n. 20, Out. 2022, doi: 10.3390/su142013154.
- [41] C. A. Ruggerio, «Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions», *Science of the Total Environment*, vol. 786. Elsevier B.V., 10 de Setembro de 2021. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147481.
- [42] W. A. Salas-Zapata e S. M. Ortiz-Muñoz, «Analysis of meanings of the concept of sustainability», *Sustainable Development*, vol. 27, n. 1, pp. 153–161, Jan. 2019, doi: 10.1002/sd.1885.
- [43] R. D. Chang, J. Zuo, Z. Y. Zhao, G. Zillante, X. L. Gan, e V. Soebarto, «Evolving theories of sustainability and firms: History, future directions and implications for renewable energy research», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72. Elsevier Ltd, pp. 48–56, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.029.
- [44] M. A. Köseoglu, M. Y. Yee Yick, e J. A. Parnell, «The dissemination of corporate social responsibility into the intellectual structure of strategic management», *J Clean Prod*, vol. 311, Ago. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127505.
- [45] R. E. Freeman, R. Phillips, e R. Sisodia, «Tensions in Stakeholder Theory», *Bus Soc*, vol. 59, n. 2, pp. 213–231, Fev. 2020, doi: 10.1177/0007650318773750.
- [46] N. Aktaş e N. Demirel, «A hybrid framework for evaluating corporate sustainability using multi-criteria decision making», *Environ Dev Sustain*, vol. 23, n. 10, pp. 15591–15618, Out. 2021, doi: 10.1007/s10668-021-01311-5.
- [47] A. A. Feil, D. Schreiber, C. Haetinger, V. J. Strasburg, e C. L. Barkert, «Sustainability indicators for industrial organizations: Systematic review of literature», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, n. 3. MDPI, 7 de Fevereiro de 2019. doi: 10.3390/su11030854.
- [48] V. Veleva, M. Hart, T. Greiner, e C. Crumbley, «Indicators of sustainable production», 2001. [Em linha]. Disponível em: www.cleanerproduction.net
- [49] W. C. Lucato, J. C. da S. Santos, e A. P. T. Pacchini, «Measuring the sustainability of a manufacturing process: A conceptual framework», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, n. 1, Jan. 2018, doi: 10.3390/su10010081.
- [50] G. Büyüközkan e Y. Karabulut, «Sustainability performance evaluation: Literature review and future directions», *J Environ Manage*, vol. 217, pp. 253–267, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.03.064.
- [51] A. M. Walker *et al.*, «What Is the Relation between Circular Economy and Sustainability? Answers from Frontrunner Companies Engaged with Circular

- Economy Practices», *Circular Economy and Sustainability*, vol. 2, n. 2, pp. 731–758, Jun. 2022, doi: 10.1007/s43615-021-00064-7.
- [52] Ellen McArthur Foundation, «Towards The Circular Economy», 2013.
- [53] J. Kirchherr, D. Reike, e M. Hekkert, «Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 127. Elsevier B.V., pp. 221–232, 2017. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [54] C. Magnin-Mallez, «The circular economy: Moving from theory to practice», 2016.
- [55] EMF, «Towards the Circular Economy», 2013.
- [56] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, e A. Hanemaaijer, «CIRCULAR ECONOMY: MEASURING INNOVATION IN THE PRODUCT CHAIN Policy Report», 2017.
- [57] D. Mathivathanan, K. Mathiyazhagan, A. Noorul Haq, e V. Kaippillil, «Comparative study on adoption of sustainable supply chain management practices in Indian manufacturing industries», *Journal of Modelling in Management*, vol. 14, n. 4, pp. 1006–1022, Out. 2019, doi: 10.1108/JM2-09-2018-0137.
- [58] V. Ranta, L. Aarikka-Stenroos, e S. J. Mäkinen, «Creating value in the circular economy: A structured multiple-case analysis of business models», *J Clean Prod*, vol. 201, pp. 988–1000, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.072.
- [59] E. Hysa, A. Kruja, N. U. Rehman, e R. Laurenti, «Circular economy innovation and environmental sustainability impact on economic growth: An integrated model for sustainable development», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, n. 12, Jun. 2020, doi: 10.3390/SU12124831.
- [60] V. Rizos, K. Tuokko, A. Behrens, e B. Centre for European Policy Studies (Brussels), *The circular economy, a review of definitions, processes and impacts*.
- [61] J. Korhonen, A. Honkasalo, e J. Seppälä, «Circular Economy: The Concept and its Limitations», *Ecological Economics*, vol. 143, pp. 37–46, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041.
- [62] D. W. Pearce e R. K. Turner, *Economics of Natural Resources and the Environment*, vol. 73, n. 1. Wiley, 1991. doi: 10.2307/1242904.
- [63] K. E. Boulding, *The Economics of the Coming Spaceship Earth*. 1966. [Em linha]. Disponível em: <http://www.geocities.com/RainForest/3621/BOULDING.HTM>
- [64] P. Ghisellini, C. Cialani, e S. Ulgiati, «A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems», *J Clean Prod*, vol. 114, pp. 11–32, Fev. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.
- [65] A. Murray, K. Skene, e K. Haynes, «The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context», *Journal of Business Ethics*, vol. 140, n. 3, pp. 369–380, Fev. 2017, doi: 10.1007/s10551-015-2693-2.
- [66] D. Lazarevic e H. Valve, «Narrating expectations for the circular economy: Towards a common and contested European transition», *Energy Res Soc Sci*, vol. 31, pp. 60–69, Set. 2017, doi: 10.1016/j.erss.2017.05.006.

- [67] F. Blomsma e G. Brennan, «The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity», *J Ind Ecol*, vol. 21, n. 3, pp. 603–614, Jun. 2017, doi: 10.1111/jiec.12603.
- [68] S. Sauvé, S. Bernard, e P. Sloan, «Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research», *Environ Dev*, vol. 17, pp. 48–56, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.envdev.2015.09.002.
- [69] B. Su, A. Heshmati, Y. Geng, e X. Yu, «A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation», *J Clean Prod*, vol. 42, pp. 215–227, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.11.020.
- [70] P. Ghisellini, C. Cialani, e S. Ulgiati, «A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems», *J Clean Prod*, vol. 114, pp. 11–32, Fev. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.
- [71] M. Braungart, W. McDonough, e A. Bollinger, «Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design», *J Clean Prod*, vol. 15, n. 13–14, pp. 1337–1348, 2007, doi: 10.1016/j.jclepro.2006.08.003.
- [72] M. Howard, P. Hopkinson, e J. Miemczyk, «The regenerative supply chain: a framework for developing circular economy indicators», *Int J Prod Res*, vol. 57, n. 23, pp. 7300–7318, Dez. 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1524166.
- [73] A. P. M. Velenturf, S. A. Archer, H. I. Gomes, B. Christgen, A. J. Lag-Brotons, e P. Purnell, «Circular economy and the matter of integrated resources», *Science of the Total Environment*, vol. 689. Elsevier B.V., pp. 963–969, 1 de Novembro de 2019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.449.
- [74] H. Corvellec, A. F. Stowell, e N. Johansson, «Critiques of the circular economy», *J Ind Ecol*, vol. 26, n. 2, pp. 421–432, Abr. 2022, doi: 10.1111/jiec.13187.
- [75] N. M. P. Bocken, S. W. Short, P. Rana, e S. Evans, «A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes», *Journal of Cleaner Production*, vol. 65, pp. 42–56, 15 de Fevereiro de 2014. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.11.039.
- [76] S. Evans *et al.*, «Business Model Innovation for Sustainability: Towards a Unified Perspective for Creation of Sustainable Business Models», *Bus Strategy Environ*, vol. 26, n. 5, pp. 597–608, Jul. 2017, doi: 10.1002/bse.1939.
- [77] R. Salvador, M. V. Barros, L. M. da Luz, C. M. Piekarski, e A. C. de Francisco, «Circular business models: Current aspects that influence implementation and unaddressed subjects», *Journal of Cleaner Production*, vol. 250. Elsevier Ltd, 20 de Março de 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119555.
- [78] M. Lewandowski, «Designing the business models for circular economy-towards the conceptual framework», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 8, n. 1. MDPI, 2016. doi: 10.3390/su8010043.
- [79] H. Kopnina, «Circular economy and cradle to cradle in educational practice», *Journal of Integrative Environmental Sciences*, vol. 15, n. 1, pp. 119–134, Jan. 2018, doi: 10.1080/1943815X.2018.1471724.

- [80] M. Geissdoerfer, S. N. Morioka, M. M. de Carvalho, e S. Evans, «Business models and supply chains for the circular economy», *J Clean Prod*, vol. 190, pp. 712–721, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.159.
- [81] M. Geissdoerfer, M. P. P. Pieroni, D. C. A. Pigosso, e K. Soufani, «Circular business models: A review», *Journal of Cleaner Production*, vol. 277. Elsevier Ltd, 20 de Dezembro de 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123741.
- [82] G. Moraga *et al.*, «Circular economy indicators: What do they measure?», *Resour Conserv Recycl*, vol. 146, pp. 452–461, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.03.045.
- [83] R. De Angelis, M. Howard, e J. Miemczyk, «Supply chain management and the circular economy: towards the circular supply chain», *Production Planning and Control*, vol. 29, n. 6, pp. 425–437, Abr. 2018, doi: 10.1080/09537287.2018.1449244.
- [84] K. Derojeda *et al.*, «Clean Technologies Circular supply chains», 2014.
- [85] L. Batista, M. Bourlakis, P. Smart, e R. Maull, «In search of a circular supply chain archetype—a content-analysis-based literature review», *Production Planning and Control*, vol. 29, n. 6, pp. 438–451, Abr. 2018, doi: 10.1080/09537287.2017.1343502.
- [86] M. H. A. Nasir, A. Genovese, A. A. Acquaye, S. C. L. Koh, e F. Yamoah, «Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry», *Int J Prod Econ*, vol. 183, pp. 443–457, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.06.008.
- [87] S. K. Mangla *et al.*, «Barriers to effective circular supply chain management in a developing country context», *Production Planning and Control*, vol. 29, n. 6, pp. 551–569, Abr. 2018, doi: 10.1080/09537287.2018.1449265.
- [88] E. Hassini, C. Surti, e C. Searcy, «A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics», *Int J Prod Econ*, vol. 140, n. 1, pp. 69–82, 2012, doi: 10.1016/j.ijpe.2012.01.042.
- [89] S. Seuring e M. Müller, «From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management», *J Clean Prod*, vol. 16, n. 15, pp. 1699–1710, Out. 2008, doi: 10.1016/j.jclepro.2008.04.020.
- [90] M. Theeraworawit, S. Suriyankietkaew, e P. Hallinger, «Sustainable Supply Chain Management in a Circular Economy: A Bibliometric Review», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, n. 15. MDPI, 1 de Agosto de 2022. doi: 10.3390/su14159304.
- [91] D. Masi, S. Day, e J. Godsell, «Supply chain configurations in the circular economy: A systematic literature review», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, n. 9. MDPI, 7 de Setembro de 2017. doi: 10.3390/su9091602.
- [92] R. R. Heeres, W. J. V. Vermeulen, e F. B. de Walle, «Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: First lessons», *J Clean Prod*, vol. 12, n. 8–10, pp. 985–995, Out. 2004, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.02.014.

- [93] J. Liu, Y. Feng, Q. Zhu, e J. Sarkis, «Green supply chain management and the circular economy: Reviewing theory for advancement of both fields», *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 48, n. 8. Emerald Group Holdings Ltd., pp. 794–817, 12 de Setembro de 2018. doi: 10.1108/IJPDLM-01-2017-0049.
- [94] A. Genovese, A. A. Acquaye, A. Figueroa, e S. C. L. Koh, «Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications», *Omega (United Kingdom)*, vol. 66, pp. 344–357, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.omega.2015.05.015.
- [95] K. Govindan, H. Soleimani, e D. Kannan, «Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future», *European Journal of Operational Research*, vol. 240, n. 3. Elsevier B.V., pp. 603–626, 2015. doi: 10.1016/j.ejor.2014.07.012.
- [96] R. González-Sánchez, D. Settembre-Blundo, A. M. Ferrari, e F. E. García-Muiña, «Main dimensions in the building of the circular supply chain: A literature review», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, n. 6. MDPI, 1 de Março de 2020. doi: 10.3390/su12062459.
- [97] F. Lüdeke-Freund, S. Gold, e N. M. P. Bocken, «A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, n. 1. Blackwell Publishing, pp. 36–61, 1 de Fevereiro de 2019. doi: 10.1111/jiec.12763.
- [98] N. M. P. Bocken, I. de Pauw, C. Bakker, e B. van der Grinten, «Product design and business model strategies for a circular economy», *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 33, n. 5, pp. 308–320, Jul. 2016, doi: 10.1080/21681015.2016.1172124.
- [99] M. E. Porter, *Competitive advantage : creating and sustaining superior performance*. Free Press, 1985.
- [100] J. L. Mishra, P. G. Hopkinson, e G. Tidridge, «Value creation from circular economy-led closed loop supply chains: a case study of fast-moving consumer goods», *Production Planning and Control*, vol. 29, n. 6, pp. 509–521, Abr. 2018, doi: 10.1080/09537287.2018.1449245.
- [101] Y. Kazancoglu, I. Kazancoglu, e M. Sagnak, «A new holistic conceptual framework for green supply chain management performance assessment based on circular economy», *J Clean Prod*, vol. 195, pp. 1282–1299, Set. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.015.
- [102] M. Farooque, A. Zhang, e Y. Liu, «Barriers to circular food supply chains in China», *Supply Chain Management*, vol. 24, n. 5, pp. 677–696, Ago. 2019, doi: 10.1108/SCM-10-2018-0345.
- [103] L. Aarikka-Stenroos, D. Chiaroni, J. Kaipainen, e A. Urbinati, «Companies' circular business models enabled by supply chain collaborations: An empirical-based framework, synthesis, and research agenda», *Industrial Marketing Management*, vol. 105, pp. 322–339, Ago. 2022, doi: 10.1016/j.indmarman.2022.06.015.

- [104] G. Bressanelli, D. C. A. Pigosso, N. Saccani, e M. Perona, «Enablers, levers and benefits of Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment supply chain: a literature review», *J Clean Prod*, vol. 298, Mai. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126819.
- [105] V. Julianelli, R. G. G. Caiado, L. F. Scavarda, e S. P. de M. F. Cruz, «Interplay between reverse logistics and circular economy: Critical success factors-based taxonomy and framework», *Resour Conserv Recycl*, vol. 158, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104784.
- [106] H. Corvellec e H. I. Stål, «Qualification as corporate activism: How Swedish apparel retailers attach circular fashion qualities to take-back systems», *Scandinavian Journal of Management*, vol. 35, n. 3, Set. 2019, doi: 10.1016/j.scaman.2019.03.002.
- [107] B. T. Hazen, I. Russo, I. Confente, e D. Pellathy, «Supply chain management for circular economy: conceptual framework and research agenda», *International Journal of Logistics Management*, vol. 32, n. 2, pp. 510–537, 2020, doi: 10.1108/IJLM-12-2019-0332.
- [108] Y. D. Ozkan-Ozen, Y. Kazancoglu, e S. Kumar Mangla, «SYNCHRONIZED BARRIERS FOR CIRCULAR SUPPLY CHAINS IN INDUSTRY 3.5/INDUSTRY 4.0 TRANSITION FOR SUSTAINABLE RESOURCE MANAGEMENT», *Resour Conserv Recycl*, vol. 161, Out. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104986.
- [109] G. Bressanelli, M. Perona, e N. Saccani, «Challenges in supply chain redesign for the Circular Economy: a literature review and a multiple case study», *Int J Prod Res*, vol. 57, n. 23, pp. 7395–7422, Dez. 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1542176.
- [110] Y. Kazancoglu, M. Sagnak, S. K. Mangla, M. D. Sezer, e M. O. Pala, «A fuzzy based hybrid decision framework to circularity in dairy supply chains through big data solutions», *Technol Forecast Soc Change*, vol. 170, Set. 2021, doi: 10.1016/j.techfore.2021.120927.
- [111] Y. Kalmykova, M. Sadagopan, e L. Rosado, «Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools», *Resour Conserv Recycl*, vol. 135, pp. 190–201, Ago. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.034.
- [112] S. Ritzén e G. Ö. Sandström, «Barriers to the Circular Economy - Integration of Perspectives and Domains», em *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2017, pp. 7–12. doi: 10.1016/j.procir.2017.03.005.
- [113] A. L. Bîrgovan *et al.*, «How Should We Measure? A Review of Circular Cities Indicators», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, n. 9. MDPI, 1 de Maio de 2022. doi: 10.3390/ijerph19095177.
- [114] M. P. Dočekalová e A. Kocmanová, «Composite indicator for measuring corporate sustainability», *Ecol Indic*, vol. 61, pp. 612–623, Fev. 2016, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.10.012.
- [115] Y. Li e K. Mathiyazhagan, «Application of DEMATEL approach to identify the influential indicators towards sustainable supply chain adoption in the auto

- components manufacturing sector», *J Clean Prod*, vol. 172, pp. 2931–2941, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.120.
- [116] S. Walker, N. Coleman, P. Hodgson, N. Collins, e L. Brimacombe, «Evaluating the environmental dimension of material efficiency strategies relating to the circular economy», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, n. 3, Mar. 2018, doi: 10.3390/su10030666.
- [117] V. Maestrini, D. Luzzini, P. Maccarrone, e F. Caniato, «Supply chain performance measurement systems: A systematic review and research agenda», *International Journal of Production Economics*, vol. 183. Elsevier B.V., pp. 299–315, 1 de Janeiro de 2017. doi: 10.1016/j.ijpe.2016.11.005.
- [118] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, e A. Kendall, «A taxonomy of circular economy indicators», *Journal of Cleaner Production*, vol. 207. Elsevier Ltd, pp. 542–559, 10 de Janeiro de 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.014.
- [119] C. E. Nika *et al.*, «Validating circular performance indicators: The interface between circular economy and stakeholders», *Water (Switzerland)*, vol. 13, n. 16, Ago. 2021, doi: 10.3390/w13162198.
- [120] E. Kanellou, K. Alexakis, P. Kapsalis, P. Kokkinakos, e D. Askounis, «The DigiPrime KPIs’ framework for a circular economy transition in the automotive industry», em *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2021, pp. 302–307. doi: 10.1016/j.promfg.2021.09.003.
- [121] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, e F. Cluzel, «Hybrid top-down and bottom-up framework to measure products’ circularity performance AUTHORS», 2017.
- [122] H. Karlewski, A. Lehmann, K. Ruhland, e M. Finkbeiner, «A practical approach for social life cycle assessment in the automotive industry», *Resources*, vol. 8, n. 3, Set. 2019, doi: 10.3390/resources8030146.
- [123] C. Sassanelli, P. Rosa, R. Rocca, e S. Terzi, «Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review», *Journal of Cleaner Production*, vol. 229. Elsevier Ltd, pp. 440–453, 20 de Agosto de 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.019.
- [124] C. T. de Oliveira, T. E. T. Dantas, e S. R. Soares, «Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments», *Sustainable Production and Consumption*, vol. 26. Elsevier B.V., pp. 455–468, 1 de Abril de 2021. doi: 10.1016/j.spc.2020.11.024.
- [125] J. Brändström e M. Saidani, «Comparison between circularity metrics and LCA: A case study on circular economy strategies», *J Clean Prod*, vol. 371, Out. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133537.
- [126] E. Iacovidou *et al.*, «Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review», *Journal of Cleaner Production*, vol. 166. Elsevier Ltd, pp. 910–938, 10 de Novembro de 2017. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.100.

- [127] B. Corona, L. Shen, D. Reike, J. Rosales Carreón, e E. Worrell, «Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 151. Elsevier B.V., 1 de Dezembro de 2019. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104498.
- [128] U. Flick, *Introducao a Metodologia de Pesquisa: Um Guia para Iniciantes*. Porto Alegre: Penso, 2013.
- [129] C. Prodanov e E. de Freitas, *Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico*, vol. 2. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013. [Em linha]. Disponível em: www.feevale.br/editora
- [130] E. Cortez e D. A. Cruz, «DESENVOLVIMENTO DE UM FRAMEWORK PARA O PLANEJAMENTO DE COMPRAS PÚBLICAS: ESTUDO EM UMA UNIVERSIDADE FEDERAL», UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, Natal, Rio Grande do Natal, 2019.
- [131] International Energy Agency, «Energy Policy Review Portugal 2021», 2021. [Em linha]. Disponível em: www.iea.org/t&c/
- [132] I. L. Kosow, «Máquinas Elétricas e Transformadores», *Editora Globo*, 1982.
- [133] H. S. Furtado, «Supervisão e controle de um processo de impregnação de estatores para motores elétricos», Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- [134] B. L. MacCarthy, W. A. H. Ahmed, e G. Demirel, «Mapping the supply chain: Why, what and how?», *Int J Prod Econ*, vol. 250, Ago. 2022, doi: 10.1016/j.ijpe.2022.108688.
- [135] M. S. Mubarik *et al.*, «Resilience and cleaner production in industry 4.0: Role of supply chain mapping and visibility», *J Clean Prod*, vol. 292, Abr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126058.
- [136] L. Batista, M. Bourlakis, Y. Liu, P. Smart, e A. Sohal, «Supply chain operations for a circular economy», 2015.
- [137] M. S. Mubarik, S. Kusi-Sarpong, K. Govindan, S. A. Khan, e A. Oyedijo, «Supply chain mapping: a proposed construct», *Int J Prod Res*, vol. 61, n. 8, pp. 2653–2669, 2023, doi: 10.1080/00207543.2021.1944390.
- [138] A. Ghadge, H. Wurtmann, e S. Seuring, «Managing climate change risks in global supply chains: a review and research agenda», *International Journal of Production Research*, vol. 58, n. 1. Taylor and Francis Ltd., pp. 44–64, 2 de Janeiro de 2020. doi: 10.1080/00207543.2019.1629670.
- [139] D. Tiwari, J. Miscandlon, A. Tiwari, e G. W. Jewell, «A review of circular economy research for electric motors and the role of industry 4.0 technologies», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, n. 17, Set. 2021, doi: 10.3390/su13179668.
- [140] Agência Portuguesa do Ambiente, «Guia de Classificação de Resíduos», 2020.

- [141] «Lista Europeia de Resíduos». http://norsider.pt/site/documentos/pdf/Lista_Europeia_Residuos.pdf (acedido 21 de Agosto de 2023).
- [142] S. Kara, S. Manmek, H. Kaebernick, e S. Ibbotson, «Assessment of products for optimal lifetime», *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 57, n. 1, pp. 1–4, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.03.116.
- [143] D. Tiwari, M. Farnsworth, Z. Zhang, G. W. Jewell, e A. Tiwari, «In-process monitoring in electrical machine manufacturing: A review of state of the art and future directions», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 235, n. 13. SAGE Publications Ltd, pp. 2035–2051, 1 de Novembro de 2021. doi: 10.1177/09544054211016675.
- [144] Z. Li *et al.*, «Implementation and analysis of remanufacturing large-scale asynchronous motor to permanent magnet motor under circular economy conditions», *J Clean Prod*, vol. 294, Abr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126233.
- [145] M. Arnold *et al.*, «Contribution of remanufacturing to Circular Economy», European Environment Agency, 2021. [Em linha]. Disponível em: <http://europa.eu>
- [146] Ihobe - Environmental Management Agency, «Innovation in the Circular Economy. Materials, Processes and Products. Priority areas and preferential line of funding for the industry in the Basque Country.», 2019. [Em linha]. Disponível em: www.ingurumena.eus
- [147] H. Stakhiv, O. Solomchak, M. Stepien, e P. Lasek, «Analysis and Experimental Investigation of 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets», 2023.
- [148] M. Yang, P. Smart, M. Kumar, M. Jolly, e S. Evans, «Product-service systems business models for circular supply chains», *Production Planning and Control*, vol. 29, n. 6, pp. 498–508, Abr. 2018, doi: 10.1080/09537287.2018.1449247.
- [149] Y. Zhao, N. C. Onat, M. Kucukvar, e O. Tatari, «Carbon and energy footprints of electric delivery trucks: A hybrid multi-regional input-output life cycle assessment», *Transp Res D Transp Environ*, vol. 47, pp. 195–207, Ago. 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.05.014.
- [150] G. Zang, P. Sun, A. A. Elgowainy, A. Bafana, e M. Wang, «Performance and cost analysis of liquid fuel production from H₂ and CO₂ based on the Fischer-Tropsch process», *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 46, Abr. 2021, doi: 10.1016/j.jcou.2021.101459.
- [151] H. Tayarani e A. Ramji, «Life Cycle Assessment of Hydrogen Transportation Pathways via Pipelines and Truck Trailers: Implications as a Low Carbon Fuel», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, n. 19, Out. 2022, doi: 10.3390/su141912510.
- [152] C. Mejía-Moncayo, J. P. Kenné, e L. A. Hof, «On the development of a smart architecture for a sustainable manufacturing-remanufacturing system: A literature review approach», *Comput Ind Eng*, vol. 180, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109282.

- [153] L. C. Aguilar Esteva, A. Kasliwal, M. S. Kinzler, H. C. Kim, e G. A. Keoleian, «Circular economy framework for automobiles: Closing energy and material loops», *J Ind Ecol*, vol. 25, n. 4, pp. 877–889, Ago. 2021, doi: 10.1111/jiec.13088.
- [154] P. Leitner e T. Grandjean, «Electric Traction Motor Recycling – Modelling and Assessment of Recycling Potentials», 2020.
- [155] Y. L. Jiun, C. T. Tze, U. Moosa, e M. A. Tawawneh, «Effects of Recycling Cycle on Used Thermoplastic Polymer and Thermoplastic Elastomer Polymer», 2016.
- [156] K. Ribeiro, C. Alves, e Luis Henrique, «ECODESIGN BY POLYMERIC BIOCOMPOSITES: AGING, STRUCTURAL ANALYSIS AND RECYCLINGRECYCLING», 2019. doi: 10.29183/2447-3073.MIX2019.v5.n1.35-42.
- [157] R. Liu, Y. Zhao, X. Yang, e G. Wang, «Research on High-efficient Remanufacturing Technologies and Application of Electric Motor», em *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Set. 2017. doi: 10.1088/1757-899X/231/1/012102.
- [158] European Union, «Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources», 2018.
- [159] European Commission, «European Green Deal: EU agrees stronger legislation to accelerate the rollout of renewable energy», 2023. [Em linha]. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_2061
- [160] E. Costa e J. Seixas, «Contribution of electric cars to the mitigation of CO2 emissions in the city of São Paulo», *IEEE*, 2014.

