

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM
SISTEMAS PRODUTIVOS

KAMILA IOCE SILVA PORTO

ROADMAP PARA A DESCARBONIZAÇÃO: ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS COM O
GREEN VSM NA MANUFATURA AUTOMOTIVA

São Paulo

Abril/2025

KAMILA IOCE SILVA PORTO

ROADMAP PARA A DESCARBONIZAÇÃO: ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS COM O
GREEN VSM NA MANUFATURA AUTOMOTIVA

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre(a) em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro.

Área de Concentração: Sistemas Produtivos
Linha de Pesquisa: Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade

São Paulo

Abril/2025

P853r Porto, Kamila Ioce Silva

Roadmap para a descarbonização: estratégias sustentáveis com o Green VSM na manufatura automotiva / Kamila Ioce Silva Porto. – São Paulo: CPS, 2025.

94 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro

Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2025.

1. Gestão da inovação tecnológica. 2. Descarbonização. 3. Roadmap. 4. Modelos de inovação. 5. Processos de inovação I. Ribeiro, Rosinei Batista. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

KAMILA IOCE SILVA PORTO

ROADMAP PARA A DESCARBONIZAÇÃO: ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS COM O
GREEN VSM NA MANUFATURA AUTOMOTIVA

Documento assinado digitalmente
gov.br ROSINEI BATISTA RIBEIRO
Data: 12/05/2025 14:58:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro
Orientador – CEETEPS



Prof. Dr. Alexandre Formigoni
Examinador Interno – CEETEPS



Prof. Dr. Herlandi de Souza Andrade
Examinador Externo – EEL -USP



Prof. Dr. Isnaldi R. Souza Filho
Examinador Externo – Institut Jean Lamour, CNRS, Université de Lorraine

São Paulo, 20 de abril de 2025

Dedico este trabalho a minha avó Josefina Rodrigues, chamada carinhosamente por Vó Fina (in memoriam), que nos deixou no início desta minha jornada no mestrado, foi uma mulher guerreira, meu anjo-da-guarda, que com seu amor e seu exemplo de vida me ensinou a enfrentar desafios, sempre sendo grata. Sua força e sabedoria continuam a me inspirar todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu Deus, por me dar essa oportunidade e por me conceder sabedoria e força ao longo desta jornada, por fazer desta etapa uma oportunidade de crescimento pessoal.

Ao meu esposo, Daniel Porto, pela constante presença ao meu lado, companheirismo e paciência, sempre me incentivando e me encorajando a continuar; ao meu filho, Henry Porto, que, com apenas seus 8 anos de idade, demonstrou grande compreensão diante das minhas ausências em tantos momentos de família, especialmente nos finais de semana, essa conquista também é deles. A minha mãe, que sempre me incentivou a estudar, a buscar o conhecimento e a nunca parar de sonhar.

Aos professores do Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do CEETEPS agradeço profundamente por todo o conhecimento compartilhado, em especial, ao meu orientador, Professor Dr. Rosinei Batista Ribeiro, cuja sabedoria e empatia foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação não se limitou ao conhecimento acadêmico, mas também ao apoio humano e ao coração generoso, sempre presente nos momentos de desafio, tornando essa jornada muito mais significativa.

Aos amigos, que me incentivaram a ingressar e permanecer no programa, ofereço meu sincero agradecimento. Aos colegas de mestrado, que tornaram essa caminhada mais leve e colaborativa, agradeço pelos momentos de empatia e companheirismo vividos em sala de aula.

Agradeço à IOCHPE-MAXION S/A pela cooperação estabelecida por meio do Convênio nº 029/2024, firmado com o Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza - CEETEPS, que possibilitou uma valiosa experiência corporativa integrada às atividades acadêmicas. Este convênio foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa, contribuindo significativamente para a conexão entre o meio acadêmico e o setor produtivo. Aos colaboradores da empresa Maxion Wheels; Felipe Henrique da Silva Gomes, Andre Pereira de Souza, Erica Bonin, agradeço imensamente pela contribuição e pelos acompanhamentos nas visitas imersivas e reuniões realizadas ao longo desta pesquisa.

Gratidão a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para o enfrentamento deste grande desafio, ao qual mudou o percurso da minha vida ampliando meus horizontes desde o primeiro dia.

"O futuro pertence àqueles que acreditam na
beleza dos seus sonhos."

Eleanor Roosevelt

RESUMO

PORTO, K. I. S. **Roadmap para a Descarbonização:** Estratégias Sustentáveis com o Green VSM na Manufatura Automotiva 94 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2025.

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um *Roadmap* para a descarbonização, utilizando a análise do Mapeamento do Fluxo de Valor Verde (Green VSM). A partir dessa análise, buscou-se desenvolver o *Roadmap* como uma ferramenta estratégica para a redução de emissões de carbono ao longo da cadeia de suprimentos no setor de componentes automotivos. A pesquisa é de natureza aplicada e exploratória, com abordagem qualitativa e quantitativa, utilizando a metodologia *Design Science Research* (DSR). O objetivo geral é desenvolver um Roadmap estratégico que auxilie a redução das emissões de carbono no processo de manufatura de componentes automotivos, mediada pela metodologia da Design Science Research (DSR). Os objetivos específicos incluem: a identificação de estratégias para integrar práticas sustentáveis à cadeia produtiva automotiva e o desenvolvimento do *Roadmap* com base nos indicadores de Green VSM nos setores de pintura, laminação e soldagem. Para isso, foram realizadas visitas imersivas a uma fabricante de componentes automotivos, analisando os processos produtivos nesses setores e identificando oportunidades de mitigação das emissões de carbono. A análise das etapas críticas revelou oportunidades de mitigação por meio da adoção de energias renováveis, tecnologias de baixa emissão e práticas de economia circular. A coleta de dados envolveu fontes primárias e secundárias, possuindo limitações devido à restrição de informações. Os resultados mostram a importância do *Roadmap* como instrumento estratégico para o alinhamento entre inovação e sustentabilidade nas organizações. A pesquisa contribui ao demonstrar caminhos práticos para a mitigação de emissões nos escopos 1 e 2, e a propõe como sugestão o aprofundamento no escopo 3 como vertente relevante para futuras investigações, ampliando o escopo de atuação ambiental das empresas.

Palavras-chave: Gestão da Inovação Tecnológica, Descarbonização. *Roadmap*. Modelos de inovação. Processo de Inovação

Linha de Pesquisa: Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade

Projeto de Pesquisa: Gestão da Inovação Tecnológica

ABSTRACT

PORTO, K. I. S. **Development of a Roadmap for Decarbonization:** Application of Green VSM in the Manufacturing Process of Automotive Components 94 f.

Thesis (Professional Master's in Management and Technology in Production Systems). State Center for Technological Education Paula Souza, São Paulo, 2025.

This study aims to develop a Decarbonization Roadmap, utilizing the analysis of Green Value Stream Mapping (Green VSM). The goal is to create the Roadmap as a strategic tool for reducing carbon emissions across the supply chain in the automotive components sector. The research is applied and exploratory, employing both qualitative and quantitative approaches, with the Design Science Research (DSR) methodology. The general objective is to develop a strategic roadmap that supports the reduction of carbon emissions in the manufacturing process of automotive components, mediated by the Design Science Research (DSR) methodology. The specific objectives include: identifying strategies to integrate sustainable practices into the automotive production chain and developing the Roadmap based on Green VSM indicators in the painting, rolling, and welding sectors. Immersive visits were conducted at an automotive components manufacturer to analyze production processes in these sectors and identify opportunities for carbon emission mitigation. The analysis of critical stages revealed opportunities for mitigation through the adoption of renewable energy, low-emission technologies, and circular economy practices. Data collection involved both primary and secondary sources, with limitations due to restricted information. The results highlight the importance of the Roadmap as a strategic tool for aligning innovation and sustainability within organizations. The research contributes by presenting practical pathways for the mitigation of emissions in scopes 1 and 2, while proposing the further exploration of scope 3 as a relevant area for future investigations, broadening the environmental performance scope of companies.

Keywords: Technological Innovation Management, Decarbonization, Roadmap, Innovation Models, Innovation Process.

Research Line: Technological Innovation Management and Sustainability

Research Project: Technological Innovation

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Visão geral dos escopos e emissões do Protocolo de GEE em toda a cadeia de valor	31
Quadro 2 - Quadro comparativo: Modelos de Inovação para Redução de Carbono	40
Quadro 3 - Quadro comparativo do VSM e Green VSM.....	48
Quadro 4 Principais características comparativas do VSM e Green VSM.....	49
Quadro 5 Caracterização da empresa	54
Quadro 6 Conceito do Design Science Research.....	60
Quadro 7 Quadro de Resultados e Discussão.....	67
Quadro 8 - Setores de laminação, soldagem e pintura de rodas, etapas críticas, plano de ações para melhoria do processo de descarbonização	75
Quadro 9 - Valores estimativos das principais atividades do setor de laminação	81
Quadro 10 - Valores estimativos das principais atividades do setor de solda.....	82
Quadro 11 Valores estimativos das principais atividades do setor de pintura	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Diferenças entre Ciências Tradicionais e o Design Science	61
Tabela 2 - Estruturação do método Design Science Research aplicado a pesquisa para a elaboração do Framework	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução dos níveis de prontidão tecnológica para tecnologias de energia limpa selecionadas.....	21
Figura 2 - Percentual de Empresas com práticas ambientais por tema material e faixa de pessoal ocupado - Brasil 2023 (%).....	22
Figura 3 - Participação da Mitigação e Adaptação Relacionadas ao Clima (CCMA)	25
Figura 4 - Nível de emissões de carbono por setor.....	26
Figura 5 - histórico das emissões de CO ₂ distribuídas por setores-chave da economia, incluindo Energia, Mudança no Uso da Terra e Florestas, Processos Industriais, Agricultura e Resíduos	28
Figura 6 - Análise das emissões de gases de efeito estufa, nos setores de energia, agropecuária, resíduos, processos industriais e mudança de uso da terra e floresta- Brasil	28
Figura 7 - Emissões consolidadas do Programa Brasileiro GHR Protocol – Escopo 1 e 2.....	29
Figura 8 - Visão geral dos escopos e emissões do Protocolo de GEE em toda a cadeia de valor	30
Figura 9 - Emissões líquidas acumuladas de CO ₂ por região e emissões líquidas de GEE per capita e para a população total.....	33
Figura 10 - Taxa de mudanças nas emissões anuais de GEE	34
Figura 11 - Cronologia dos principais eventos relacionados às mudanças climáticas	35
Figura 12 - Principais marcos legais na legislação brasileira sobre as mudanças climáticas...	36
Figura 13 - Exemplo de um Value Stream Mapping (VSM) representando o estado atual da empresa de manufatura.....	42
Figura 14 - Exemplo de um Value Stream Mapping (VSM) representando o estado futuro da empresa de manufatura.....	42
Figura 15 - Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) das Quatro Bateladas do Produto Antiespumante	42
Figura 16 - Simbologia utilizada na elaboração do Value Stream Mapping (VSM)	44
Figura 17 - Elementos do Roadmap: Diretrizes do processo, oportunidades e ameaça, recursos humanos e físicos, informações e resultados.....	50
Figura 18 - Fases e atividades de implantação de um Roadmap	52
Figura 19 – Localização da Empresa.....	54
Figura 20 - Roadmap da Empresa - Visão Estratégica do Roadmap de Descarbonização: Iniciativas e Metas Empresariais	55
Figura 21 - Linha de Produção: Pintura de rodas	56
Figura 22 - Linha de Produção: Processo de Soldagem Solda	56
Figura 23 - Classificação da Pesquisa	59
Figura 24 - Etapas do Processo Design Science Research (DSR).....	62
Figura 25 - Sistemática da Design Science Research (DSR)	63
Figura 26 - Estrutura da Pesquisa mediada pelo DSR com a definição dos objetivos geral e específicos mediados pela construção do ROADMAP, Processo de Descarbonização e o Green VSM de componentes automotivos.....	65
Figura 27 -Iteração do Processo DSR aplicado ao percurso da pesquisa e a proposta do Framework como Produto e Processos Tecnológicos – PPT's	66
Figura 28 - Etapa metodológica do desenvolvimento do Processos e Produtos Tecnológicos PPT , adaptado a componentes automotivos	68
Figura 29 - Desenvolvimento do Roadmap para a criação do framework em ambientes produtivos de rodas.....	71

Figura 30 -Exemplos de Projetos de Redução de Carbono no Escopo 1 Desenvolvidos pela Empresa X em Plantas Globais	74
Figura 31 -Exemplos de Projetos de Redução de Carbono no Escopo 2 Desenvolvidos pela Empresa X em Plantas Globais	74
Figura 32 - Estimativa de consumo de energia por setor e desvio padrão	76
Figura 33 -Consumo de energia elétrica x toneladas de aço – 1º semestre de 2024 – Empresa X	76
Figura 34 – Detalhamento do Processo de Produção de Rodas	77
Figura 35 - Processo de Produção de Rodas – Identificação dos 03 setores para atuação	78
Figura 36 - Tratamento Superficial e Pintura	79
Figura 37 - Área de Montagem e Solda.....	79
Figura 38 - Laminação dos Aros	80
Figura 39 – Green VSM - Mapeamento de Fluxo de Valor / Laminação	82
Figura 40 - Green VSM - Mapeamento de Fluxo esquemático / Solda	83
Figura 41 - Green VSM - Mapeamento de Fluxo esquemático / Pintura	84

LISTA DE SIGLAS

CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
DSR	Design Science Research
GAG	Governança Ambiental Global
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Greenhouse Gas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IFIs	Instituições Financeiras Internacionais (),
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISTs	Tecnologias de Inovação Sustentável ()
N ₂ O	Óxido Nitroso
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
VSM	Value Stream Mapping
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
Questão de Pesquisa	18
Objetivo Geral	18
Objetivos Específicos.....	19
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
1.1 Gestão da inovação tecnológica e sustentabilidade	20
1.1.1 Processo de Descarbonização	23
1.1.2 Panorama das Mudanças Climáticas	32
1.1.3 Modelos de inovação para redução de carbono	36
1.1.3.1 Análise Comparativa e Implicações	39
1.2 Mapeamento de Fluxo de Valor (VSM) e Mapeamento de Fluxo de Valor Verde (Green VSM).....	40
1.2.1 Mapeamento de Fluxo de Valor (VSM).....	41
1.2.2 Mapeamento de Fluxo de Valor Verde (Green VSM)	44
1.2.3 Aspectos comparativos entre VSM e Green VSM	47
1.3 Roadmap: Planejamento estratégico e inovação (Mapa da estrada)	49
2 METODOLOGIA.....	53
2.1 Caracterização da empresa.....	53
2.2 Classificação da Pesquisa.....	57
2.3 Iteração do Processo de produção de componentes automotivos mediado pelo DSR	62
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.1 Planejamento, Programação e Controle dos procedimentos para análise e discussão dos resultados.....	65
3.1.1 Planejamento na construção do Roadmap de componentes automotivos mediado pelo DSR.....	66
3.1.2 Mapeamento do processo de fabricação de rodas	77
3.1.3 Green VSM – Mapeamento de Fluxo de Valor nos processos de Pintura, Soldagem e Laminação	80
3.2 Análise Crítica da Pesquisa: Desafios, Contribuições e Perspectivas Futuras	85
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87

INTRODUÇÃO

As mudanças recentes no sistema climático global são de uma escala sem precedentes, ocorrendo em um período que vai de século a milhares de anos, tais mudanças ganharam relevância na diplomacia internacional e, por consequência, nas discussões da Governança Ambiental Global (GAG), durante a primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo, em 1972 (ANDRADE, 2009).

Após duas décadas de debates, a Eco-92 marcou o início das ações globais voltadas ao combate às mudanças climáticas. Nesse evento, foi estabelecida a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), com o objetivo principal de estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, em que a convenção visa prevenir que essas substâncias causem impactos negativos no sistema climático global (ONU, 2024).

As mudanças climáticas induzidas pelo ser humano são o resultado de mais de um século das emissões líquidas de GEE, associados ao uso de energia, à ocupação e alteração do uso do solo, ao estilo de vida, e aos padrões de consumo e produção. Desde 2010, as emissões líquidas de GEE aumentaram em todos os principais setores (IPCC, 2024).

Exposto isso, os impactos cada vez mais intensos, representam uma ameaça significativa à biodiversidade e aos meios de subsistência de bilhões de pessoas que dependem de ecossistemas saudáveis. A contínua degradação da natureza não só aumenta a vulnerabilidade climática, como também contribui para emissões substanciais de gases de efeito estufa, prejudicando o desenvolvimento sustentável.

A promoção de práticas sustentáveis, como a gestão da terra, a resiliência à seca e a proteção dos oceanos, oferece benefícios interligados que fortalecem a ação climática, a conservação da biodiversidade e o desenvolvimento sustentável. Abordagens integradas e sinérgicas na luta contra as mudanças climáticas, a perda de biodiversidade e a degradação dos ecossistemas são essenciais para aumentar a resiliência global e garantir a sustentabilidade dos meios de subsistências (COP28, Declaração conjunta, 2023).

Apesar das previsões científicas de que as emissões de CO₂ devem ser reduzidas em 43% até 2030, em comparação com os níveis de 2010, os planos atuais de mitigação das mudanças climáticas apontam para um aumento de 10,6% nas emissões (PNUMA, 2022).

A mudança para redução de carbono, principal causador do efeito estufa, tem sido discutida profusamente por diversas organizações dos setores de serviços e de manufatura. Lu et al., (2019).

O cálculo de emissões é um processo que envolve diversas etapas. Para se obter um inventário preciso e eficaz, é fundamental prestar atenção a aspectos como controle de qualidade e a coleta de dados de atividade necessários. Somente após essa fase é possível estimar as emissões de forma adequada. As ferramentas do GHG Protocol auxiliam empresas e cidades na criação de inventários completos e confiáveis de suas emissões de gases de efeito estufa (GEE), além de ajudar na avaliação do progresso de países e cidades rumo às suas metas climáticas. GHG PROTOCOL (2024).

A descarbonização do setor industrial é um desafio complexo, que exige a adoção de tecnologias ainda em fase de desenvolvimento ou que possuem custos elevados. Espera-se que atividades com menores emissões de gases de efeito estufa (GEE) se expandam, enquanto outras, que não consigam adotar inovações tecnológicas de baixo carbono, tendem a diminuir ou até desaparecer. Setores altamente dependentes de combustíveis fósseis, como o da produção de aço, são os mais vulneráveis a essas mudanças disruptivas (SEMIENIUK et al., 2020).

No contexto industrial, a redução de carbono não é apenas uma necessidade ambiental, mas também uma oportunidade de inovação e competitividade, para Cavalcante (2019), a inovação é o fruto de uma ideação.

Para Pascalicchio (2011), a empresa que opera de forma mais estratégica quanto aos seus recursos, capacidades e riscos, torna-se melhor e mais competitiva diante do mercado e aprimora as perspectivas de rentabilidade no ambiente empresarial. Segundo Cavalcante (2019), gerar resultados e ações efetivas, refere-se a um processo progressivo de desenvolvimento, portanto, cada empresa adota um modelo de inovação e ferramentas variadas, de forma a auxiliar a promover e aperfeiçoar os processos produtivos. PASCALICCHIO, A.C. (2011) .

A inovação retrata um processo de crescimento estratégico no setor industrial e caracteriza um papel importante na mitigação de emissões de GEE, este trabalho visa contribuir para o campo da inovação aplicando a utilização do *Roadmap* como uma ferramenta, mapeando os setores que necessitam atuar na redução de carbono e fomentar novas estratégias que colaborem para o net zero, contribuindo para um futuro mais sustentável, pois para Lu, Chen e Yu (2019) dentro do campo de inovação, o *Roadmap* é considerado uma estratégia de planejamento e gerenciamento dos processos dos diferentes setores constituintes na organização de forma a integrar informações e estratégias adotadas.

Deste modo a pesquisa busca abordar a problemática relacionado à redução das emissões de carbono no setor produtivo com base na indústria automotiva, cujos processos de manufatura e cadeia de suprimentos são emissores de gases de efeito estufa. A motivação deste estudo reside na crescente pressão global discutidas na (ONU, 2023), por soluções inovadoras que promovam a sustentabilidade e a necessidade de adoção de estratégias eficazes para minimizar o impacto ambiental em setores produtivos de alta relevância econômica.

A Agência Internacional de Energia, (IEA, 2020), define que o consumo global de aço está concentrado principalmente nos setores de edificações (33%), infraestrutura (22%), máquinas e equipamentos (17%), veículos (15%) e bens de consumo (13%). A cadeia produtiva que atende a essa demanda – abrangendo etapas como mineração, refinamento, fabricação de ligas, laminação, manufatura, uso e descarte – permanece amplamente linear. Esse processo requer significativos recursos naturais, apresenta elevado consumo energético, é logisticamente intensivo e resulta em emissões consideráveis de dióxido de carbono (CO₂), gerando impactos ambientais relevantes. Apesar dessas questões, o aço tem se mostrado um material com grande potencial para a transição para uma economia circular (LOPEZ; FARFAN; BREYER, 2022).

A necessidade de inovação tecnológica no setor é evidente, sendo apontada por diversos autores como fundamental para a sustentabilidade. Segundo Van Soest, Den Elzen e Van Vuuren (2021), Souza e Pacca (2021), Fan e Friedman (2021) e Flores-Granobles e Sayes (2020), o aumento da eficiência no uso de recursos e a adoção de tecnologias inovadoras são estratégias centrais para tornar a metalurgia mais sustentável. Lei et al. (2023) corroboram essa perspectiva, enfatizando que tais avanços tecnológicos são essenciais para mitigar os impactos ambientais desse setor.

Entretanto, Souza e Pacca (2021) destacam que a implementação prática de iniciativas ambientais sustentáveis enfrenta barreiras significativas, refletindo os desafios de alinhar discurso e prática na indústria. O Acordo de Paris, firmado com o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C e atingir a neutralidade climática até 2050, exige uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esse compromisso é crucial para o cumprimento das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) (CARVALHO, 2022).

Carvalho (2022) ainda afirma que as metas do Acordo de Paris requerem estratégias integradas que vinculem os setores produtivos à mitigação de emissões, levando em conta a viabilidade econômica e os impactos sociais.

Assim, justifica-se o desenvolvimento de um *Roadmap* estratégico, baseado na metodologia do Mapeamento do Fluxo de Valor (Green VSM), (MARIN-GARCIA; VIDAL-CARRERAS; GARCIA-SABATER, 2021), é utilizada como uma ferramenta que visa compreender o fluxo de um processo e identificar pontos críticos a fim de avaliar e criar um diagnóstico que permite identificar por exemplo emissões de carbono e implementar melhorias inovadoras ao longo da cadeia de suprimentos.

Destaca-se, a metodologia *Design Science Research* (DSR) DRESH (2013) para a criação desse artefato, a pesquisa se alinha ao avanço do conhecimento na área de gestão da inovação tecnológica e sustentabilidade, promovendo um impacto direto nas práticas empresariais relacionadas à descarbonização.

A pesquisa está alinhada com a linha de pesquisa "Gestão da Inovação Tecnológica e Sustentabilidade" do Programa de Pós-Graduação, ao explorar o uso do *Roadmap* como uma ferramenta de inovação voltada à redução das emissões de CO₂ em processos produtivos.

A proposta contribui tanto para o avanço teórico quanto para o prático da inovação sustentável, integrando-se de maneira sólida às disciplinas do mestrado. Na disciplina de "Tópicos Especiais de Inovação Tecnológica", a pesquisa se debruça sobre a aplicação do *Roadmap* como estratégia para descarbonização.

Em "Métodos Quantitativos Aplicados", faz uso de ferramentas metodológicas para a análise dos dados. A disciplina de "Gestão da Inovação Tecnológica" é contemplada pela ênfase na inovação para a otimização de processos produtivos e redução de emissões, enquanto "Gestão Ambiental em Sistemas Produtivos" aborda a mitigação de impactos ambientais na manufatura. Assim, o estudo evidencia uma aderência significativa ao programa, ao integrar teoria e prática com vistas à promoção da sustentabilidade.

A partir dessa base, a pesquisa busca responder à seguinte questão de investigação:

Questão de Pesquisa

Qual o papel dos modelos de inovação e *Roadmaps* adotados pelas empresas do setor automotivo quanto a redução de carbono?

Objetivo Geral

Desenvolver um *Roadmap* estratégico que auxilie a redução das emissões de carbono no processo de manufatura de componentes automotivos, mediada pela metodologia da *Design Science Research* (DSR).

Objetivos Específicos

- Identificar estratégias que integrem práticas sustentáveis à cadeia produtiva de componentes automotivos, contribuindo para a redução de emissões de carbono;
- Desenvolver o Roadmap a partir dos indicadores de Green VSM dos setores de pintura, laminação e soldagem.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

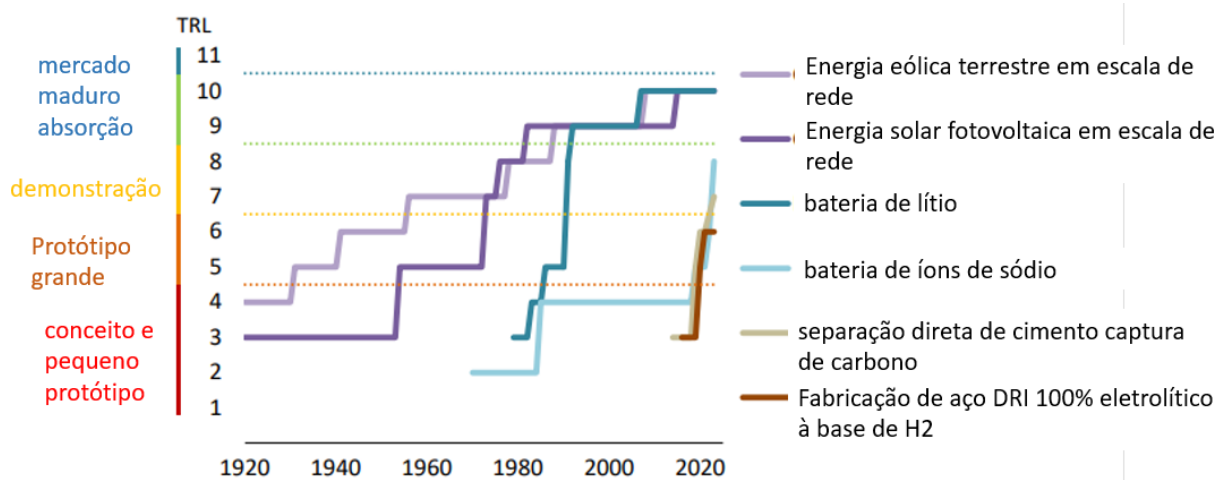
A fundamentação teórica deste trabalho explora os conceitos centrais que sustentam a pesquisa, iniciando gestão da inovação tecnológica e sustentabilidade, após isso são discutidos os impactos das mudanças climáticas e a relevância da descarbonização no setor industrial. Em seguida, destaca-se a importância do Mapeamento do Fluxo de Valor Verde (Green VSM) como ferramenta para identificar emissões e otimizar processos produtivos. Por fim, o estudo aborda o uso de *Roadmaps* como estratégia de planejamento para redução de carbono, integrando metodologias inovadoras, como o *Design Science Research* (DSR), para promover soluções práticas e sustentáveis.

A problemática da descarbonização no setor automotivo é de extrema relevância diante das crescentes exigências globais por práticas sustentáveis e redução de emissões de GEE, conforme estabelecido no Acordo de Paris. O setor também é responsável por uma parcela das emissões globais (UKON; SANCHEZ; RAMOS, 2023), o que demanda soluções inovadoras. Este estudo aborda essa necessidade ao propor um *Roadmap* estratégico, fundamentado em metodologias consagradas, para orientar ações de mitigação de emissões em processos produtivos de alta complexidade. Além de responder a uma lacuna prática na gestão da sustentabilidade, a pesquisa contribui para o avanço teórico no campo da inovação tecnológica, oferecendo uma abordagem replicável em diferentes contextos industriais. Como destacado por (SEMIENIUK et al., 2021a) a transição para tecnologias de baixo carbono não apenas importante para atender às metas climáticas, mas também para competitividade e a resiliência do setor industrial.

1.1 Gestão da inovação tecnológica e sustentabilidade

A inovação desempenha um papel essencial para alcançar emissões líquidas zero, especialmente em setores como a indústria pesada e o transporte de longa distância, em que redução de emissões é mais desafiadora devido à falta de tecnologias ou processos de baixa emissão amplamente disponíveis. Nos últimos anos, avanços significativos têm sido feitos para superar essas lacunas críticas de inovação, resultando em melhorias no nível de prontidão tecnológica de algumas soluções de energia limpa Figura 01.

Figura 1 - Evolução dos níveis de prontidão tecnológica para tecnologias de energia limpa selecionadas



Fonte: International Energy Agency -IEA (2023)

A inovação constitui um dos pilares centrais para impulsionar o crescimento econômico das nações, sendo um elemento chave para a criação de vantagens competitivas em ambientes de alta turbulência. A capacidade de inovar está diretamente associada à competitividade de indivíduos, empresas, regiões ou países, refletindo sua habilidade de se adaptar e prosperar em um cenário econômico dinâmico (Neely; Hill, 1998; IBGE, 2023).

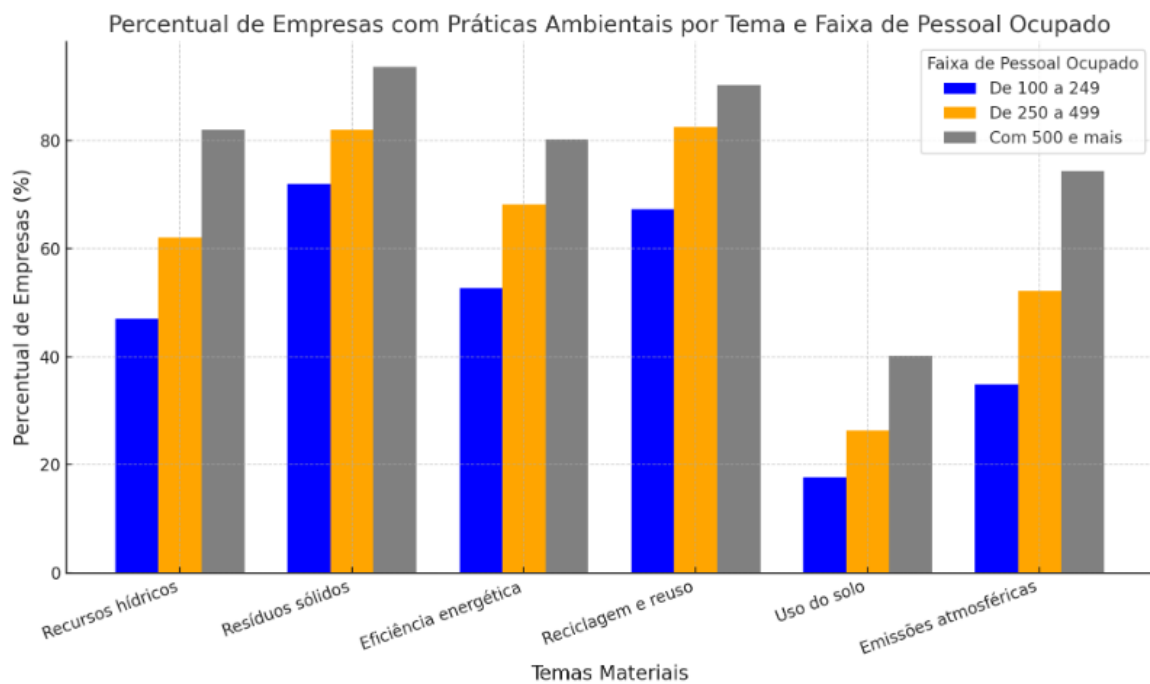
A implementação de práticas ambientais nas empresas atua de forma relevante, pois é necessário criar estratégias que gerenciem a interação entre as organizações e o meio ambiente. O ambiente natural, sendo um fator externo, exerce influência significativa nas decisões relacionadas à inovação (IBGE, 2023).

Nas organizações industriais, a preocupação ambiental emergiu como um motor para o desenvolvimento de práticas inovadoras. Essas práticas são essenciais não apenas para conquistar vantagens competitivas, mas também para satisfazer as expectativas das partes interessadas. Para abordar as questões relacionadas a essas práticas ambientais, é importante identificar os chamados temas materiais IBGE (2023), estes temas materiais referem-se aos impactos mais relevantes que uma organização pode ter na economia, no meio ambiente e na sociedade, incluindo aspectos relacionados aos direitos humanos. De acordo com a *Global Reporting Initiative* (GRI, 2021), Iniciativa Global de Relatórios (tradução nossa), essa definição deve ser vista tanto pela ótica da organização quanto pela de seus stakeholders. A norma AA1000 (2018) também esclarece que um tema material é aquele que pode afetar as decisões das partes interessadas em relação à organização ou influenciar a capacidade da

própria organização de atingir seus objetivos. Assim, a compreensão dos temas materiais ambientais é fundamental para uma gestão ambiental inovadora IBGE (2023).

Focando nessas questões, as organizações podem não apenas mitigar seus impactos negativos, mas também impulsionar a inovação e promover práticas sustentáveis, alinhando-se às demandas de seus stakeholders e contribuindo para um futuro mais sustentável. A Figura 2 apresentada ilustra que, em 2023, empresas de maior porte são mais propensas a implementar iniciativas ambientais, refletindo a relação entre a capacidade de inovação e a adoção de práticas sustentáveis IBGE (2023).

Figura 2 - Percentual de Empresas com práticas ambientais por tema material e faixa de pessoal ocupado - Brasil 2023 (%)



Fonte: Adaptado, IBGE, Diretoria de Pesquisas, coordenação e estatística estruturais e temáticas em empresas, Pesquisa de Inovação Semestral 2023.

A tecnologia tem sido um motor essencial da inovação ao longo da história, com avanços em áreas como TI, biotecnologia e nanotecnologia acelerando ainda mais esse processo no século XXI. Isso traz desafios para indivíduos, sociedade e organizações, em que gestores precisam tomar decisões difíceis sobre a alocação de recursos limitados, enfrentando custos, complexidade e riscos crescentes em um cenário de competição global PHAAL, R et. al (2004).

Inovações tecnológicas de economia de custos, possivelmente incentivadas por políticas climáticas anteriores, reduzem ainda mais os preços das tecnologias de baixo carbono (BASTY; GHACHEM, 2023 NEMET, 2019; KAVLAK; McNERNEY; TRANCIK, 2018).

A tecnologia tem sido um motor para impulsionar a inovação ao longo da evolução da sociedade humana. Com os progressos em áreas como tecnologia da informação e comunicação, o andamento da inovação e das mudanças tende a se acelerar ainda mais no século XXI, para isso Phaal (2020) diz que planejamento da inovação envolve princípios fundamentais, além de tendências e aplicações do mapeamento nesse contexto, sendo assim, a tendência mais recente no planejamento da inovação é desconstruir a complexidade das inovações tecnológicas e padronizar o planejamento de inovação C. KERR, R. PHAAL (2020).

Os níveis atuais de inovação não são suficientes para enfrentar os desafios associados à meta de emissões líquidas zero. Ciência, tecnologia e inovação desempenham um papel central na mitigação das mudanças climáticas no setor industrial. Embora a adoção mais eficiente de tecnologias já existentes seja necessária para a descarbonização industrial em diferentes setores e regiões, o avanço das fronteiras tecnológicas é essencial para viabilizar as estratégias de longo prazo previstas para 2050, conforme estabelecido no Acordo de Paris (OCDE, 2022).

1.1.1 Processo de Descarbonização

No evento climático global de 2021 em Glasgow, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destacou a necessidade urgente de a economia mundial alcançar a neutralidade de carbono até 2050, com o objetivo de limitar o aquecimento global a 1,5°C. Esse compromisso representaria um passo decisivo no enfrentamento das mudanças climáticas, demonstrando um esforço concreto para reduzir as emissões de carbono e traçando um caminho claro para um futuro mais sustentável e com emissões líquidas nulas (LEVIN et al., 2020).

A descarbonização industrial é fundamental para alcançar as metas do Acordo de Paris, mas enfrenta desafios significativos. A transição para emissões líquidas zero exige ampla adoção de tecnologias de baixo carbono e investimentos substanciais. No entanto, muitas dessas tecnologias estão em estágios iniciais de desenvolvimento ou comercialização e são intensivas em capital. Além disso, a falta de políticas consistentes e regimes regulatórios unificados pode dificultar o progresso. O estabelecimento de padrões comuns, como para aço de baixa emissão, pode ajudar a superar essas barreiras e atrair os investimentos necessários para a expansão dessas tecnologias (OECD, 2023).

No final do século XVIII e início do século XIX, iniciou-se a Revolução Industrial, marcada pela introdução das máquinas a vapor alimentadas a carvão. Esse avanço tecnológico

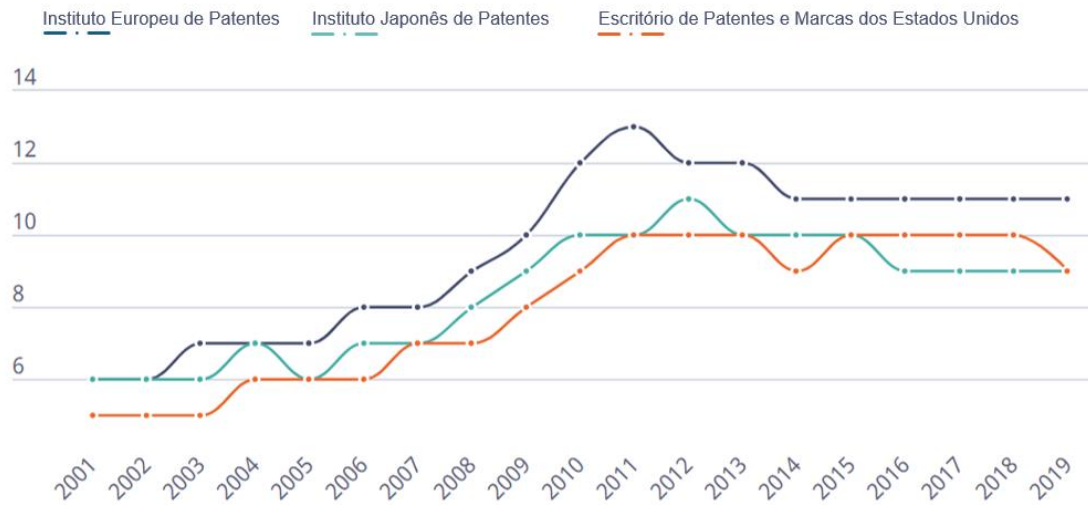
provocou uma transformação radical nos setores de produção têxtil e transporte, simbolizada pelo surgimento das locomotivas e das ferrovias. Na segunda metade do século XIX, a segunda Revolução Industrial consolidou a ascensão das indústrias do aço, da eletricidade e do petróleo, ampliando ainda mais as bases da economia industrial e alterando profundamente a estrutura produtiva e social da época (BATISTA, 2020).

A partir desse ponto, a exploração de combustíveis fósseis aumentou significativamente (ZHAO et al., 2023a), impulsionada principalmente pelo avanço da indústria automobilística e pela crescente demanda por eletricidade. Consequentemente, intensificou-se a extração de recursos como carvão e gás natural, os quais são responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4). Esses gases desempenham um papel crucial no efeito estufa, um fenômeno natural indispensável à manutenção da vida na Terra. Nesse processo, a radiação infravermelha proveniente do sol excita as moléculas desses gases, resultando em vibrações que permitem a absorção de calor, que é posteriormente reemitido de volta à superfície terrestre na mesma faixa de comprimento de onda (FARMER et al., 2013).

Desta forma a descarbonização desempenha um papel na busca pela realização das metas de emissões líquidas zero, especialmente considerando que, em 2022, as indústrias de manufatura foram responsáveis por aproximadamente 40% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2), totalizando cerca de 16 gigatoneladas (Gt) por ano. A implementação de caminhos eficazes para a descarbonização demanda ações rápidas e audaciosas, tanto por parte das indústrias quanto dos governos. Nesse contexto, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) atua de forma relevante ao fornecer análises baseadas em dados concretos, além de recomendações de políticas que orientam governos e setores industriais na transição para uma economia de baixo carbono. Essas ações conjuntas são importantes para mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável global OCDE (2022).

A busca pela neutralidade de carbono é um dos maiores desafios no caminho para o desenvolvimento econômico sustentável. Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU), estabeleceu uma ambiciosa agenda com suas metas de desenvolvimento sustentável, visando enfrentar essa questão ambiental e econômica. Com o passar dos anos, especialistas e organizações têm ressaltado a urgência de intensificar os esforços para combater as mudanças climáticas, que são principalmente causadas pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono CO_2 ONU, (2020).

Figura 3 - Participação da Mitigação e Adaptação Relacionadas ao Clima (CCMA)



Fonte: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2023)

Em 2020, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) relatou que as emissões globais de gases de efeito estufa alcançaram 59,1 gigatoneladas (Gt) em todo o mundo, de acordo com o relatório da lacuna de emissões globais de 2020. PNUMA, (2019). Embora o ciclo natural de equilíbrio do carbono existisse historicamente, as atividades humanas recentes têm gerado emissões adicionais que superam a capacidade natural de absorção.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destacou a importância de alcançar a neutralidade de carbono até 2050, durante o evento climático global de 2021 em Glasgow, para limitar o aquecimento global a 1,5°C. Atingir esse objetivo demonstraria um compromisso sério da economia global em enfrentar o aquecimento global, avançando em direção a um mundo com zero emissões líquidas de carbono LEVIN et al., (2020). Para alcançar essa meta, é necessário equilibrar as emissões liberadas na atmosfera com políticas ou programas de compensação de carbono.

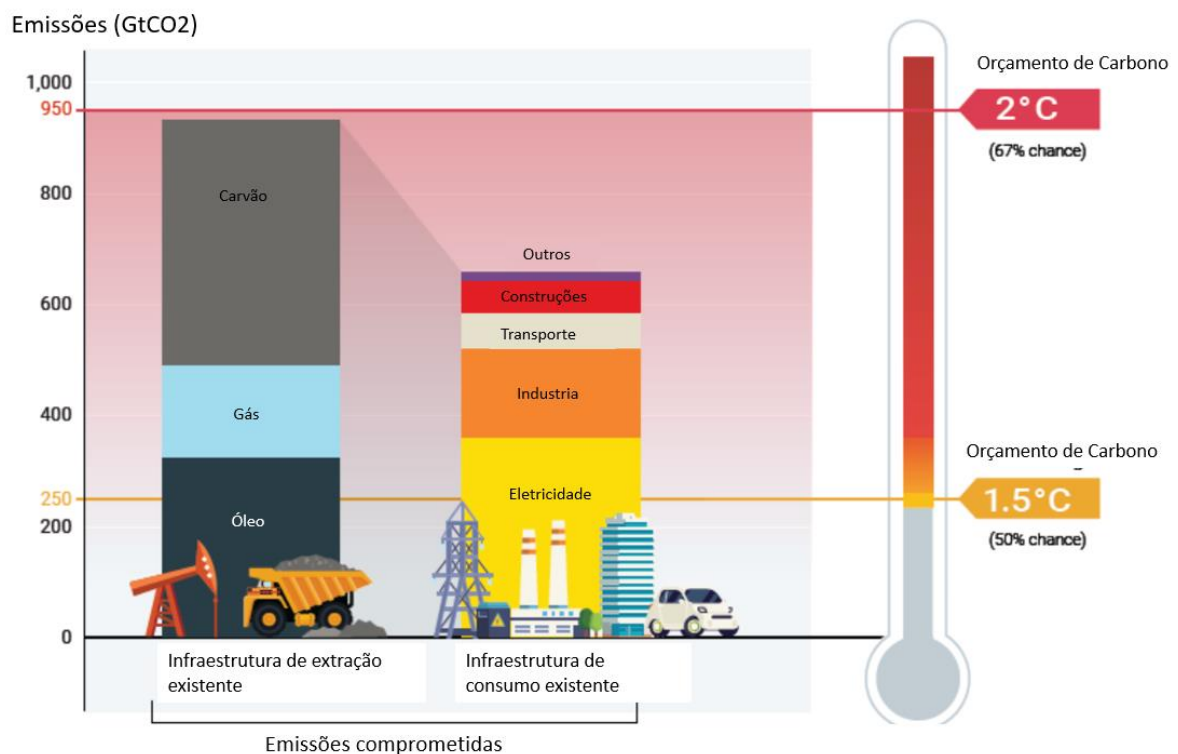
Em fevereiro de 2022, um relatório das Nações Unidas indicou que o número de países que se comprometeram com a neutralidade de carbono até 2050 havia aumentado para 198. L. CHEN et al., (2022). Entre as medidas urgentes para evitar consequências desastrosas e irreversíveis, está a necessidade de aumentar o plantio de árvores e proteger os ecossistemas terrestres e marinhos, essenciais para a remoção de carbono da atmosfera.

A política de internalização da externalidade do carbono é um fator-chave de risco, sendo central em estratégias de mitigação climática por meio de regulamentações que

precificam o carbono via impostos ou esquemas de comércio de emissões. O IPCC (2018) projeta um preço médio global do carbono de US\$ 91/tCO₂ para 2025 e US\$ 179/tCO₂ para 2030, com intervalos chegando a US\$ 361/tCO₂ (HUPPMANN et al., 2018). Em 2019, apenas 20% das emissões globais de gases de efeito estufa eram precificadas, e menos de 5% atendiam aos níveis do Acordo de Paris (Banco Mundial, 2019). Políticas eficazes podem aumentar os preços de produtos de alto carbono, e a regulamentação pode restringir diretamente sua venda. Dez países já estipularam datas para proibir novos carros a combustão, alguns a partir de 2030 (MECKLING & NAHM, 2019).

Segundo (SEMIENIUK et al., 2021b), as indústrias que mais contribuem para a emissão de gases de efeito estufa, como as siderúrgicas, enfrentarão a necessidade de realizar transformações significativas em suas tecnologias e adotar novos processos industriais. Caso não o façam, correm o risco de perder competitividade e entrar em declínio. Para evitar isso, o setor industrial precisa desenvolver estratégias que sejam proativas, criando ou ajustando produtos, com o objetivo de implementar processos disruptivos e permanentes, a fim de reduzir efetivamente as emissões de GEE associadas a seus produtos (BACKMAN; VERBEKE; SCHULZ, 2017).

Figura 4 - Nível de emissões de carbono por setor



Fonte: International Energy Agency -IEA (2023)

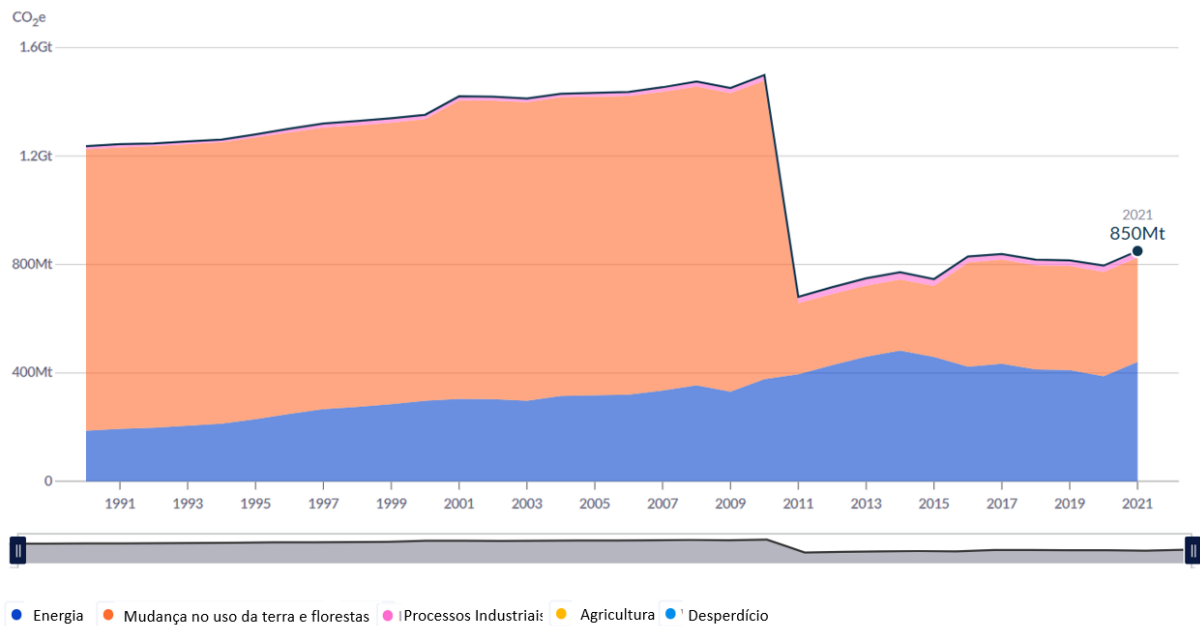
A Figura 04 apresenta os níveis de emissões de carbono por setor, incluindo as emissões já comprometidas pela infraestrutura de combustíveis fósseis em operação, e os compara com a meta de temperatura de longo prazo estabelecida pelo Acordo de Paris. Contudo, as incertezas e complexidades das múltiplas dimensões sociais relacionadas à descarbonização podem ser vistas como uma paisagem de estabilidade mais complexa, repleta de diversos estados de atração e barreiras que precisam ser superadas J. D. TÀBARA, C. PAHL-WOSTL (2007).

A Pesquisa de Inovação Semestral de 2023, realizada pelo IBGE, revelou que 46,3% (4.555) das 9.827 empresas industriais com 100 ou mais pessoas ocupadas possuíam alguma iniciativa/prática ambiental relacionada às práticas de redução nas emissões atmosféricas associados aos seus processos de produção. As ações implementadas por essas empresas estavam majoritariamente voltadas para o controle e monitoramento das emissões, bem como para a realização de inventário de emissões e a manutenção e melhoria dos equipamentos (IBGE, 2023).

Com base nos dados disponibilizados pela plataforma (CLIMATE WATCH, 2025), a Figura 05 apresenta uma análise detalhada da evolução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil ao longo de três décadas, no período de 1991 a 2021. O gráfico expõe o histórico das emissões de CO₂ distribuídas por setores-chave da economia, incluindo Energia, Mudança no Uso da Terra e Florestas, Processos Industriais, Agricultura e Resíduos. Essa representação permite compreender os padrões de emissão e identificar os principais setores responsáveis pelas variações nas emissões ao longo do tempo, fornecendo subsídios para análises sobre o impacto ambiental do país.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a redução das emissões de gases de efeito estufa em todos os setores é essencial para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, conforme previsto no Acordo de Paris. O relatório mais recente do IPCC destaca que estratégias integradas, que envolvam desde a transição energética até práticas sustentáveis no uso da terra, são cruciais para alcançar metas de neutralidade de carbono nas próximas décadas (IPCC, 2023).

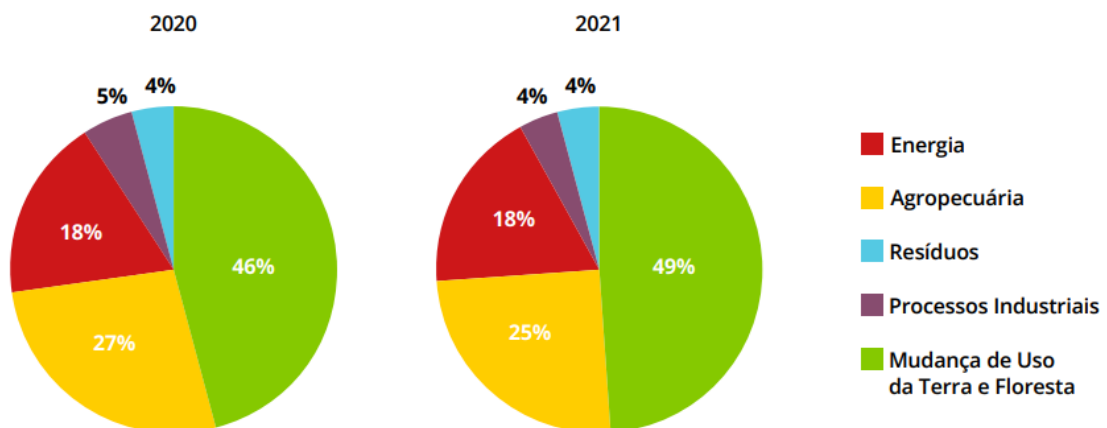
Figura 5 - histórico das emissões de CO₂ distribuídas por setores-chave da economia, incluindo Energia, Mudança no Uso da Terra e Florestas, Processos Industriais, Agricultura e Resíduos



Fonte: Climate Watch (2025)

Já o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), apresenta em seu gráfico os seguintes dados sobre as emissões de gases no Brasil, Figura 06.

Figura 6 - Análise das emissões de gases de efeito estufa, nos setores de energia, agropecuária, resíduos, processos industriais e mudança de uso da terra e floresta- Brasil



Fonte: IEMA, 2023

Recentemente, as mudanças no uso da terra foram responsáveis pela maior parte das emissões brutas no Brasil, totalizando 49% em 2021, em comparação com 46% em 2020.

Quando se somam as emissões decorrentes do desmatamento e outras alterações no uso da terra às do setor agropecuário, constata-se que as atividades agropecuárias, de maneira ampla, correspondem quem a 74% de todas as emissões de gases de efeito estufa no país. De acordo com um estudo recente, entre 90% e 99% do desmatamento tropical é impulsionado pela agropecuária (IEMA, 2023).

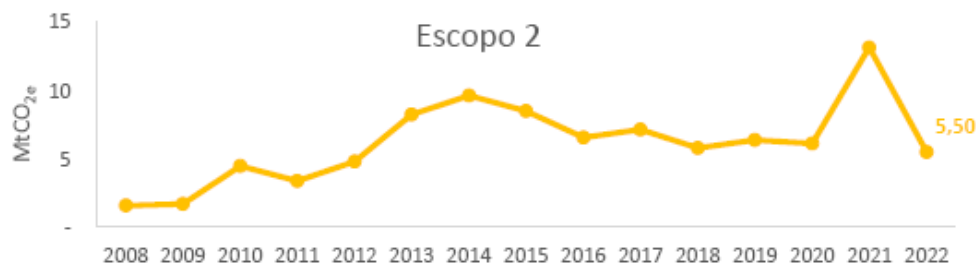
Após estabelecer os limites organizacionais, a empresa identifica seus limites operacionais, que dizem respeito às fontes de emissões geradas por suas atividades. De acordo com o GHG Protocol Initiative (2025) essas emissões são categorizadas como Escopo 1, emissões diretas de GEE que ocorrem de fontes que são de propriedade ou controladas pela empresa. Isso inclui, por exemplo, as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis nas instalações da empresa, como em caldeiras, veículos e outros processos industriais, Escopo 2 ao que se refere às emissões indiretas resultantes da compra de eletricidade, calor ou vapor. Ou seja, são as emissões geradas pela produção de energia consumida pela empresa, mas que ocorrem fora das instalações da empresa, geralmente nas usinas de energia, e Escopo 3, vinculadas as emissões indiretas de gases de efeito estufa (GEE) que ocorrem nas cadeias de valor de uma empresa, mas não são controladas ou de responsabilidade direta dela (SOUSA et al., 2024). Ou seja, as emissões de Escopo 1 e 2 referem-se, respectivamente, a emissões diretas, sob controle da empresa, e emissões indiretas, resultantes do consumo de eletricidade ou serviços terceirizados. Essas emissões podem ocorrer fora das fronteiras operacionais da empresa, mas ainda assim são influenciadas por suas atividades, dependendo do grau de controle que a empresa possui sobre elas e da sua capacidade de gerenciá-las (GHG PROTOCOL 2025). As emissões diretas são aquelas sob o controle direto da organização, enquanto as emissões indiretas resultam de ações de terceiros, dentro da cadeia de valor, como serviços terceirizados, conforme ilustrado na Figura 07.

Figura 7 - Emissões consolidadas do Programa Brasileiro GHR Protocol – Escopo 1 e 2

(a) Escopo 1 – emissões diretas



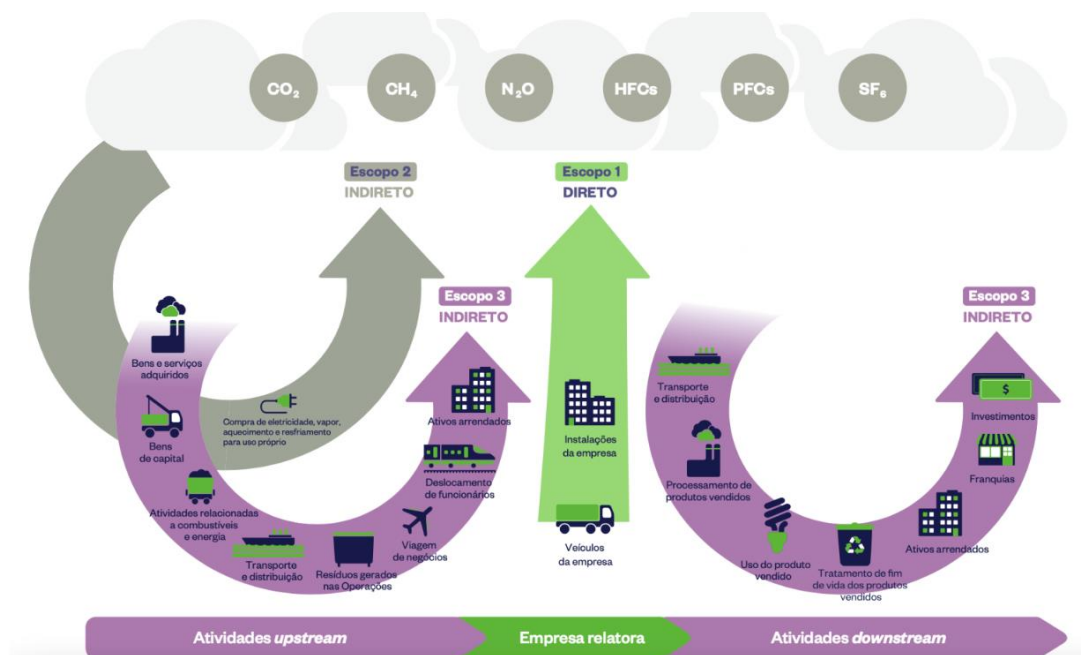
(b) Escopo 2 – emissões indiretas



Fonte: GHG Protocol (2022)

O escopo das emissões de gases de efeito estufa (GEE) é uma ferramenta essencial para que as empresas compreendam e relatem suas contribuições para as mudanças climáticas. O Protocolo de Gases de Efeito Estufa (GHG Protocol, 2022) divide essas emissões em três categorias, sendo os Escopos 1 e 2 (“Scope 2 Guidance Training”, 2016) os mais relevantes para as operações diretas de uma empresa Figura 08.

Figura 8 - Visão geral dos escopos e emissões do Protocolo de GEE em toda a cadeia de valor



Fonte: Adaptado, GHG Protocol, 2023

- **Escopo 1** refere-se às emissões provenientes de operações que são de propriedade ou controladas pela empresa que realiza o relato. Isso inclui emissões resultantes da combustão em caldeiras, fornos e veículos que a empresa possui. Além disso, as

emissões associadas à produção química em equipamentos de processo controlados pela empresa também se enquadram nesse escopo. Essas emissões são consideradas diretas, uma vez que a empresa exerce controle total sobre suas fontes, podendo implementar medidas de mitigação e monitoramento mais eficazes. (GHG Protocol, 2022)

- **Escopo 2** abrange as emissões relacionadas à geração de eletricidade, vapor, aquecimento ou resfriamento que foram adquiridos e consumidos pela empresa. Em outras palavras, mesmo que a empresa não controle diretamente as fontes de geração de energia, ela é responsável pelas emissões geradas ao consumir esses recursos. Exemplos típicos de Escopo 2 incluem o uso de eletricidade comprada para operações de escritório ou de produção, além do aquecimento e resfriamento adquiridos de fornecedores externos (GHG Protocol, 2022).

Quadro 1 Visão geral dos escopos e emissões do Protocolo de GEE em toda a cadeia de valor

TIPOS DE EMISSÕES	ESCOPO	DEFINIÇÃO	EXEMPLOS
EMISSÕES DIRETAS 	ESCOPO 1	Emissões de operações que são de propriedade ou controladas pela empresa relatora	Emissions from combustion in owned or controlled boilers, furnaces, vehicles, etc.; emissions from chemical production in owned or controlled process equipment
EMISSÕES INDIRETAS	ESCOPO 2	Emissões da geração de eletricidade, vapor, aquecimento ou resfriamento comprados ou adquiridos consumidos pela empresa relatora	Use of purchased electricity, steam, heating, or cooling

Fonte: Adaptado, GHG Protocol, 2023

Ao adotar uma abordagem proativa para gerenciar suas emissões diretas e indiretas, as empresas não apenas contribuem para a mitigação das mudanças climáticas, mas também podem melhorar sua eficiência operacional e atender às demandas de stakeholders cada vez mais conscientes ambientalmente.

1.1.2 Panorama das Mudanças Climáticas

O Brasil, devido à sua vasta biodiversidade e extensas reservas naturais, é frequentemente reconhecido por sua vocação para a sustentabilidade, o que lhe confere um potencial significativo para contribuir nas ações de combate às mudanças climáticas (ROUBUSTE et al., 2022; SILVEIRA; OLIVEIRA, 2021). Ao contrário de economias mais maduras, que possuem uma infraestrutura industrial consolidada, o Brasil ainda se encontra em processo de desenvolvimento industrial e tecnológico. Essa condição oferece uma oportunidade favorável para a adoção de novas tecnologias sustentáveis, minimizando a necessidade de grandes adaptações em sua infraestrutura existente (PINSKY; KRUGLIANSKAS, 2014).

As metas globais de redução de emissões e adaptação às mudanças climáticas devem orientar a transformação das sociedades, promovendo mudanças significativas nas matrizes energéticas, nos sistemas produtivos e nos padrões de consumo da população mundial. Nesse cenário, será essencial o desenvolvimento de inovações tecnológicas voltadas à sustentabilidade, a disponibilidade de capital de risco e a liderança do setor empresarial. Além disso, essas transformações devem ser apoiadas por políticas públicas adequadas aos desafios impostos pelas mudanças climáticas, visando o desenvolvimento de uma nova economia de baixo carbono (PINSKY; KRUGLIANSKAS, 2014).

Cavalcanti (2012) destaca que, apesar de a sustentabilidade ter se consolidado como um conceito amplamente difundido no cenário contemporâneo, os compromissos concretos em relação à mitigação dos impactos ambientais e à definição de limites para o uso dos recursos naturais permanecem escassos. Segundo o autor, para que haja uma conciliação efetiva entre o crescimento econômico e o desenvolvimento sustentável, torna-se imprescindível promover transformações no sistema econômico vigente. Em uma abordagem mais abrangente, Veiga (2010) sugere a criação de indicadores de sustentabilidade que permitam avaliar simultaneamente a resiliência dos ecossistemas, a qualidade de vida das populações e o desempenho econômico.

As tecnologias de descarbonização são consideradas um dos principais imperativos para promover melhorias na qualidade ambiental em todo o mundo. A maior parte do crescimento industrial e de transporte no último século foi impulsionada por derivados de petróleo, resultando em aumentos no consumo de energia baseada em fósseis e na poluição da qualidade do ar. (ADDAI; SERENER; KIRIKKALELI, 2023a)

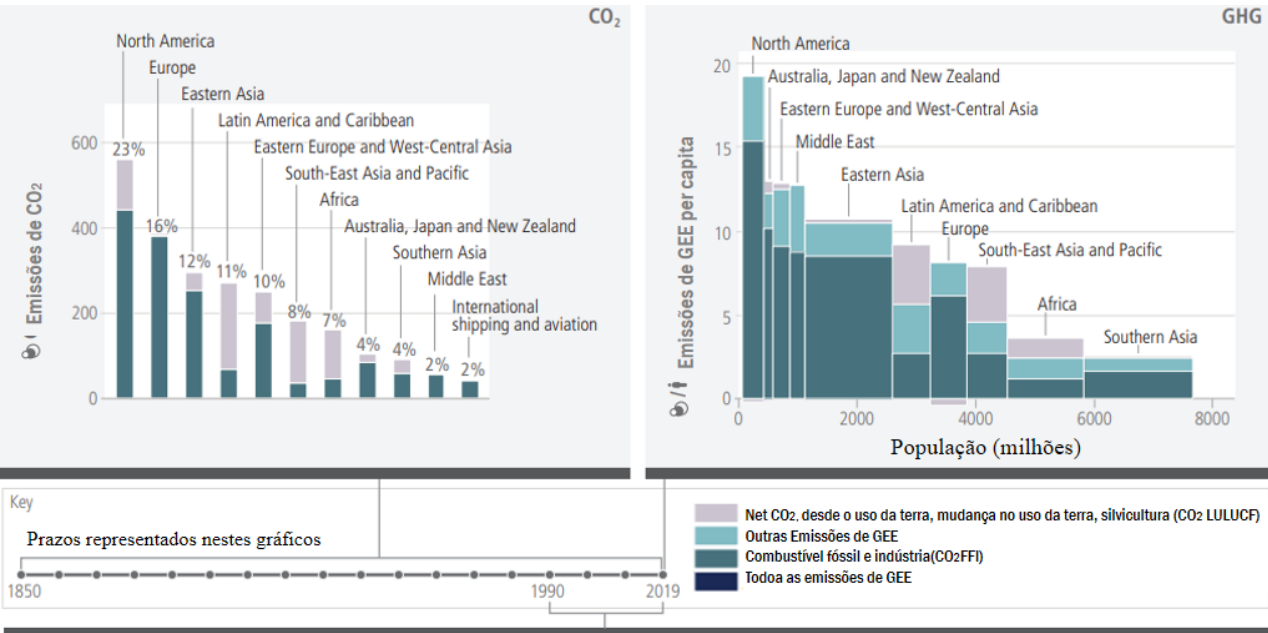
O mais recente relatório de emissões de gases do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente indica avanços desde a assinatura do Acordo de Paris em 2015. Antes, as emissões previstas para 2030 aumentariam em 16%, mas agora há uma projeção de que esse aumento é de apenas 3% com as políticas em vigor. No entanto, ainda é necessário reduzir as emissões em 28% para a meta de 2°C e em 42% para a meta de 1,5°C estabelecidas pelo Acordo. ONU (2023)

Já no Relatório de Síntese do IPCC Mudanças Climáticas (2023), apontam que as emissões líquidas de gases de efeito estufa aumentaram desde 2010 em todos os principais setores: Energia, Processos industriais, Resíduos, Agropecuária, Mudança de uso da terra.

Figura 9 - Emissões líquidas acumuladas de CO₂ por região e emissões líquidas de GEE per capita e para a população total

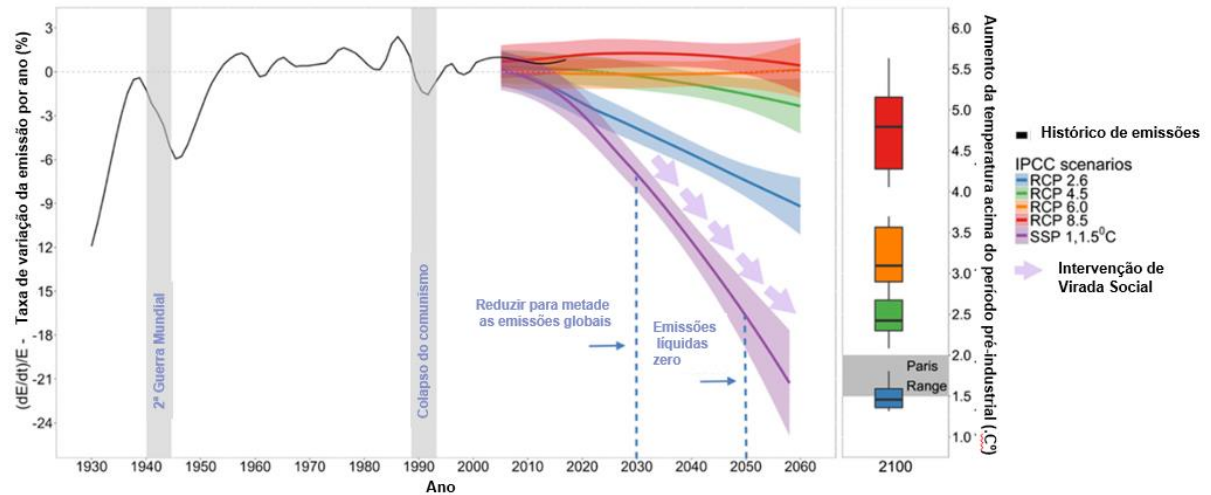
a) Emissões antropogênicas líquidas cumulativas históricas de CO₂ por região (1850-219)

b) Emissões antropogênicas líquidas de GEE per capita e para população total, por região (2019)



Fonte: IPCC (relatório 2023)

Figura 10 - Taxa de mudanças nas emissões anuais de GEE



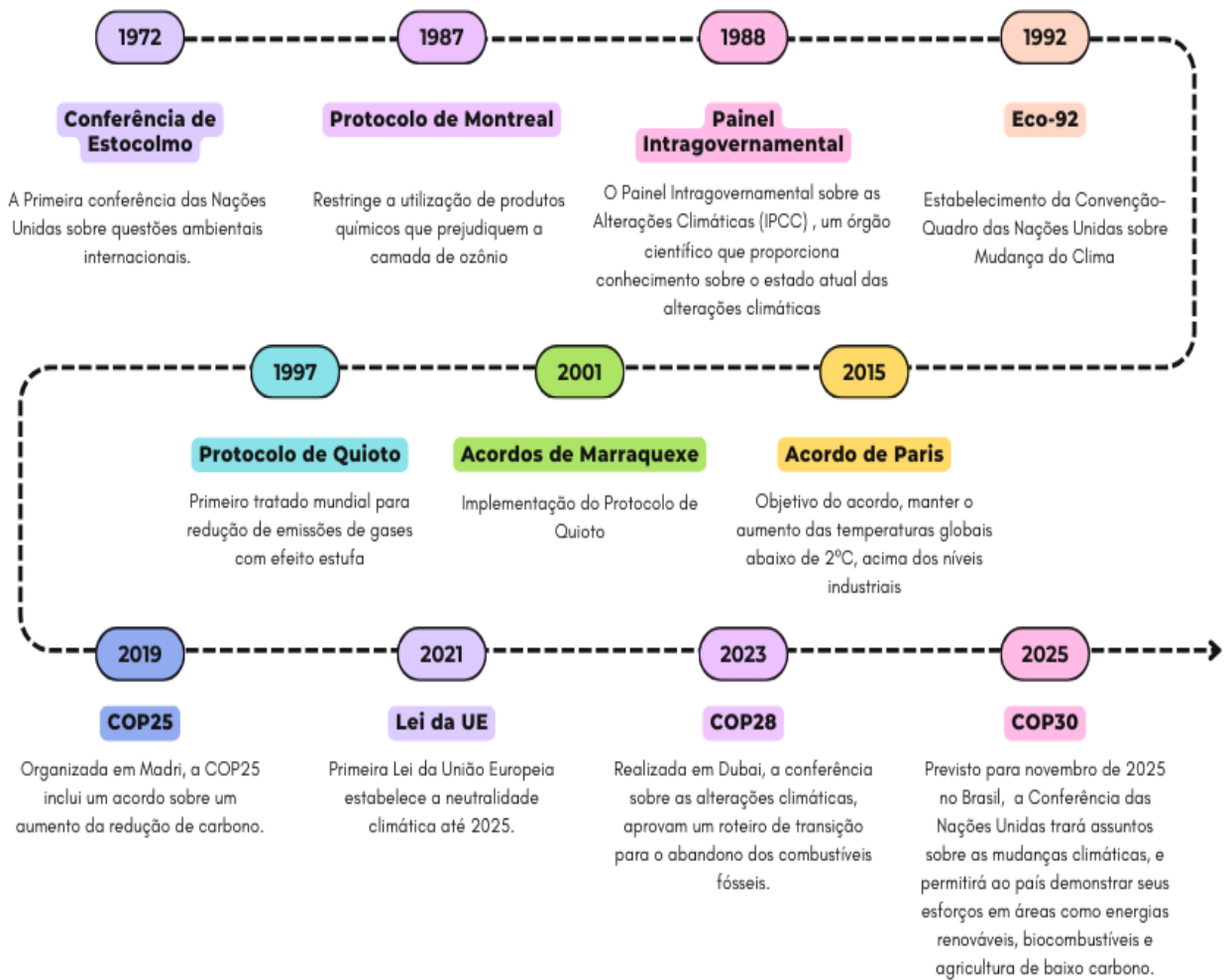
Fonte: Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050

A Figura 10 representa a taxa de mudança nas emissões anuais de gases de efeito estufa necessárias para a descarbonização líquida. Dinâmica de inclinação social no contexto dos Caminhos de Concentração Representativos (RCPs) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e do Acordo de Paris. Esquerda e direita exibem a taxa de mudança na emissão de CO₂ por ano entre 1930 e 2060, e o aumento na temperatura média global até 2100 em relação ao período pré-industrial. (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2023).

Desde então, mudanças significativas ocorreram, como a crise energética global resultante da invasão da Ucrânia pela Rússia em 2022, que levou as emissões de CO₂ no setor energético a um novo recorde. No entanto, houve avanços notáveis em tecnologias de energia limpa. A atualização de 2023 revisa o cenário atual e ajusta o caminho para atingir emissões líquidas zero até 2050, levando em conta os últimos desenvolvimentos. O relatório contribui para o balanço global do Acordo de Paris, que será finalizado antes da COP28 AIE (2023).

Neste contexto a Figura 11 apresenta a cronologia dos principais eventos relacionados às mudanças climáticas, destacando marcos globais que influenciaram diretamente as agendas de sustentabilidade e políticas ambientais nas últimas décadas. Esses eventos contribuíram para a construção de diretrizes e compromissos internacionais, impactando o cenário corporativo e reforçando a necessidade de integração entre inovação, gestão ambiental e estratégias de redução de emissões.

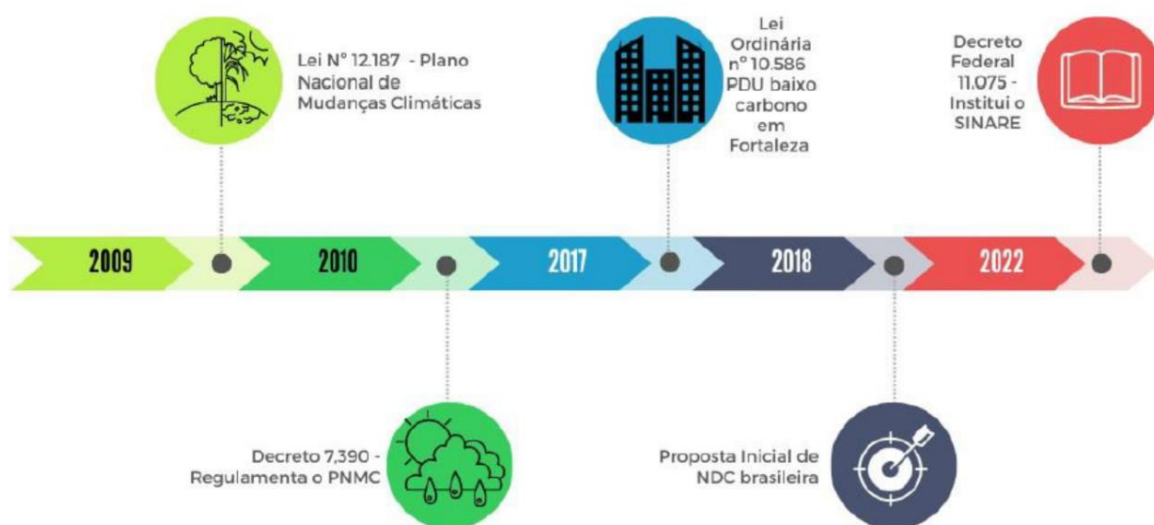
Figura 11 - Cronologia dos principais eventos relacionados às mudanças climáticas



Fonte: Autor (2025)

De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia (AIE), houve avanços significativos na implementação de tecnologias de energia limpa e na redução de seus custos, o que impactou as previsões de emissões para o setor energético. A AIE revisou para baixo suas projeções de emissões globais de CO₂ no Cenário de Políticas Declaradas (STEPS) em comparação ao Cenário de Linha de Base Pré-Paris, que considerava as políticas vigentes em 2015. Enquanto o cenário pré-Paris projetava um aumento de 3,5°C na temperatura global até 2100, a versão mais recente do STEPS prevê 2,4°C, refletindo o progresso feito, mas ainda insuficiente para atingir as metas do Acordo de Paris.

Figura 12 - Principais marcos legais na legislação brasileira sobre as mudanças climáticas



Fonte: Adaptado de TALANOA, 2020; BATISTA, 2022

Com base nos três artigos fornecidos, a seguir apresento uma análise crítica dos modelos de inovação utilizados, destacando os principais pontos abordados e estruturando um capítulo para sua dissertação:

1.1.3 Modelos de inovação para redução de carbono

A inovação tecnológica tem sido amplamente reconhecida como um pilar essencial na transição para uma economia de baixo carbono, contribuindo tanto para a mitigação de emissões quanto para o aumento da eficiência dos processos produtivos. Este capítulo apresenta uma análise crítica de três estudos que exploram abordagens distintas para a redução de emissões de carbono: o impacto da inovação tecnológica na eficiência de carbono em diferentes regiões da China; o papel da substituição de insumos em indústrias da Coreia do Sul; e as estratégias integradas de descarbonização na Alemanha. O objetivo é identificar tendências, desafios e boas práticas que possam contribuir para o desenvolvimento de um roadmap estratégico de descarbonização.

Modelos de Inovação e Eficiência de Carbono na China: A China, como uma das maiores economias globais e um dos principais emissores de gases de efeito estufa, tem investido em soluções tecnológicas para impulsionar a descarbonização e promover o desenvolvimento sustentável. O estudo de Zhao et al. (2023) examina como a inovação tecnológica influencia a

eficiência das emissões de carbono em 30 províncias chinesas, utilizando um modelo de Vetores Autorregressivos em Panel (PVAR). Os autores destacam que a inovação tecnológica inicialmente impactou negativamente a eficiência de emissões em algumas regiões, especialmente nas áreas central e ocidental, devido a diferenças significativas nos níveis de desenvolvimento econômico e na capacidade de absorção tecnológica (ZHAO et al., 2023b).

Após o primeiro período de análise, entretanto, a inovação passou a exercer um impacto positivo, sendo mais expressiva no leste da China, onde os níveis de desenvolvimento tecnológico e infraestrutura de suporte são mais robustos (ZHAO et al., 2023b). Essa dinâmica reflete não apenas a desigualdade regional, mas também a necessidade de políticas direcionadas para regiões menos desenvolvidas. Outro ponto relevante é que, embora a inovação tecnológica seja fundamental para a descarbonização, seu impacto depende da implementação de políticas específicas. Segundo os autores, é essencial formular estratégias regionais que considerem as condições locais para melhorar a eficiência das emissões de carbono de forma mais equitativa (ZHAO et al., 2023b).

Substituição de Insumos na Coreia do Sul: A substituição de insumos tem se destacado como uma abordagem estratégica para descarbonização na Coreia do Sul, especialmente no setor industrial. Estudos recentes, como o de (ALATAŞ; KARAKAYA; HIÇYILMAZ, 2021), investigam como a reconfiguração do uso de energia, materiais, capital e trabalho pode reduzir emissões de carbono sem comprometer a produtividade.

Na Coreia do Sul, o estudo de ALATAŞ et al., (2021) adota uma abordagem distinta, focada na substituição de insumos como estratégia para descarbonização. Utilizando modelos estáticos e dinâmicos derivados da função de custo, os autores avaliam a elasticidade de substituição entre energia, materiais, capital e trabalho em 13 indústrias manufatureiras.

O estudo conclui que a eficiência no uso de materiais é crucial para complementar políticas de eficiência energética e atingir as metas de descarbonização (ALATAŞ et al., 2021). Os autores argumentam que políticas baseadas apenas na redução de energia têm limitações, uma vez que a eficiência energética global tem diminuído desde 2015, indicando que as opções mais fáceis de mitigação já foram exploradas (ALATAŞ et al., 2021).

A substituição entre insumos é analisada sob duas perspectivas: substituição material-material (como troca de materiais mais intensivos em carbono por alternativas sustentáveis) e substituição inter-fator (entre energia e materiais). Nesse contexto, foi observado que, em algumas indústrias, energia e materiais são complementares, o que torna a redução de emissões mais desafiadora, pois a diminuição em um insumo exige a redução proporcional de outros (ALATAŞ et al., 2021, p. 421).

Estratégias de Descarbonização na Alemanha: A Alemanha destaca-se como um exemplo relevante na análise das relações entre globalização econômica, tecnologias de descarbonização e emissões de carbono. A Alemanha apresenta um caso singular para a análise das interações entre globalização econômica, tecnologias de descarbonização e emissões de carbono. O estudo de (ADDAI; SERENER; KIRIKKALELI, 2023b) utiliza abordagens de cointegração baseadas no modelo Fourier ARDL (BANERJEE; ARČABIĆ; LEE, 2017) para explorar essas relações no período entre 1990 e 2019. A pesquisa revela que tanto as tecnologias de descarbonização quanto a globalização econômica contribuem significativamente para a redução de emissões, enquanto o crescimento econômico e o consumo de energia primária têm efeito oposto, aumentando as emissões de carbono.

Os resultados mostram que um aumento de 1% nas tecnologias de descarbonização resulta em uma redução de 0,1389% nas emissões de CO₂. Esse efeito positivo é atribuído aos investimentos significativos da Alemanha em pesquisa, desenvolvimento e regulamentações industriais desde os anos 1990 (ADDAI; SERENER; KIRIKKALELI, 2023b). Da mesma forma, um aumento de 1% na globalização econômica reduz as emissões em 1,5057%, destacando o papel crucial da integração econômica na transferência de tecnologias limpas (ADDAI; SERENER; KIRIKKALELI, 2023b).

Os autores recomendam que a Alemanha implemente políticas que equilibrem crescimento econômico e neutralidade de carbono, investindo em infraestrutura sustentável e regulamentações que promovam tecnologias inteligentes (ADDAI; SERENER; KIRIKKALELI, 2023). Além disso, a União Europeia e as Nações Unidas são apontadas como atores-chave para fomentar economias verdes e inclusivas, apoiando países parceiros no desenvolvimento de suas próprias trajetórias de transformação sustentável. Deste modo o estudo baseia-se no modelo teórico da Curva de Kuznets Ambiental (EKC) (KUZNETS, [s.d.]) para analisar o impacto do crescimento econômico sobre as emissões de carbono, considerando a transição de uma fase inicial de degradação ambiental para uma eventual redução de poluentes devido a avanços tecnológicos e aumento da conscientização ambiental. Este modelo incorpora variáveis adicionais validadas pela literatura teórica e empírica, como globalização econômica, tecnologias de descarbonização e consumo primário de energia, nessa metodologia é utilizado o modelo econométrico:

$$CO_2 = f(PAT, GDP, GLO, PEC)$$

O modelo estruturado considera as variáveis: CO₂ (emissões de carbono, utilizado como indicador de neutralidade de carbono), PAT (patentes, proxy para tecnologias de descarbonização), GDP (PIB per capita, proxy para crescimento econômico), GLO (globalização econômica) e PEC (consumo primário de energia). Para análise, os dados são transformados em logaritmos naturais, alinhando-se à abordagem metodológica dos testes de raiz unitária Fourier ADF e ADF (BANERJEE; ARČABIĆ; LEE, 2017).

O modelo de inovação adotado é do tipo incremental, fundamentado na hipótese da Curva de Kuznets Ambiental (EKC) (DOGAN; TURKEKUL, 2016) (KUZNETS, [s.d.]), que propõe uma relação entre crescimento econômico e emissões de carbono. Essa relação é caracterizada por uma fase inicial de aumento da degradação ambiental até atingir um ponto de inflexão, momento em que avanços tecnológicos e maior conscientização ambiental contribuem para a redução das emissões.

A inclusão de variáveis, como as tecnologias de descarbonização representadas por patentes, aprimora a hipótese original da EKC, possibilitando uma análise mais abrangente do impacto da inovação tecnológica no contexto das emissões de carbono. A inovação tecnológica desempenha um papel central nesse processo, promovendo a transição para uma economia mais sustentável e a redução das emissões após o ponto de inflexão identificado no crescimento econômico. Assim, o modelo integra de forma consistente os elementos econômicos, tecnológicos e ambientais, refletindo uma abordagem mais robusta para analisar os desafios da descarbonização (ADDAI; SERENER; KIRIKKALELI, 2023; KUZNETS).

1.1.3.1 Análise Comparativa e Implicações

Ao comparar os três estudos, algumas lições e desafios emergem. A inovação tecnológica demonstrou ser uma ferramenta eficaz, mas seus benefícios não são uniformemente distribuídos. No caso chinês, o impacto positivo foi mais expressivo em regiões já desenvolvidas, ressaltando a importância de políticas regionalizadas.

Na Coreia do Sul, a substituição de insumos apresenta potencial, mas requer uma análise mais cuidadosa para evitar efeitos compensatórios indesejados. Por outro lado, a abordagem integrada da Alemanha destaca-se como um modelo robusto, combinando inovação tecnológica, economia circular e políticas públicas coordenadas.

Com base nessas análises, o Quadro 2 a seguir sintetiza as principais estratégias adotadas por China, Coreia do Sul e Alemanha, evidenciando seus pontos fortes, desafios e lições aprendidas. Essa sistematização permite visualizar, de forma clara e objetiva, as diferenças e similaridades entre as abordagens, além de reforçar a importância de soluções contextuais e

integradas para a efetiva redução das emissões e promoção do desenvolvimento sustentável.

Quadro 2 - Quadro comparativo: Modelos de Inovação para Redução de Carbono

Aspecto	China (Zhao et al., 2023)	Coreia do Sul (Alataş et al., 2021)	Alemanha (K.Addai, 2023)
Objetivo	Analisar impacto da inovação tecnológica nas emissões de carbono.	Substituição de insumos (energia e materiais) para descarbonização.	Promover tecnologias limpas e economia circular.
Metodologia	PVAR, análise de dados regionais.	Função de custo translog (modelos estático e dinâmico).	Abordagem sistêmica com políticas públicas integradas.
Escopo	30 províncias da China.	13 setores da manufatura da Coreia do Sul.	Alemanha, com foco internacional em políticas climáticas.
Principais Resultados	Inovação impacta positivamente a eficiência de carbono no leste da China.	Eficiência de materiais complementa eficiência energética.	Economia circular e incentivos fiscais impulsionam a descarbonização.
Desafios	Desigualdade regional na inovação e eficiência.	Substituição de insumos pode gerar efeitos compensatórios.	Limitação na transferência de tecnologia para países em desenvolvimento.
Ferramentas de Inovação	Políticas regionais adaptadas.	Políticas integradas para substituição de insumos.	Incentivos fiscais e colaboração público-privada.

Fonte: Autor (2024)

Conforme Zhao et al. (2023), o sucesso da inovação tecnológica depende de políticas que abordem desigualdades regionais e setoriais. Alataş et al. (2021) reforçam que melhorar a eficiência no uso de materiais é essencial para alcançar os objetivos do Acordo de Paris. Já o estudo alemão sublinha a importância de uma visão sistêmica, integrando sustentabilidade econômica e ambiental.

1.2 Mapeamento de Fluxo de Valor (VSM) e Mapeamento de Fluxo de Valor Verde (Green VSM)

Empresas de manufatura têm implementado diversas metodologias técnicas e gerenciais para melhorar a eficiência, elevar a qualidade e apoiar decisões estratégicas. Entre essas práticas estão ferramentas como Kanban, 5S (OHNO, [s.d.]), Seis Sigma (BARBOSA; NEGRÃO, 2021) e Poka-Yoke (SHINGO, S., 1986). Dentre essas abordagens, o Mapeamento do Fluxo de Valor (Value Stream Mapping - VSM) (LUCIANO, 2023), desenvolvido por Rother e Shook em 1999 e inspirado no Sistema Toyota de Produção, ganha destaque por sua capacidade de

visualizar de forma clara os processos produtivos, ajudando a identificar desperdícios na cadeia de produção.

Apesar de sua eficácia na melhoria da eficiência operacional, o VSM ainda possui um foco em aspectos econômicos, a fim de mapear o processo (MORELL-SANTANDREU; SANTANDREU-MASCARELL; GARCIA-SABATER, 2021). Contudo, para atender às demandas de um mercado mais exigente e conquistar novos consumidores, as empresas de manufatura precisam adotar princípios contemporâneos e melhorar o desempenho de produção (SABAH; AL-KINDI; AL-BALDAWI, 2023). Isso inclui a incorporação de práticas como a produção mais limpa, a economia circular, a participação em mecanismos de mercado de carbono e a valorização de boas práticas trabalhistas. Essas iniciativas promovem um equilíbrio entre eficiência produtiva e sustentabilidade (SILVA, 2024).

1.2.1 Mapeamento de Fluxo de Valor (VSM)

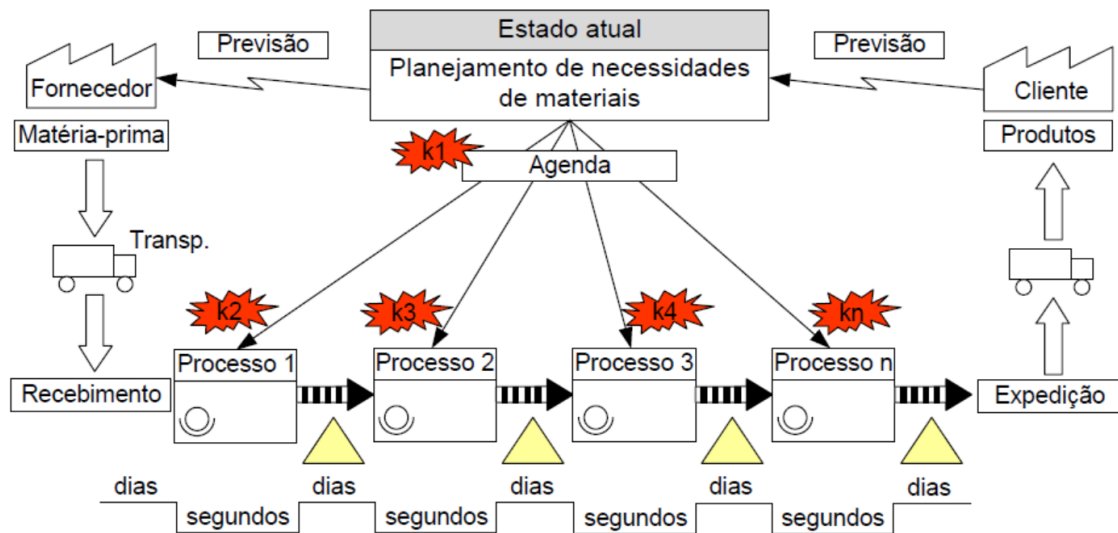
De acordo com (ROTHER, 2003), o VSM fornece um roteiro claro para a transformação do fluxo de valor, eliminando gargalos e maximizando a eficiência. Essa abordagem se concentra nos sete tipos clássicos de desperdício: superprodução, tempo de espera, transporte, processamento desnecessário, inventário excessivo, movimento desnecessário e defeitos.

Nos últimos anos, o VSM tem sido adaptado para atender às demandas de processos mais complexos, como cadeias globais de suprimentos e serviços. Um exemplo disso é o estudo de aplicação do VSM em empresas de manufatura avançada, onde foram identificadas melhorias no lead time de até 35%, reduzindo custos sem comprometer a qualidade (BADURDEEN et al., 2022).

Embora eficiente, o VSM tradicional não aborda diretamente impactos ambientais, o que limita sua aplicação em empresas que precisam cumprir metas de sustentabilidade. Segundo Minoufekar e Plapper (2023) (THOUSSAINT; MINOUFEKR; PLAPPER, 2020), a falta de indicadores ecológicos no VSM clássico cria lacunas em indústrias que buscam aliar eficiência operacional à responsabilidade ambiental.

As Figura 13 e 14 ilustram exemplos do Mapeamento de Fluxo de Valor (VSM) tradicional, desenvolvido por Rother e Shook (1996), representando os estados atual e futuro, respectivamente. Essa ferramenta, amplamente aplicada no setor industrial, permite que os envolvidos nos processos de manufatura tenham uma visão abrangente do fluxo produtivo. Dessa forma, torna-se mais fácil identificar oportunidades de melhoria e áreas que necessitam de ajustes para otimizar o desempenho.

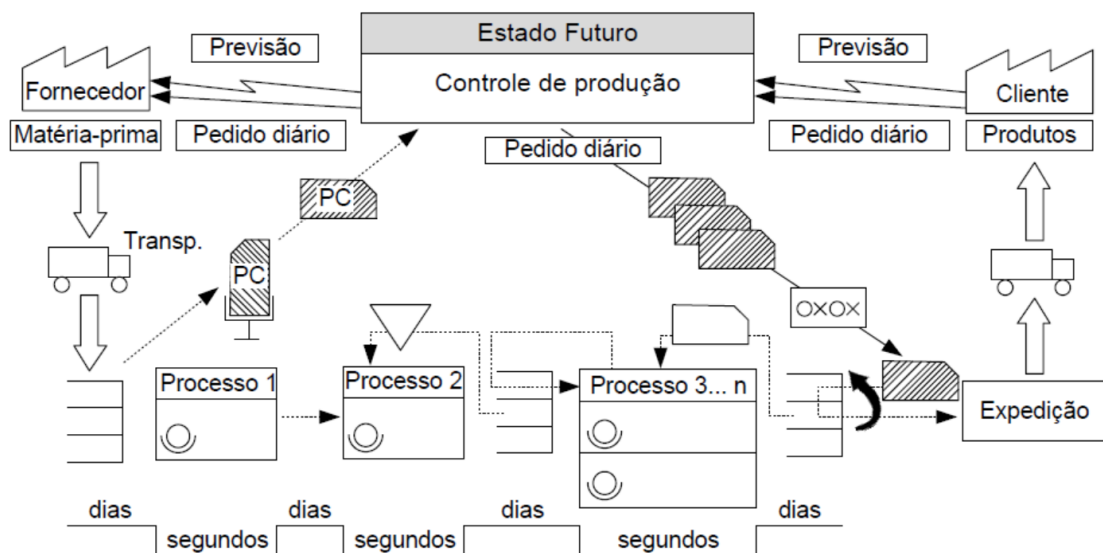
Figura 13 - Exemplo de um *Value Stream Mapping* (VSM) representando o estado atual da empresa de manufatura



Fonte: Rother e Shook, 1999.

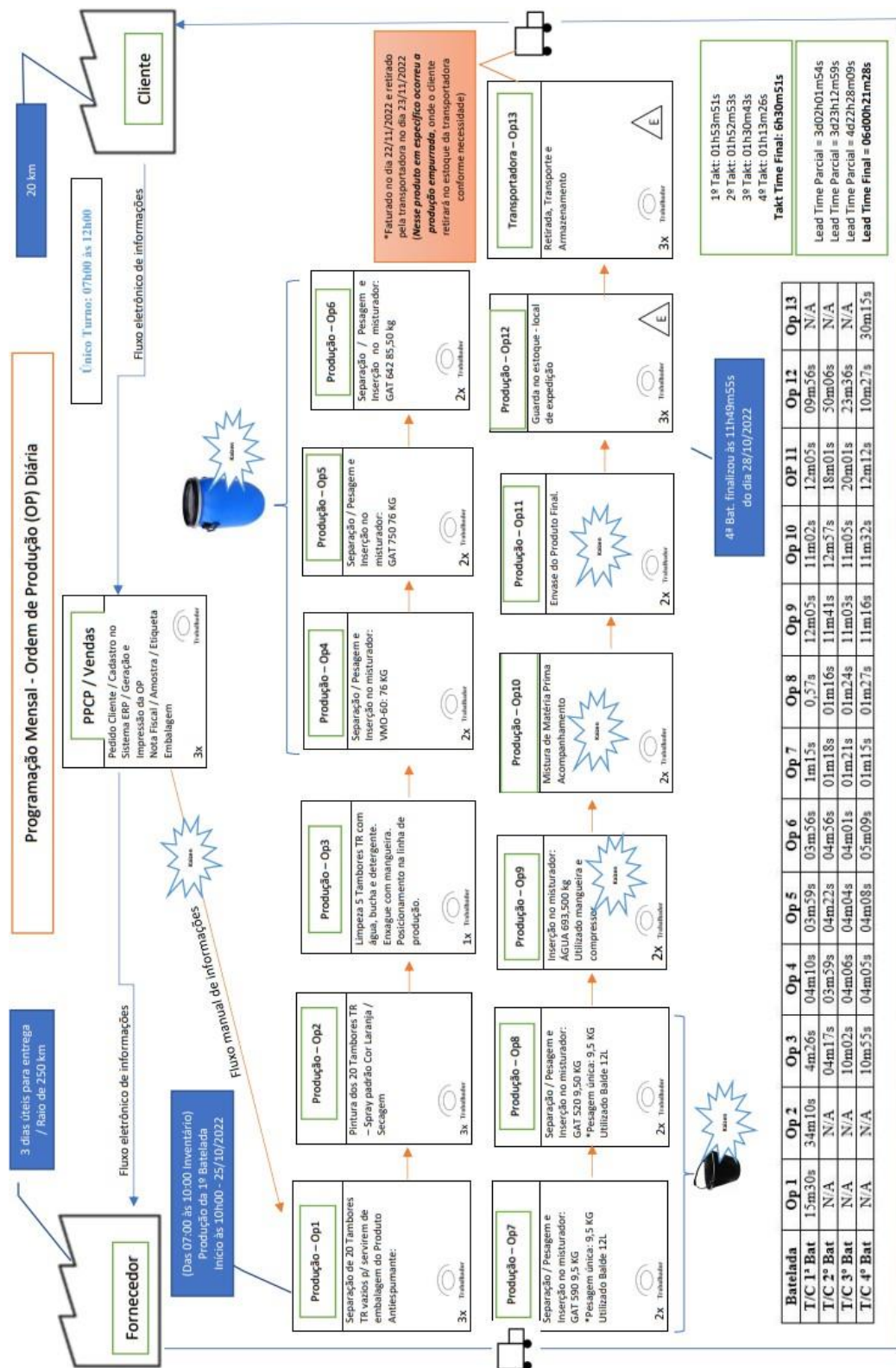
A Figura 14 apresenta uma representação do VSM tradicional no estado futuro, destacando o cenário ideal a ser atingido após a implementação de todas as melhorias sugeridas no estado atual, conforme os prazos estabelecidos no plano de projetos.

Figura 14 - Exemplo de um *Value Stream Mapping* (VSM) representando o estado futuro da empresa de manufatura.



Fonte: Rother e Shook, 1999

Figura 15 - Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) das Quatro Bateladas do Produto Antiespumante

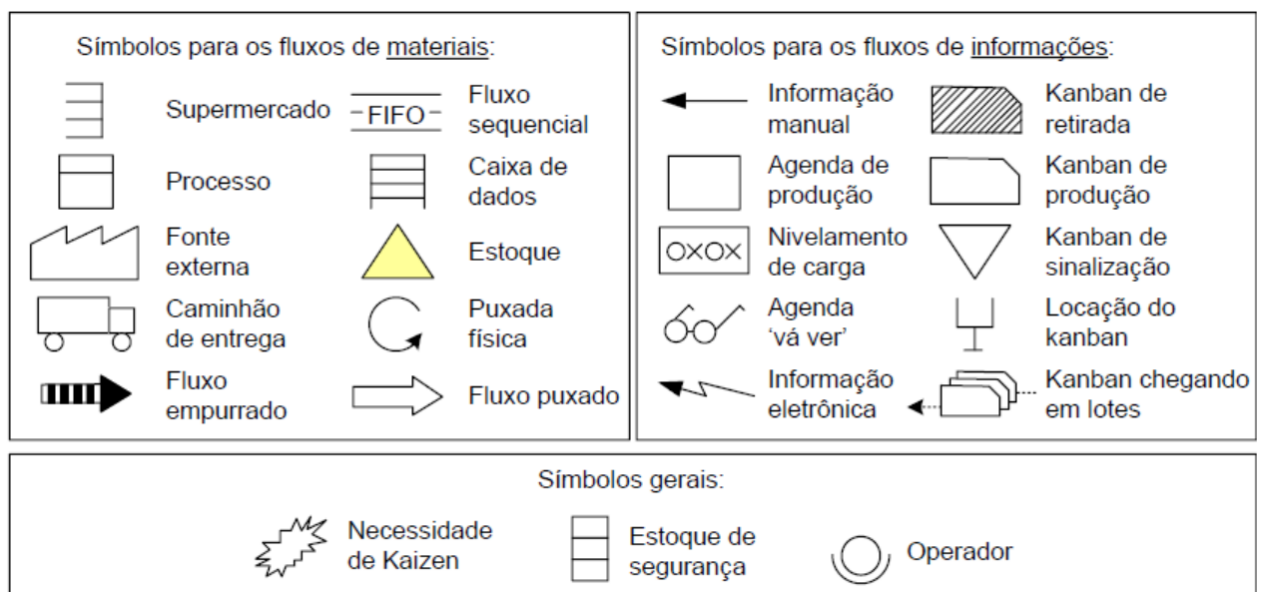


Fonte: Luciano, Érik (2023)

Na Figura 15, é apresentado um Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) que sintetiza o processo de produção de quatro bateladas de um produto antiespumante. Nesse contexto, (LUCIANO, 2023) enfatiza a relevância de intensificar o número de medições nas etapas que apresentam coeficientes de variação superiores aos limites aceitáveis. Essa abordagem visa aumentar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo uma análise mais detalhada e assertiva das operações e contribuindo para a melhoria contínua do processo produtivo.

A Figura 16 exhibe os símbolos padronizados empregados na construção do VSM para representar os estados atual e futuro. No VSM do estado atual, os projetos Kaizen são indicados por um símbolo específico, denominado "necessidade de Kaizen" (em inglês, Need for Kaizen), posicionado próximo aos locais identificados pelos especialistas como áreas que demandam melhorias durante a análise.

Figura 16 - Simbologia utilizada na elaboração do Value Stream Mapping (VSM)



Fonte: Rother e Shook, 1999.

1.2.2 Mapeamento de Fluxo de Valor Verde (Green VSM)

O *Green Value Stream Mapping* (Green VSM) surge como uma adaptação do Mapeamento do Fluxo de Valor tradicional, projetada para incluir indicadores ambientais nos processos produtivos. Essa metodologia reflete a crescente preocupação global com o impacto das mudanças climáticas e a necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE), sem comprometer a eficiência produtiva (FAULKNER; BADURDEEN, 2014). Uma das primeiras iniciativas para integrar aspectos ambientais ao VSM foi o desenvolvimento do

Mapeamento do Fluxo de Valor Sustentável (SVSM), apresentado por Simons e Mason em 2002. Conforme citado por Faulkner e Badurdeen (2014, p. 10), esse método buscava minimizar as emissões de GEE em cadeias de suprimentos, ampliando o foco do VSM para atender demandas ambientais de maneira mais eficaz.

De acordo com Silva, Euclides Serafim (2024), embora o Mapeamento do Fluxo de Valor Sustentável (SVSM) seja considerado uma ferramenta relevante, sua abordagem à variável ambiental é limitada, pois não contempla indicadores essenciais, como o consumo de energia elétrica, o uso de água e outros materiais empregados nos processos produtivos, além de desconsiderar aspectos sociais. Nos últimos dez anos, diversas soluções foram sugeridas para adaptar o VSM aos princípios da sustentabilidade.

Mohamad et al. (2019) utilizaram um conjunto de ferramentas SVSM padrão, disponibilizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) em 2007, para integrar a manufatura enxuta com práticas ambientais, incorporando o consumo de materiais e água nos processos industriais.

Conforme alternativas de melhoria são geradas e o impacto ambiental do processo é reduzido, chega-se ao momento de criar o Mapeamento do Fluxo de Valor Verde futuro. Esse mapeamento visa projetar o fluxo de valor do processo em seu estado ideal, com foco na melhoria contínua em aspectos ambientais. O uso do Green VSM oferece uma visão mais clara para a indústria, permitindo identificar onde as melhorias podem ser implementadas. Além disso, o impacto ambiental também serve como um indicador importante para monitorar o progresso e a eficácia das melhorias realizadas (DIMYATI; SINGGIH, 2019).

O Green VSM, utiliza indicadores adicionais, como a pegada de carbono, o consumo de energia, o uso de recursos naturais e a geração de resíduos. (THOUSSAINT; MINOUFEKR; PLAPPER, 2020) explicam que, ao adicionar métricas ecológicas, o Green VSM torna-se uma ferramenta mais completa para empresas comprometidas com a sustentabilidade. Essa metodologia permite identificar desperdícios ambientais, como emissões desnecessárias ou consumo excessivo de energia, além de destacar oportunidades para processos mais verdes.

Entretanto, a implementação do Green VSM apresenta desafios, como a coleta de dados ambientais confiáveis e a necessidade de capacitação de equipes para interpretar indicadores complexos. Ainda assim, a digitalização dos processos e o uso de tecnologias como sensores IoT e análise de Big Data têm facilitado sua adoção (FAULKNER; BADURDEEN, 2014a).

Iniciativas têm sido realizadas para adaptar o VSM tradicional, buscando alinhá-lo aos princípios da sustentabilidade (FAULKNER; BADURDEEN, 2014b; FONTOURA et al., 2023; SALVADOR et al., 2021).

Pesquisas vêm buscando integrar a sustentabilidade no VSM, sem integrar os capitais econômico, social e ambiental, ou utilizam modelos estáticos que não permitem ao analista a flexibilidade de escolher indicadores. A proposta do Mapeamento do Fluxo de Valor Sustentável (SVSM)(PRAYUGO; ZHONG, 2021) se destaca por superar essas limitações, pois adota uma abordagem multicritério que considera os três capitais simultaneamente, de maneira dinâmica. Além disso, a utilização do cubo para apoio à tomada de decisões torna a proposta mais abrangente, permitindo escolhas mais estratégicas e eficazes na busca por manufaturas sustentáveis (SILVA, 2024).

O Green Value Stream Mapping (GVSM) ocorre como uma evolução do método tradicional de Value Stream Mapping (VSM), integrando preocupações ambientais ao foco em eficiência operacional. Diferentemente do VSM, que prioriza tempo e custos, o GVSM adota uma abordagem holística que visa reduzir impactos ambientais, como emissões de carbono, consumo de energia e uso de recursos hídricos e materiais. Essa ferramenta é amplamente reconhecida por sua capacidade de identificar e eliminar desperdícios, promovendo eficiência e sustentabilidade simultaneamente (YULIANTO; ISMANTO; INFO, 2024).

a) Benefícios da Aplicação do GVSM

Estudos indicam que o GVSM é eficaz na redução de desperdícios e impactos ambientais em diversos setores, como manufatura e agroindústria. Por exemplo, em processos de produção de arroz, a aplicação do GVSM mostrou-se capaz de reduzir significativamente o consumo de eletricidade, gás e água, sem comprometer a produtividade. Além disso, a reutilização de resíduos gerados em etapas como plantio e moagem pode transformar subprodutos em recursos valiosos, como fertilizantes orgânicos e bioenergia, reforçando o conceito de economia circular (BUDIHardjo; HADIPURO, 2022).

b) Foco em Sustentabilidade no Processo Produtivo

O GVSM permite mapear fluxos de materiais, energia e informações ao longo do processo produtivo, identificando pontos críticos para a redução de emissões e desperdícios. Em um estudo sobre a cadeia de produção de arroz, observou-se que as etapas de plantio e moagem representavam os maiores consumidores de energia e geradores de resíduos. A implementação de estratégias sustentáveis nessas etapas revelou potencial para minimizar o impacto ambiental e aumentar a eficiência operacional, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do setor (YULIANTO; ISMANTO; INFO, 2024).

c) Estratégias de melhoria com o GVSM

Com base nos princípios do GVSM, estratégias de melhoria podem ser formuladas para integrar tecnologias verdes e otimizar recursos. Por exemplo, o uso de equipamentos de baixo consumo energético e sistemas de irrigação inteligentes não apenas reduz custos operacionais, mas também melhora o desempenho ambiental. Além disso, a capacitação de trabalhadores e a implementação de projetos-piloto são medidas fundamentais para superar barreiras como resistência à mudança e complexidade de implementação (PAKDEENARONG; HENGSADEEKUL, 2020).

1.2.3 Aspectos comparativos entre VSM e Green VSM

Enquanto o VSM tradicional se concentra em métricas de tempo e custo para otimizar processos e reduzir desperdícios, o Green VSM vai além, incorporando uma perspectiva ambiental ao mapear o impacto das atividades na pegada de carbono e em outros indicadores de sustentabilidade. Estudos mostram que empresas que adotam o Green VSM não apenas melhoram a eficiência operacional, mas também aumentam sua capacidade de alinhar esses ganhos com práticas mais sustentáveis. Ao integrar a sustentabilidade ao desempenho, essas empresas criam um valor significativo, não apenas para seus negócios, mas também para a sociedade e o meio ambiente, ao contribuírem para a redução de impactos negativos e ao promoverem uma economia mais verde e responsável. (FAULKNER; BADURDEEN, 2014b). Além disso, a aplicação do Green VSM tem se mostrado uma ferramenta eficaz para identificar pontos críticos nos processos produtivos onde há maior concentração de emissões de gases de efeito estufa, permitindo que intervenções específicas sejam planejadas com base em dados concretos. Segundo Faulkner e Badurdeen (2014b), “o Green VSM fornece uma representação visual clara dos fluxos de materiais e informações, incorporando métricas ambientais que ajudam a visualizar oportunidades de melhoria que, de outra forma, poderiam passar despercebidas”. Essa abordagem integrada fortalece a tomada de decisão nas organizações, possibilitando uma atuação mais estratégica frente aos desafios ambientais contemporâneos. Ao incorporar indicadores como consumo energético, geração de resíduos e emissão de CO₂ diretamente nos fluxos de valor, as empresas não apenas atendem às exigências regulatórias, mas também elevam seu posicionamento frente ao mercado, consumidores e stakeholders engajados com práticas de responsabilidade socioambiental.

Quadro 3 - Quadro comparativo do VSM e Green VSM

Aspecto	VSM (Value Stream Mapping)	Green VSM (Value Stream Mapping Green)
Objetivo Principal	Identificar e eliminar desperdícios no fluxo de valor, aumentando a eficiência operacional.	Mapear o fluxo de valor com foco na sustentabilidade, identificando desperdícios e impactos ambientais.
Foco	Redução de tempo de ciclo, custos e aumento de produtividade.	Redução de emissões de CO ₂ , consumo de energia, resíduos e outros impactos ambientais.
Indicadores Utilizados	Tempo de ciclo, tempo de setup, lead time, inventário, eficiência do processo.	Pegada de carbono, consumo de energia, consumo de água, geração de resíduos, poluentes.
Abordagem de Desperdício	Identifica os 7 desperdícios clássicos : superprodução, espera, transporte, excesso de processamento, inventário, movimento e defeitos.	Identifica desperdícios ambientais : emissões de GEE, consumo excessivo de recursos naturais, geração de resíduos e efluentes.
Perspectiva Temporal	Enfoque no tempo presente para otimizar processos existentes.	Considera o impacto ambiental a curto, médio e longo prazo.
Ferramentas Complementares	Métodos de Lean Manufacturing e Kaizen.	Ferramentas de sustentabilidade, como Análise de Ciclo de Vida (ACV) e métricas ambientais.
Benefícios Alcançados	Maior eficiência e redução de custos operacionais.	Melhoria da sustentabilidade, conformidade com regulações ambientais e redução de impacto ambiental.
Tipo de Dados Coletados	Dados operacionais e produtivos (tempo, quantidade, etc.).	Dados operacionais e ambientais (energia, emissões, resíduos).
Complexidade de Implementação	Moderada; requer conhecimento dos fluxos de produção.	Maior; exige expertise ambiental e dados específicos.
Exemplos de Aplicação	Processos de manufatura, cadeias de suprimentos e serviços.	Processos industriais com alta emissão de GEE e setores que buscam certificações ambientais.

Fonte: Autor, 2024 - adaptado de Mike Rother e John Shook, James P. Womack e Daniel T. Jones

Enquanto o VSM se concentra em métricas de tempo e custo, o Green VSM expande a análise para incluir impactos ambientais. Estudos mostram que empresas que adotam o Green VSM têm maior capacidade de alinhar eficiência operacional e sustentabilidade, criando valor tanto para os negócios quanto para a sociedade (FAULKNER & BADURDEEN, 2020).

Quadro 4 Principais características comparativas do VSM e Green VSM

Aspecto	VSM	Green VSM
Foco	Eficiência e redução de custos	Sustentabilidade e ecoeficiência
Indicadores	Tempo de ciclo, inventário	Pegada de carbono, energia
Aplicação	Manufatura e serviços	Manufatura sustentável

Fonte: Autor 2024, adaptado de Faulkner & Badurdeen, 2014.

1.3 Roadmap: Planejamento estratégico e inovação (Mapa da estrada)

O *Roadmapping* é definido como um processo que mobiliza o pensamento sistêmico estruturado, métodos visuais (como o 'canvas' de *Roadmap*) e abordagens participativas para enfrentar desafios e oportunidades organizacionais, apoiando a comunicação e o alinhamento para o planejamento estratégico e a gestão da inovação dentro e entre organizações, tanto no nível empresarial quanto setorial (PARK et al., 2020). Historicamente, essa prática surgiu na indústria na década de 1960, muito antes de despertar o interesse acadêmico.

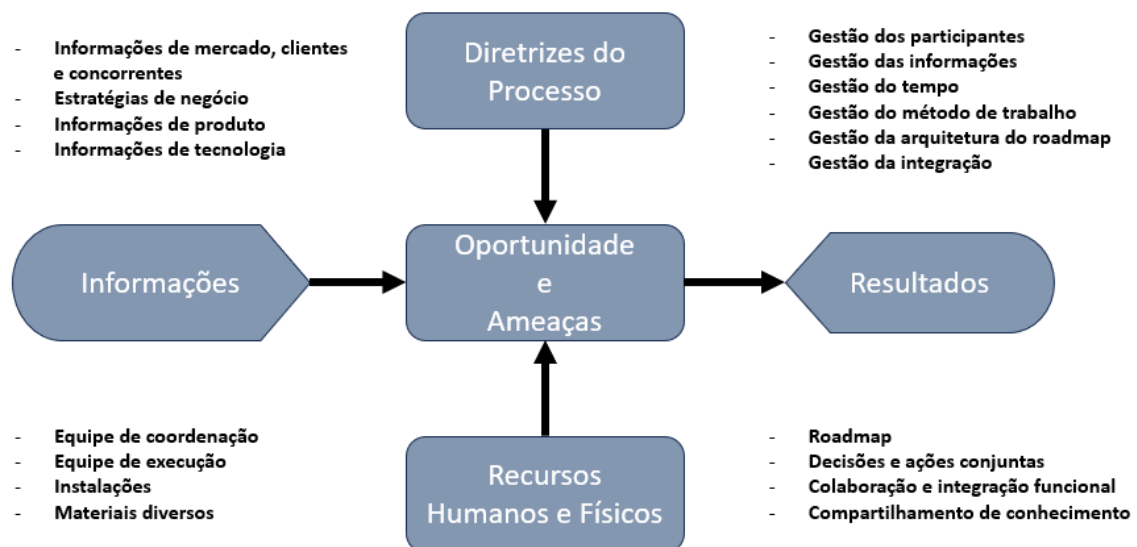
De acordo com Gouvêa (2009), o termo *Roadmapping* refere-se aos processos e procedimentos utilizados para a elaboração e aplicação de um roteiro estratégico, sendo uma metodologia que organiza e estrutura as etapas necessárias para alcançar objetivos, como a inovação ou a descarbonização. O *Roadmap*, por sua vez, é o produto final desse processo, representando o roteiro em si – um plano visual e estruturado que orienta a implementação de ações estratégicas ao longo do tempo.

Gouvêa et al. (2019) descreve que os processos de roadmapping, para o planejamento estratégico e a inovação, são compostos por seis elementos essenciais. Esses componentes incluem as partes interessadas, que representam todos os envolvidos ou impactados pelo processo; as diretrizes do processo, que orientam as etapas e ações a serem tomadas; as informações necessárias para embasar decisões; as oportunidades e ameaças, que ajudam a identificar os aspectos externos e internos que podem influenciar o sucesso do *roadmapping*; os recursos humanos e físicos, que são os ativos necessários para implementar o plano; e, por

fim, os resultados, que medem o sucesso e os impactos das ações realizadas. A Figura 10 ilustra como esses elementos se inter-relacionam dentro do processo de *roadmapping*, oferecendo uma visão estruturada para a criação de estratégias eficazes.

A Figura 17 organiza e relaciona os elementos fundamentais do *Roadmap*, destacando as diretrizes do processo, as informações necessárias, os recursos humanos e físicos, além da identificação de oportunidades e ameaças, como aspectos essenciais para a construção de estratégias organizacionais alinhadas à inovação e sustentabilidade. De acordo com Gouvêa et al. (2019), esses elementos são responsáveis por estruturar o processo de *roadmapping*, orientando as etapas de planejamento, a alocação de recursos e a definição dos resultados esperados. Nessa mesma direção, Phaál, Farrukh e Probert (2004) afirmam que a eficácia do *roadmapping* depende da integração adequada entre informações, recursos e análises ambientais, possibilitando a formulação de trajetórias estratégicas coerentes e sustentáveis. Dessa forma, a figura reforça a importância da articulação entre esses componentes para gerar resultados consistentes, viabilizando a tomada de decisão estratégica e a implementação de ações colaborativas, fundamentais para promover a inovação organizacional e consolidar práticas sustentáveis no ambiente corporativo.

Figura 17 - Elementos do Roadmap: Diretrizes do processo, oportunidades e ameaça, recursos humanos e físicos, informações e resultados



Fonte: Gouvêa et. al (2009)

Para Lu, Chen e Yu (2019), o *Roadmap* é uma ferramenta gerencial que serve para abordar e gerenciar planejamentos estratégicos, promovendo a integração de disciplinas diversas em um sistema organizacional. Além disso, as empresas utilizam os *Roadmaps* tecnológicos para desenvolver estratégias de médio e longo prazo com o intuito de alcançar objetivos comerciais, sendo especialmente populares para a gestão estratégica em nível técnico (Lu et al., 2019). O uso dessa ferramenta também se estende à integração tecnológica e operacional, governança corporativa e práticas de desenvolvimento tecnológico, bem como ao planejamento público de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D).

Martin, Ralf e Phaal (2013) reforçam que um *Roadmap* agrega valor ao fornecer uma função de aprimoramento organizacional, permitindo a identificação de novas oportunidades e potenciais ameaças no ambiente de negócios. Dessa forma, o *Roadmap* não só alinha os objetivos estratégicos da organização com as inovações tecnológicas, como também oferece um caminho claro para o desenvolvimento contínuo.

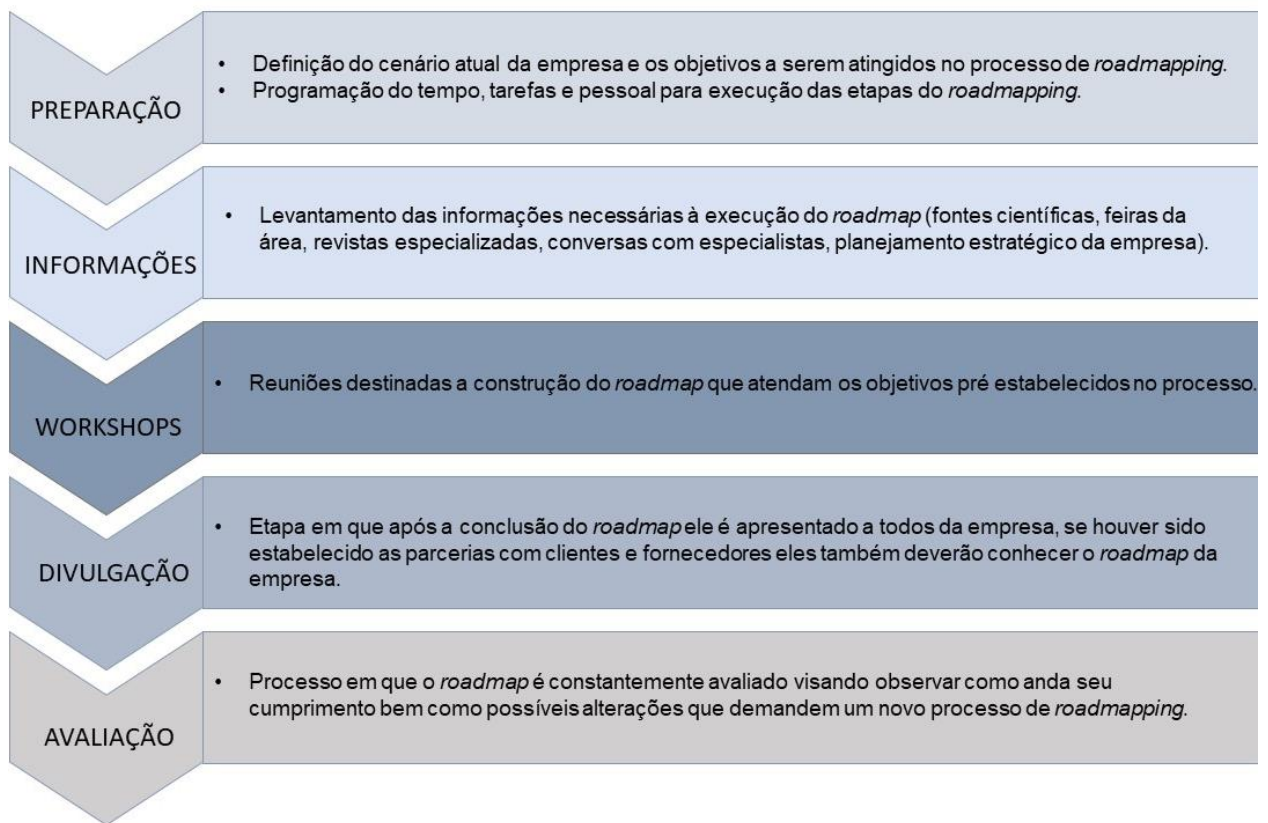
O *Roadmap* tem sido amplamente utilizado por organizações de diferentes tamanhos, desde pequenas empresas até grandes projetos de políticas públicas, com o objetivo de alinhar os objetivos estratégicos com as tecnologias que afetam diretamente os produtos e serviços oferecidos. Alcantara e Martens (2018) afirmam que essa ferramenta permite que as empresas identifiquem elementos essenciais para o sucesso de seus negócios, proporcionando uma estrutura clara para a implementação de inovações tecnológicas e desenvolvimento de estratégias que sustentem o crescimento e a competitividade. Além disso, o *Roadmap* atua como um importante instrumento de comunicação, promovendo o alinhamento estratégico entre as partes envolvidas em um processo ou plano. Ele facilita o diálogo e a articulação entre diferentes atores, permitindo a integração de suas perspectivas (ROCHA; MELLO, 2016). Essa ferramenta também contribui para uma comunicação eficiente entre recursos disponíveis, objetivos organizacionais e mudanças no ambiente externo, promovendo uma visão coesa e adaptativa (OLIVEIRA; ROZENFELD, 2010).

A construção de um *Roadmap* envolve o levantamento de dados qualitativos e quantitativos, permitindo que a organização visualize a implementação de suas metas em um contexto de tempo e recursos. De acordo com Lu et al. (2019), o *Roadmap* é utilizado para conectar diferentes disciplinas organizacionais, unificando as metas estratégicas com o ambiente tecnológico e de mercado. O processo de construção de um *Roadmap* requer a definição clara de objetivos, a identificação de etapas necessárias para alcançá-los e a criação de marcos temporais que orientem a implementação.

De acordo com (VINAYAVEKHIN et al., 2023), o *Roadmap* é estruturado em uma sequência temporal, que representa e comunica o plano estratégico de maneira clara. Esses roteiros podem ser adaptados para diversos fins, como planejamento de produto, desenvolvimento de capacidades e integração de processos. (KERR; PHAAL, 2015).

O Roadmap se estabelece como uma ferramenta estratégica fundamental para organizações que buscam alinhar seus objetivos de longo prazo com a inovação tecnológica e a sustentabilidade. Sua capacidade de integrar diferentes perspectivas, mapear oportunidades e ameaças e organizar o desenvolvimento de estratégias torna-o essencial para a gestão eficaz da inovação.

Figura 18 - Fases e atividades de implantação de um Roadmap



Fonte: Pires, V R S (2020)

2 METODOLOGIA

Esta seção apresenta os aspectos metodológicos da pesquisa, destacando sua caracterização e abordagem. A metodologia utilizada baseia-se no *Design Science Research* (DSR), uma estrutura que combina o rigor acadêmico com a aplicação prática, voltada para a criação e avaliação de artefatos que resolvem problemas identificados.

Serão detalhadas as etapas do DSR adotadas no processo, incluindo a imersão inicial na empresa para compreensão do contexto, a definição do problema de pesquisa, o desenvolvimento de soluções (artefatos), a aplicação do *Roadmap* e a avaliação dos resultados. Também será descrito o processo de coleta e análise de dados, que combinará abordagens qualitativas e quantitativas, com o objetivo de fornecer uma visão completa do desenvolvimento e implementação das políticas de inovação e redução de carbono pela empresa de componentes automotivos.

A metodologia adotada para esta pesquisa é classificada de natureza aplicada devido ao seu caráter prático, cujo objetivo principal é o desenvolvimento de um Roadmap estratégico para reduzir emissões de carbono na indústria de manufatura de componentes automotivos, classificada como exploratória, uma vez que visa investigar um campo com pouca literatura disponível ou que ainda carece de estudos empíricos detalhados sobre a integração do Roadmap e a descarbonização.

O estudo abordou uma estratégia quali-quantitativa, integrando tanto a análise qualitativa — necessária para interpretar as percepções e práticas das empresas em relação à redução de carbono — quanto a análise quantitativa, que mensura a eficácia das estratégias de redução de emissões, especialmente com base em indicadores-chave identificados por meio da coleta de dados primários. O DSR é aplicado aqui de forma a desenvolver, testar e validar o Roadmap como ferramenta estratégica, para que ele seja útil a outras empresas ao implementar práticas de inovação focadas na redução de carbono.

2.1 Caracterização da empresa

A organização em que será realizada a pesquisa exploratória, tem como atuação principal manufatura de rodas automotivas. Com conhecimento técnico, a empresa se compromete com a inovação contínua, desenvolvendo novos produtos e tecnologias em alinhamento com macro tendências globais, seja de forma independente ou em parceria com aliados estratégicos. Suas operações estão estruturadas em duas divisões principais: a primeira, focada na produção

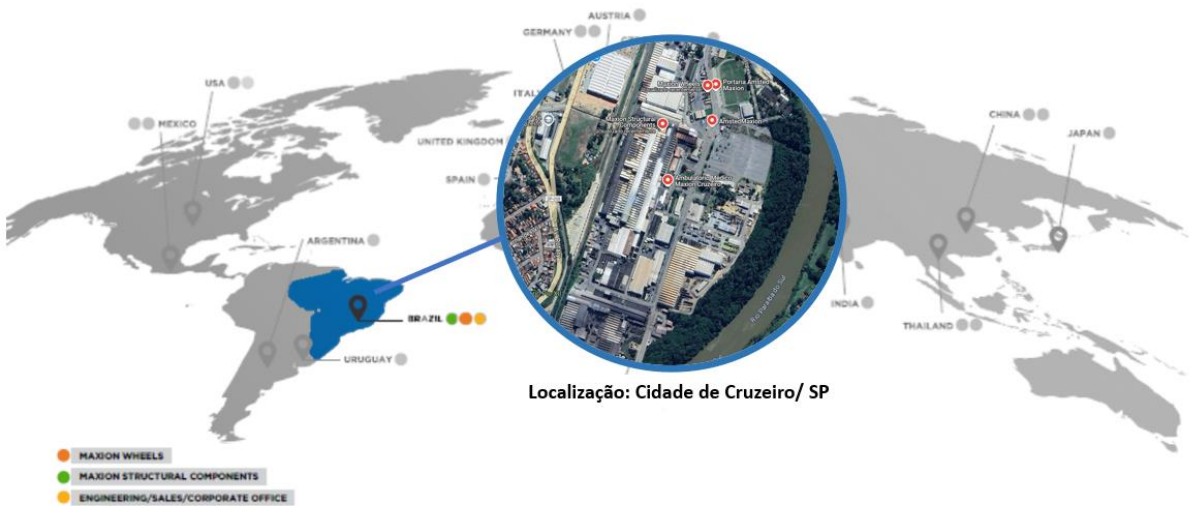
de uma ampla gama de rodas de aço e alumínio para veículos leves, comerciais e máquinas agrícolas, e a segunda, dedicada à fabricação de componentes estruturais como longarinas, travessas e chassis montados para veículos comerciais, além de conjuntos estruturais para veículos leves.

Quadro 5 Caraterização da empresa

Característica	Descrição
Setor de atuação	Fabricação de componentes automotivos
Etapas críticas analisadas	Soldagem, laminação de aros, montagem de rodas, e pintura de rodas
Tecnologias utilizadas	Soldagem por resistência, laminação por calor, pintura E-Coa e Top-Coat
Fontes de energia	Energia elétrica de matriz convencional
Oportunidades de melhoria	Adoção de energias renováveis, tecnologias de recuperação de calor, e redução de resíduos
Impactos esperados	Redução das emissões de CO2 e otimização do consumo energético

Fonte – Autor (2024)

Figura 19 – Localização da Empresa



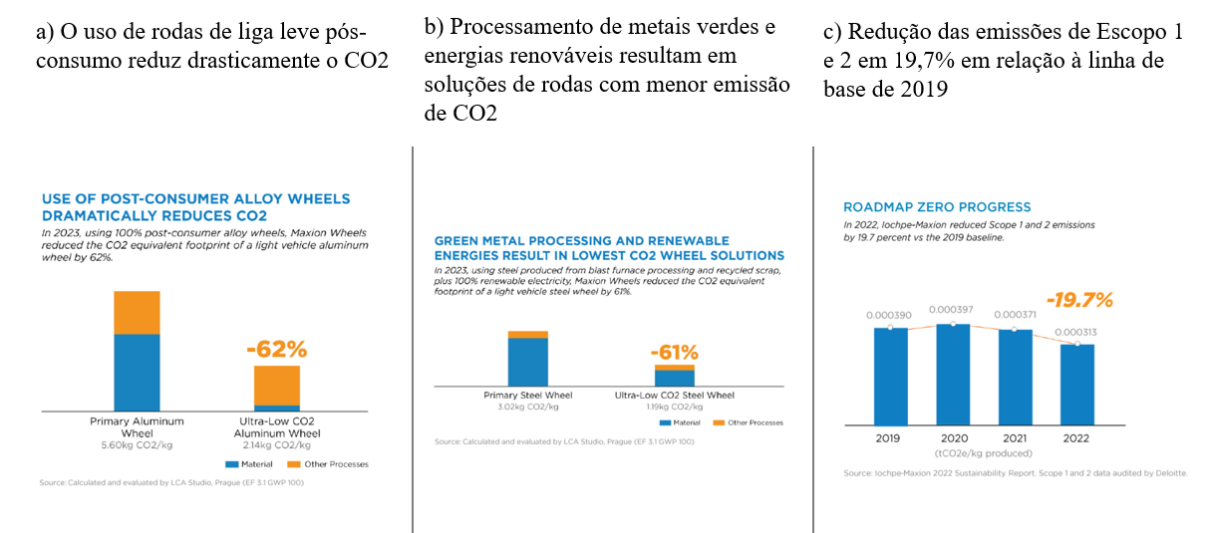
Fonte: Autora (2024)

Inaugurada em 1943, a Empresa X está situada na cidade de Cruzeiro, no estado de São Paulo, Brasil, em uma planta que ocupa mais de 121.000 m², às margens do Rio Paraíba do Sul.

Sua principal atividade é a fabricação de rodas de aço, com uma capacidade de produção de até dois milhões de rodas anualmente. A empresa conta com uma equipe de aproximadamente 1.200 colaboradores e sua produção atende a diversos setores da indústria automotiva, incluindo os segmentos agrícola, comercial e de reboques.

A Empresa X possui um *roadmap* estratégico que consta em seu Relatório de Sustentabilidade ao qual orienta suas operações e decisões a longo prazo. Esse *roadmap* delinea as metas e iniciativas fundamentais que visam otimizar processos, aumentar a eficiência e promover a inovação em suas atividades e implementação de práticas sustentáveis, assegurando que a empresa se mantenha competitiva no mercado. A fabricante global do setor automotivo tem adotado um *roadmap* zero empresarial, com a meta de neutralidade de carbono até 2040. As principais iniciativas incluem a redução das emissões de CO₂ em 30% até 2025 e 70% até 2030, o uso de 90% de eletricidade renovável até 2030 e o desenvolvimento de produtos mais leves e sustentáveis. Além disso, implementa projetos sociais e ambientais alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU. É válido dizer que este *roadmap* é uma estratégia geral para a empresa, não sendo específico de uma planta ou de uma metodologia.

Figura 20 - Roadmap da Empresa - Visão Estratégica do Roadmap de Descarbonização: Iniciativas e Metas Empresariais



Fonte: Relatório de Sustentabilidade 2023

Figura 21 - Linha de Produção: Pintura de rodas



Fonte: Maxion, 2024. Disponível em: <https://www.maxionsc.com/Default.aspx>

Figura 22 - Linha de Produção: Processo de Soldagem Solda



Fonte: Maxion, 2024. Disponível em: <https://www.maxionsc.com/Default.aspx>

2.2 Classificação da Pesquisa

A pesquisa foi realizada por meio de um estudo exploratório e empírico, utilizando o método de Design Science Research (DSR) como base. Para uma compreensão mais profunda do contexto, foram conduzidas visitas imersivas na empresa X, com o intuito de identificar como suas políticas de inovação e redução de carbono são desenvolvidas.

O presente estudo teve como objetivo analisar os modelos de inovação adotados pela empresa e verificar a aplicação do *Roadmap* como ferramenta nesse processo. No entanto, ao longo da pesquisa, foi identificada uma Só, uma vez que a empresa em questão não dispõe de um modelo estruturado e formalizado para a implementação do *Roadmap* em suas estratégias de inovação, o que limita a aplicação sistemática dessa ferramenta na gestão do processo inovativo.

A coleta de dados foi realizada por meio de visitas imersivas e reuniões presenciais e online, a fim de analisar os processos produtivos dentro dos setores de solda, laminação e pintura, focando em suas estratégias de inovação e práticas de descarbonização. Os dados analisados foram de abordagem qualitativa e quantitativa. A abordagem qualitativa permitiu explorar e interpretar o contexto organizacional das empresas participantes, por meio de visitas imersivas, entrevistas e análise de documentos, possibilitando a compreensão profunda das práticas de inovação e descarbonização. Além disso, a flexibilidade metodológica foi essencial para ajustar o estudo às características específicas dos setores analisados, como solda, laminação e pintura. Por outro lado, a abordagem quantitativa complementou a análise ao fornecer dados objetivos e mensuráveis, como as estimativas dos fatores de emissão de CO₂ a partir do consumo de energia, possibilitando a identificação de padrões e pontos de destaque no processo produtivo. Essa integração entre as abordagens qualitativa e quantitativa permitiu entender os desafios e limitações da pesquisa, e fundamentar a construção do *roadmap* de descarbonização com base em evidências práticas e métricas, garantindo maior aplicabilidade e relevância ao setor de componentes automotivos.

- Imersão

A etapa de imersão foi fundamental para compreender o funcionamento das operações nas empresas participantes e identificar os principais pontos de emissão de CO₂ no processo produtivo. Durante as visitas imersivas, foram observados diretamente os fluxos produtivos desde a chegada da matéria-prima até a separação dos produtos para envio, com ênfase nos setores de solda, laminação e pintura, previamente identificados como setores de maior

relevância para a análise das emissões de CO₂. Essa abordagem permitiu o levantamento de dados primários relacionados aos fatores de emissão, consumo de energia e às práticas organizacionais, além de possibilitar uma interação direta com os operadores e gerentes responsáveis por cada etapa do processo. A imersão envolveu a realização de anotações de campo e a coleta de documentos internos, respeitando as políticas da empresa que restringem o uso de registros fotográficos. Ainda assim, essa abordagem permitiu a coleta de informações essenciais para o mapeamento detalhado das operações, realizado por meio do VSM Green.

- Reuniões Presenciais

As reuniões presenciais desempenharam um papel estratégico na troca de informações entre os pesquisadores e os representantes das empresas. Realizadas no início e ao longo do desenvolvimento da pesquisa, essas reuniões tiveram como objetivos apresentar a proposta do estudo, alinhar expectativas e detalhar os objetivos das etapas seguintes, como o mapeamento de processos e a coleta de dados sobre emissões de carbono. Durante as reuniões, os participantes puderam validar informações obtidas nas imersões, fornecer dados adicionais e discutir possíveis barreiras e oportunidades relacionadas à implementação de estratégias de descarbonização. Esse formato de interação direta foi essencial para fortalecer o vínculo de cooperação e assegurar a qualidade e a aplicabilidade das informações coletadas.

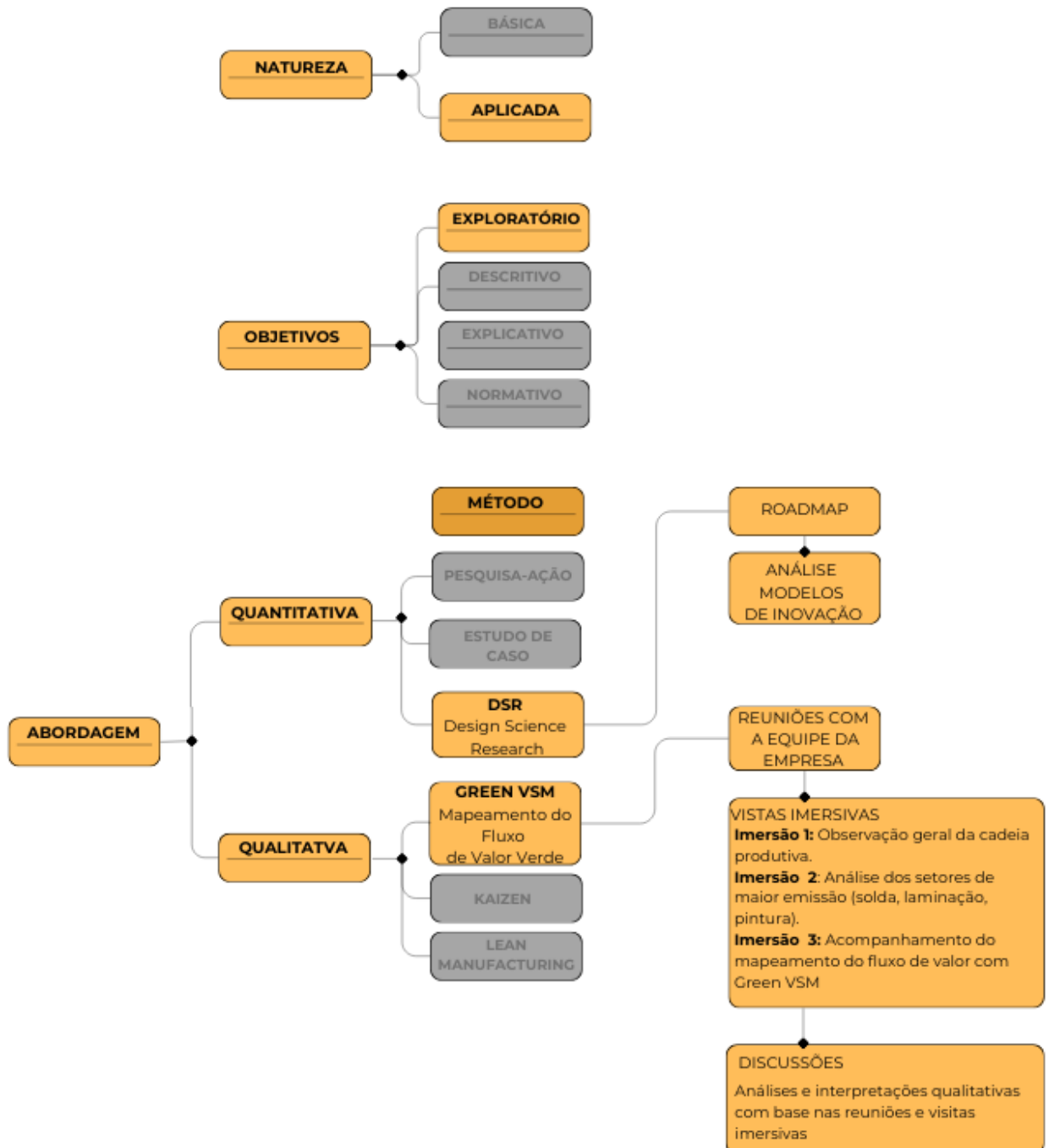
- Reuniões Remotas

As reuniões remotas foram utilizadas como complemento às visitas presenciais, permitindo a continuidade da pesquisa e a manutenção do diálogo com as empresas participantes de maneira mais ágil e flexível. Essas reuniões serviram para esclarecer dúvidas, compartilhar resultados parciais, validar os dados obtidos nas visitas imersivas e ajustar o planejamento das etapas seguintes. Ferramentas digitais, como videoconferências e compartilhamento de documentos online, foram empregadas para facilitar a comunicação entre os pesquisadores e os representantes das empresas, especialmente em momentos em que a interação presencial não era viável. Essa abordagem híbrida garantiu uma coleta de dados contínua e eficiente, promovendo a integração de informações qualitativas e quantitativas necessárias para o desenvolvimento do *roadmap* de descarbonização.

Ao combinar imersões, reuniões presenciais e remotas, a pesquisa adotou uma abordagem de natureza aplicada, de maneira que os dados fossem coletados de forma

abrangente e validada por diferentes atores envolvidos no processo produtivo. Essa integração permitiu a análise das práticas atuais e a identificação de oportunidades para a construção de um *roadmap* estratégico e viável para a redução das emissões de CO₂.

Figura 23 - Classificação da Pesquisa



Fonte: Autora (2025)

Quadro 6 Conceito do Design Science Research

CONCEITO	DESCRIÇÃO
DEFINIÇÃO DO DESIGN SCIENCE	Ciência que busca consolidar conhecimentos sobre o design e desenvolvimento de soluções para melhorar os sistemas exigentes, resolver problemas e criar artefatos.
ARTEFATO	Algo que é feito pelo homem; uma interface entre o ambiente interior e exterior de um determinado sistema
SOLUÇÕES SATISFATÓRIAS	Soluções suficientemente adequadas para o contexto em questão; as soluções devem serviáveis para a realidade e não necessariamente soluções ótimas.
CLASSES DE PROBLEMAS	Organização que norteia a trajetória e desenvolvimento do conhecimento no contexto do design science
VALIDADE PRAGMÁTICA	Busca garantir a utilidade da solução especificidades do ambiente de aplicação e as reais necessidades dos interessados na solução

Fonte: Adaptado de Dresh et al (2015)

A *Design Science* tem como papel principal a concepção e validação de sistemas que ainda não foram desenvolvidos, seja por meio da criação, recombinação ou modificação de produtos, processos, softwares ou métodos, com o propósito de melhorar as condições existentes. No entanto, conforme Lacerda et al. (2013, p. 744), o conhecimento gerado pela *Design Science Research* não é descritivo ou explicativo, mas sim prescritivo. Assim, o método foca em demonstrar a "utilidade do artefato" proposto.

Para responder à questão de pesquisa, foi adotada a abordagem metodológica *Design Science Research* (DSR) para o desenvolvimento de um *Roadmap* Estratégico para Descarbonização. Essa abordagem inclui etapas como identificação do problema, definição dos objetivos, desenvolvimento do artefato, demonstração de sua eficácia e avaliação empírica. A DSR permite a criação de soluções práticas, aliada à validação e comunicação dos resultados, promovendo tanto a inovação quanto a melhoria contínua de sistemas existentes (DRESCH et al., 2020). No presente estudo, a metodologia foi adaptada às necessidades específicas de implementação de estratégias de redução de carbono no contexto da manufatura de componentes automotivos.

Tabela 1 Diferenças entre Ciências Tradicionais e o Design Science

Categoria	Ciências Tradicionais (naturais e sociais)	Design Science
Objetivo	Entender fenômenos com base na objetividade consensual, por revelar padrões gerais e as forças que explicam esses fenômenos.	Criar ou melhorar sistemas para alcançar melhores resultados.
Modelo	Ciências naturais e outras disciplinas que adotam abordagem científica.	Projetos e engenharia como arquitetura, engenharia aeronáutica, ciência da computação.
Visão de conhecimento	Representacional: Representar o mundo como é; natureza de pensamento descritivo e analítico. Busca por conhecimentos gerais e válidos; hipótese, formulação e teste.	Pragmático: Conhecimento aplicado; natureza de pensamento normativo, sintético; O Design Science pressupõe que cada situação é única, e baseia-se em propósitos e soluções ideais, pensamento sistêmico e informações limitadas; enfatiza a participação e experimentação pragmática.
Natureza dos objetos	Fenômenos organizacionais como objetos empíricos, com propriedade descritiva e bem definida, que podem ser efetivamente estudados por uma posição de observador.	Problemas e sistemas organizacionais como objetos artificiais com propriedade descritiva, imperativa, baixa definição, sem exigência de ações de rotina. Estudados por agentes em posições internas com alvos em propósitos e sistemas ideais.
Foco do desenvolvimento da teoria	Descoberta de causas gerais pelas relações entre variáveis (expresso em declarações hipotéticas): A hipótese é válida? As conclusões ficam dentro dos limites da análise.	Um conjunto integrado de proposições funciona em uma determinada situação (problema)? O desenvolvimento de novos artefatos tende a se mover para fora dos limites da definição inicial da situação.

Fonte: DRESCH, A. (2015)

PIMENTEL.M., et al;(2020) explica que o DSR é uma abordagem com dois objetivos principais: (1) criar um artefato para destinar a solução para uma situação particular (2) produzir novas percepções técnicas e científicas. Ele destaca que a competência técnica exigida para a criação de um artefato difere da competência científica. Embora um não seja mais ou menos importante que o outro, é essencial reconhecer que são tipos de saberes distintos, ainda que muitas vezes sejam confundidos.

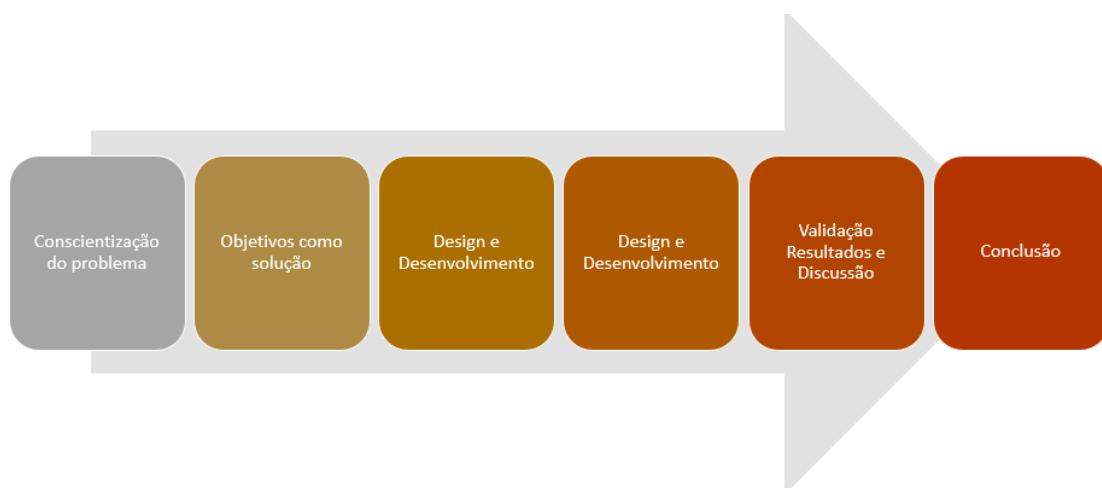
2.3 Iteração do Processo de produção de componentes automotivos mediado pelo DSR

A iteração do processo de produção de componentes automotivos mediado pelo *Design Science Research* (DSR) é estruturada em ciclos que integram análise, desenvolvimento e avaliação contínuos.

Esse método proporciona uma abordagem sistemática e estruturada para identificar os principais desafios relacionados às emissões de CO₂ ao longo das etapas produtivas. Por meio da aplicação do VSM Green, é possível mapear detalhadamente os fluxos de valor, permitindo a visualização dos pontos críticos de emissão e seus respectivos impactos ambientais. Além disso, essa abordagem facilita a identificação de oportunidades de melhoria, promovendo a adoção de estratégias mais sustentáveis e eficientes para a redução de carbono no processo de manufatura.

Conforme Lapão et al. (2017), a metodologia *Design Science Research* (DSR) compreende cinco etapas ou atividades fundamentais. Essas fases incluem a identificação de um problema a ser resolvido, a definição dos objetivos da solução, o desenvolvimento do artefato, a demonstração de sua eficácia e a avaliação empírica. Essa estrutura sistemática permite que os pesquisadores não apenas criem soluções práticas, mas também validem e comuniquem os resultados obtidos, promovendo uma conexão entre teoria e prática no processo de pesquisa.

Figura 24 - Etapas do Processo *Design Science Research* (DSR)



Fonte: Autora (2025) Adaptado de Lapão et al. (2017)

Figura 25 - Sistemática da Design Science Research (DSR)



Fonte: Autora (2025) – Baseado em Bax (2015) e Lacerda et al. (2013)

O desenvolvimento de um *roadmap* estratégico para a descarbonização no setor automotivo segue uma abordagem estruturada baseada na metodologia *Design Science Research* (DSR). A tabela 8 apresenta as etapas desse processo, desde a identificação do problema até a comunicação dos resultados. Inicialmente, foram analisadas as emissões de CO₂ nos processos produtivos da empresa, destacando os setores de solda, laminação e pintura como os principais emissores. A partir dessa análise, foram estabelecidos objetivos claros para a criação de um *roadmap* alinhado às metas de sustentabilidade, utilizando o Green VSM para identificar oportunidades de redução de carbono. O design e desenvolvimento do *roadmap* envolveu visitas imersivas e a coleta de dados primários e secundários, permitindo a construção de um artefato aplicável ao contexto real da empresa. A fase de demonstração buscou validar o *roadmap* na prática, enquanto a avaliação comparou os resultados obtidos com as práticas atuais da empresa, identificando possíveis melhorias.

Tabela 2 - Estruturação do método *Design Science Research* aplicado a pesquisa para a elaboração do Framework

1. Identificação do Problema e Motivação:
Descrição: Reduzir emissões de CO ₂ nos processos de manufatura de componentes automotivos.
Ações:
Busca na literatura sobre descarbonização, inovação e roadmap.
Análise inicial de todo o setor automotivo, e do relatório de sustentabilidade da empresa.
Identificação dos principais processos indicados como maiores emissores de carbono, sendo eles: (solda, laminação e pintura).
2. Definição dos Objetivos da Solução:
Descrição: Desenvolver um roadmap estratégico para descarbonização.
Ações:
Estabelecer metas específicas de redução de emissões.
Utilizar o Green VSM para identificar pontos críticos de emissão.
Criar um artefato prático e aplicável ao setor.
3. Design e Desenvolvimento:
Descrição: Concepção e construção do artefato (roadmap).
Ações:
Conduzir visitas imersivas à empresa para compreender os processos produtivos.
Coletar dados primários (observações, entrevistas) e secundários (relatórios, banco de dados).
Mapear o fluxo de valor nos setores de solda, laminação e pintura utilizando o Green VSM.
4. Demonstração:
Descrição: Aplicação do roadmap no contexto real da empresa.
Ações:
Identificar oportunidades de melhoria nos processos com base no roadmap.
Alinhar o roadmap com os objetivos da empresa para redução de CO ₂ .
5. Avaliação:
Descrição: Avaliar a eficácia e aplicabilidade do roadmap.
Ações:
Comparar o roadmap desenvolvido com práticas atuais da empresa.
Identificar limitações e propor melhorias com base nos resultados.
6. Comunicação:
Descrição: Documentar e compartilhar os resultados da pesquisa.
Ações:
Apresentar o framework e os resultados na dissertação e em eventos acadêmicos.
Sugerir a ampliação da análise para o escopo 3 de emissões em trabalhos futuros.

Fonte: Elaborado pela Autora (2025)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

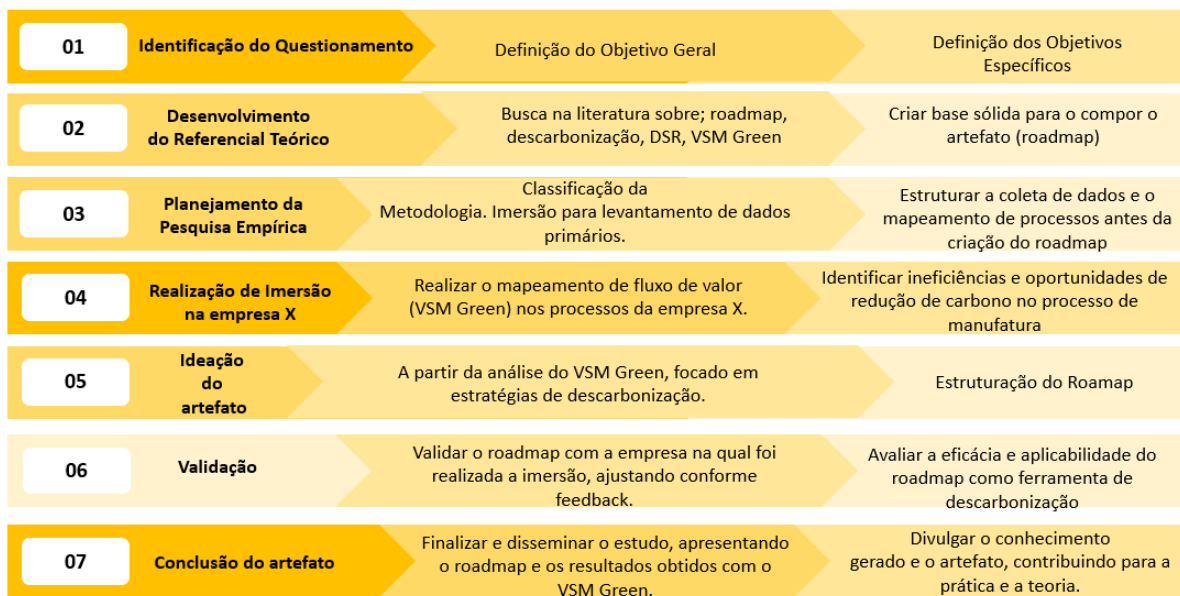
3.1 Planejamento, Programação e Controle dos procedimentos para análise e discussão dos resultados

O delineamento da pesquisa refere-se ao planejamento detalhado dos procedimentos metodológicos para a coleta, análise e interpretação dos dados. Nesse contexto, a metodologia *Design Science Research* (DSR) é incorporada de forma central à estrutura da pesquisa, orientando o desenvolvimento do artefato principal, que neste caso é o *Roadmap* para descarbonização.

Portanto para responder à questão de pesquisa "Qual o papel dos modelos de inovação e *Roadmaps* adotados pelas empresas quanto à redução de carbono?", é fundamental entender como a *Design Science* se aplica à criação de soluções práticas.

Com isso, os conceitos apresentados foram adaptados de acordo com os conceitos de DRESCH, A. (2015), Figura 29.

Figura 26 - Estrutura da Pesquisa mediada pelo DSR com a definição dos objetivos geral e específicos mediados pela construção do ROADMAP, Processo de Descarbonização e o Green VSM de componentes automotivos.

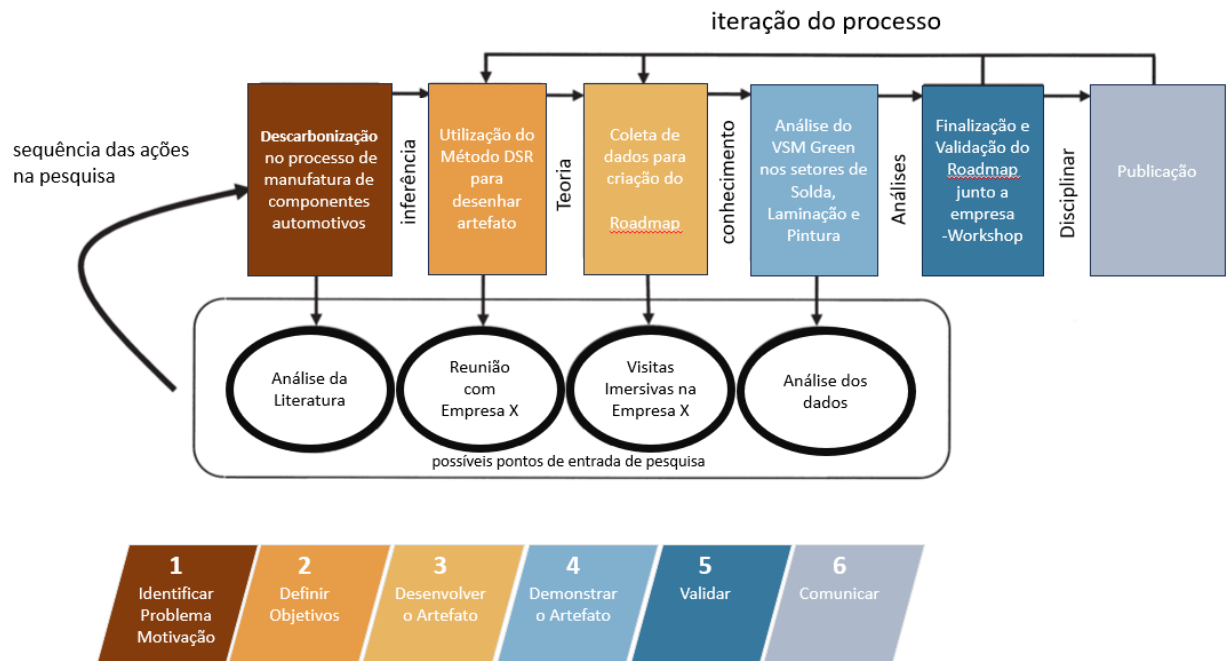


Fonte: Autora (2025)

Por meio de visitas imersivas e reuniões online, o processo itera entre a coleta e análise de dados, o desenvolvimento do *roadmap* de descarbonização e a validação dos resultados com

os stakeholders, garantindo que o artefato proposto atenda aos objetivos de sustentabilidade e inovação Figura 27.

Figura 27 -Iteração do Processo DSR aplicado ao percurso da pesquisa e a proposta do Framework como Produto e Processos Tecnológicos – PPT's



Fonte: Autora (2025) adaptado de (Peffer et al, 2008)

3.1.1 Planejamento na construção do Roadmap de componentes automotivos mediado pelo DSR

A pesquisa em questão buscou desenvolver um *Roadmap* de descarbonização para a Empresa X, com foco nos setores de solda, laminação e pintura, identificados como os principais emissores de carbono no processo produtivo. Fundamentada na metodologia de *Design Science Research* (DSR), a análise iniciou-se pela busca na literatura sobre descarbonização, *Roadmaps* e metodologias de mapeamento sustentável, como o Green VSM, criando uma base teórica para a criação do artefato.

A fase de imersões na empresa permitiu a observação mais detalhada desses setores, com o mapeamento do fluxo de valor e a identificação de ineficiências e oportunidades de redução de emissões. Os dados parciais obtidos nortearam a ideação do *Roadmap*, direcionando

as ações para as áreas críticas, com o objetivo de otimizar a eficiência energética, reduzir desperdícios e introduzir práticas mais sustentáveis.

A estrutura do *Roadmap* atual da empresa representa a visão empresarial, delineando as metas, iniciativas e processos necessários para otimizar suas operações e fortalecer sua posição no mercado. Para o desenvolvimento do artefato desta pesquisa, o *Roadmap* foi realizado por parâmetros acadêmicos de natureza aplicada, sendo adotada de uma abordagem sistemática que integrou práticas de *Design Science Research* (DSR). Contudo na metodologia constatou a coleta de dados qualitativos e quantitativos, a realização de workshops colaborativos com stakeholders da empresa para avaliação do artefato. Sendo assim, a pesquisa foi iniciada por meio da identificação da problemática quanto ao conceito de descarbonização e resolução aplicabilidade de metodologia dentro das empresas, quanto ao processo de descarbonização e aplicação de *Roadmap*.

Quadro 7 Quadro de Resultados e Discussão

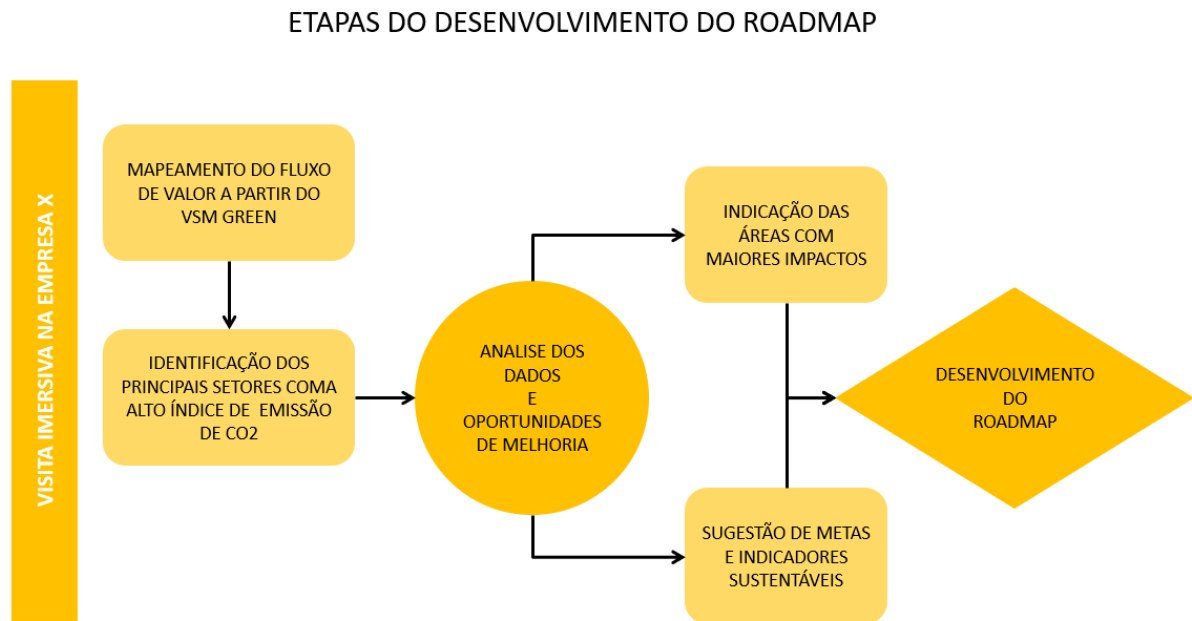
Aspecto	Resultados e Discussão
Objetivo Principal	Identificação dos modelos de inovação aplicados pelas empresas para a redução de carbono e a eficácia do roadmap na implementação desses modelos.
Foco	Análise dos processos de inovação e descarbonização adotados pelas empresas.
Indicadores	Indicadores de emissões de CO ₂ , uso de tecnologias sustentáveis, e impacto das práticas de inovação nas reduções de emissões.
Abordagem	Metodologia DSR com o uso de VSM Green para mapeamento do fluxo de valor e desenvolvimento do roadmap para a redução de emissões.
Perspectiva	Aumento da eficácia das estratégias de inovação para descarbonização e melhoria dos processos produtivos com base nos dados obtidos durante as visitas imersivas e reuniões online.
Limitações	As limitações encontradas incluem a escassez de dados completos sobre as emissões de escopo 3 e a falta de informações detalhadas no relatório de sustentabilidade das empresas, que se concentram apenas nos escopos 1 e 2. Além disso, as empresas selecionadas podem não representar a totalidade do setor, o que pode influenciar a generalização dos resultados.

Fonte: Autora (2025)

Após a definição dos conceitos de *Roadmap* e redução de carbono, foram realizadas visitas imersivas na empresa X, a qual foi selecionada para a observação do processo produtivo

e manufatura. Essa escolha ocorreu em virtude de focar no processo da cadeia produtiva e avaliação de Green VSM, e a construção do *Roadmap*, para a descarbonização no processo produtivo, Figura 30.

Figura 28 - Etapa metodológica do desenvolvimento do Processos e Produtos Tecnológicos PPT , adaptado a componentes automotivos



Fonte: Autor (2024)

O desenvolvimento do *Roadmap*, foi validado junto à empresa, sendo ajustado conforme o feedback dos stakeholders, em um processo iterativo próprio do DSR, buscando uma inerência a aplicabilidade da prática e a mitigação das emissões. Por fim, o artefato concluído foi consolidado e os resultados disseminados, contribuindo tanto para a empresa quanto para o campo de estudo sobre inovação tecnológica e sustentabilidade.

3.1.1 Construção do *Roadmap* de componentes automotivos mediado pelo DSR

As imersões realizadas na empresa X foram estruturadas para compreender os processos produtivos, identificar os principais fatores de emissão de CO₂ e coletar dados essenciais para o desenvolvimento do *Roadmap* Estratégico para Descarbonização. Esse processo foi conduzido por meio das seguintes etapas:

- Primeira Imersão – Visão Geral e Alinhamento da Pesquisa:

Na primeira visita à empresa X, foi realizada uma reunião inicial para apresentar e explicar a proposta da pesquisa aos representantes da organização. Em seguida, ocorreu uma visita imersiva para o conhecimento da cadeia produtiva de forma geral, abrangendo todo o fluxo de operações, desde a chegada da matéria-prima até a separação dos produtos para envio. Essa abordagem inicial foi fundamental para fornecer uma visão ampla das operações, identificar os principais processos e compreender o funcionamento integrado das etapas produtivas.

- Segunda imersão – Foco nos Setores de Maior Impacto:

Na segunda imersão, uma reunião com os responsáveis permitiu direcionar a análise para os setores de solda, laminação e pintura, identificados como os maiores emissores de CO₂. Com base nessa decisão, utilizou-se o método de Mapeamento do Fluxo de Valor Verde (Green VSM) para examinar os fatores que contribuem para as emissões e identificar os valores agregados em cada etapa desses processos. Durante essa fase, foi possível coletar informações iniciais sobre os fluxos produtivos e as emissões específicas dos setores selecionados.

- Terceira imersão – Avanço nas Coletas e Colaborações Internas:

Na terceira imersão, foi realizada uma interação mais detalhada com o engenheiro responsável pela energia, que forneceu informações sobre a setorização do consumo energético em cada área. Ele explicou que o cálculo atual de consumo de energia é baseado em estimativas, pois os Quadros Gerais de Baixa Tensão (QGBT) ainda não estão completamente separados para os setores analisados. Isso impossibilitou a obtenção de dados precisos sobre o consumo de energia nos setores de solda, laminação e pintura.

Além disso, o engenheiro de manutenção acompanhou a visita e mostrou os parâmetros técnicos relevantes para a coleta de informações do VSM. Durante essa etapa, também foi possível discutir os desafios relacionados à medição energética e compreender os esforços iniciais da empresa para setorização do consumo.

- Colaborações Internas:

Ao longo das visitas imersivas, houve uma interação contínua com diferentes profissionais da empresa. O engenheiro de qualidade desempenhou um papel essencial, atuando como intermediário entre a pesquisadora e as demais áreas, garantindo que as informações necessárias fossem acessadas com eficiência. Na segunda imersão, a engenheira de sustentabilidade contribuiu ao fornecer informações relevantes sobre práticas e iniciativas adotadas pela empresa para redução de emissões de CO₂. Essa colaboração interdisciplinar foi

crucial para a coleta de dados e entendimento do cenário de descarbonização nos setores produtivos analisados.

- Quarta imersão – Consolidação de Dados e Validação Final:

Na última visita, o foco foi consolidar os dados coletados e validar as informações obtidas anteriormente. A presença do engenheiro de manutenção foi fundamental para detalhar as operações nos três setores analisados, enquanto o engenheiro de qualidade continuou a dar suporte nas interações com outras áreas da empresa. A análise das emissões e do consumo energético foi discutida com base nas informações disponíveis, reforçando os desafios e limitações relacionados à ausência de medições setorializadas completas.

Essas imersões, realizadas de forma colaborativa e integrada, foram essenciais para entender os processos produtivos, identificar os principais fatores de emissão e coletar os dados necessários para o desenvolvimento do *Roadmap* Estratégico para Descarbonização, adaptado à realidade da empresa X. Com as informações coletadas, iniciou-se a construção do *Roadmap* para a redução das emissões de GEE.

No entanto, os resultados parciais da pesquisa revelaram algumas limitações para elaboração do *Roadmap*, especialmente em relação aos dados obtidos e às informações presentes no relatório sustentável da empresa, ao qual será considerado apenas o escopo 1 e 2 das emissões, sugerindo escopo 3 para futuros trabalhos. Essa limitação destaca a necessidade de uma coleta de dados mais abrangente e detalhada, que inclua outras fontes de emissões e permita uma análise mais completa e eficaz para o desenvolvimento de estratégias de redução de carbono. A Figura 29 ilustra o desenvolvimento do *Roadmap* proposto, direcionado à criação de um framework específico para ambientes produtivos de rodas, integrando conceitos de inovação, gestão ambiental e estratégias de mitigação das emissões de carbono. Esse *Roadmap* busca organizar de forma estruturada as etapas necessárias para a implementação de ações sustentáveis, considerando desde a caracterização inicial dos processos produtivos até a definição de metas e indicadores de desempenho ambiental. Mesmo com as limitações identificadas, o modelo proposto se apresenta como uma ferramenta para apoiar a tomada de decisão nas organizações, ao evidenciar pontos críticos e oportunidades de melhoria no ciclo produtivo. Além disso, sua aplicação pode contribuir para a sistematização de práticas sustentáveis, a identificação de gargalos ambientais e a construção de um plano de ação alinhado às diretrizes corporativas e regulatórias. Ressalta-se, ainda, que a inclusão futura do escopo 3 ampliará significativamente o alcance do framework, possibilitando uma gestão mais integrada e eficiente das emissões ao longo de toda a cadeia de valor, Figura 29.

Figura 29 - Desenvolvimento do *Roadmap* para a criação do framework em ambientes produtivos de rodas



Fonte: Autora (2025)

a) Diagnóstico

A fase inicial envolveu visitas imersivas à empresa X para compreensão detalhada dos processos produtivos e identificação de setores críticos, como solda, laminação e pintura. Foram coletados dados primários, incluindo medições de emissões de CO_2 , consumo energético e tempos de processo. Dados secundários, como relatórios de sustentabilidade e registros internos da empresa, complementaram a análise. Essa etapa seguiu os preceitos do Green VSM, mapeando o estado atual dos fluxos de valor para identificar desperdícios e pontos críticos de emissões.

a) Desenvolvimento do Artefato

O artefato principal, o Roadmap estratégico, foi elaborado com base nos dados coletados e nas diretrizes teóricas do Green VSM e do DSR. A construção seguiu as etapas propostas por Dresch et al. (2015), combinando análise qualitativa e quantitativa para integrar soluções de descarbonização. O Roadmap foi estruturado em marcos temporais, contemplando iniciativas como:

- Substituição de fontes de energia por alternativas renováveis.
- Redução de temperaturas nos processos de laminação e pintura.
- Implantação de sensores IoT para monitoramento em tempo real de emissões e eficiência energética.

b) Validação

A validação do Roadmap foi conduzida por meio de workshops participativos com stakeholders da empresa X, garantindo alinhamento estratégico e viabilidade prática. Feedbacks foram incorporados para ajustes no artefato, como a inclusão de indicadores específicos para monitoramento contínuo. A análise de viabilidade considerou aspectos técnicos, financeiros e organizacionais, assegurando que as soluções propostas fossem exequíveis no contexto da empresa.

c) Coleta e Análise de Dados

Os dados coletados incluíram:

- **Primários:** Emissões de CO₂ estimado por setor de acordo com o consumo de energia elétrica, tempos de ciclo.
- **Secundários:** Relatórios de sustentabilidade e benchmarks.

A análise combinou técnicas qualitativas, como entrevistas e observações diretas, com análises quantitativas para quantificar os impactos das intervenções propostas. Esses métodos permitiram compreender não apenas os desafios da descarbonização, mas também as oportunidades de inovação tecnológica e eficiência operacional.

Os principais obstáculos para a descarbonização industrial, conforme identificado pelas Instituições Financeiras Internacionais (IFIs), incluem a falta de projetos escaláveis e impactantes, bem como riscos de mercado, como o preço competitivo de combustíveis fósseis e a viabilidade comercial incerta de novas tecnologias, como o CCUS. Além disso, a ausência de sinais claros de políticas governamentais e de compromissos de longo prazo atua como uma barreira ao investimento em tecnologias inovadoras de descarbonização.

A falta de estratégias corporativas de longo prazo também limita o avanço de projetos mais robustos. Para mitigar esses desafios, as IFIs sugerem a criação de políticas de transição para emissões líquidas zero que sejam específicas para setores e países, o fortalecimento de mecanismos de financiamento inovadores, como empréstimos vinculados à sustentabilidade, e o uso de instrumentos financeiros de concessão e financiamentos híbridos que combinem

diferentes fontes de capital para atrair o setor privado e promover a descarbonização industrial (OCDE, 2024).

Os principais projetos desenvolvidos pela empresa X, relacionados à redução de emissões de carbono nos escopos 1 e 2, foram analisados como referências de ações adotadas em outras plantas globais, contribuindo como exemplos de estratégias para a descarbonização.

No escopo 1, destacam-se iniciativas como a atualização do sistema de forno de fogo direto (China), projetos de gestão de energia (Santo André - Brasil, e Turquia), a implantação de sistemas de recuperação de calor (Índia), e projetos voltados para o aproveitamento de calor de processo e geração de energia (México), no escopo 2, foram identificados projetos voltados à geração de energia verde (Tailândia), otimização de compressores de ar (Índia e México), gestão de energia (México e Turquia), reparo de vazamentos de ar comprimido e bombas servo-hidráulicas (México), além de iniciativas para eficiência na iluminação e gestão de energia (Santo André, Brasil).

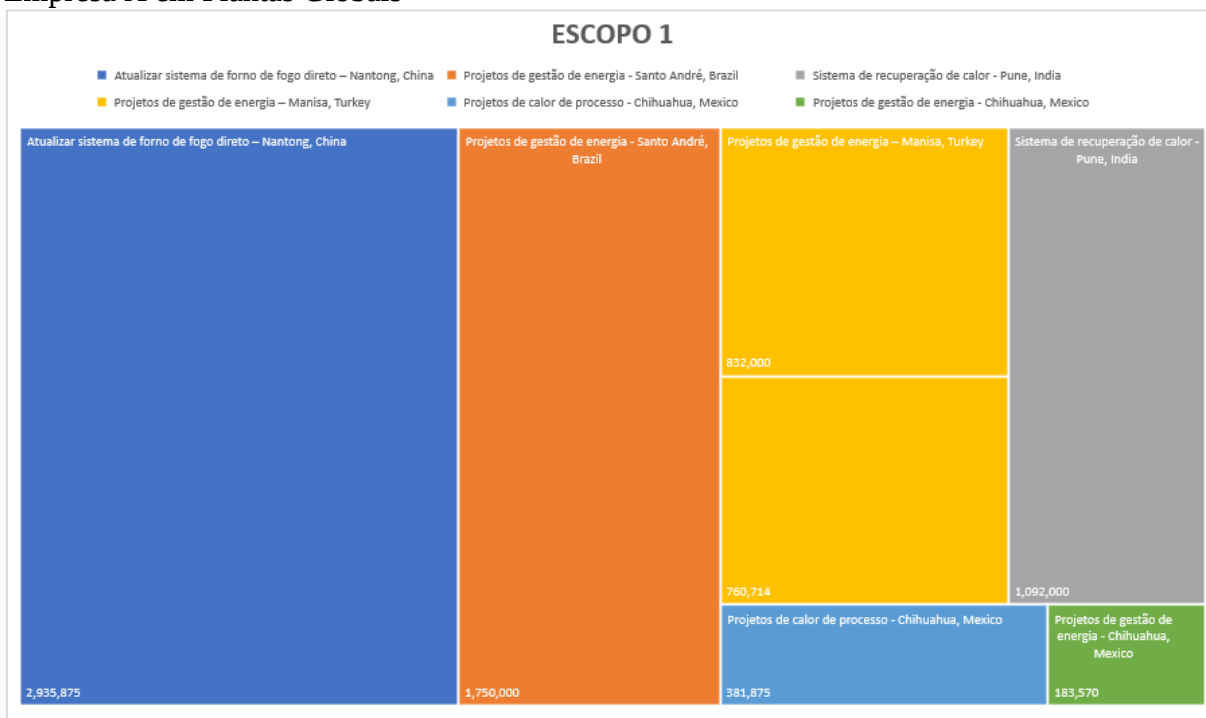
Embora esses projetos sejam oriundos de plantas diferentes da unidade em que foi realizada a imersão, eles oferecem um referencial relevante de boas práticas para a implementação de estratégias de redução de carbono na manufatura de componentes automotivos, ilustrando o compromisso global da empresa com a sustentabilidade.

As Figuras 30 e 31 apresentam a distribuição quantitativa dos projetos relacionados à mitigação das emissões de gases de efeito estufa, categorizados nos Escopos 1 e 2. Tais representações visuais têm por objetivo facilitar a análise comparativa do impacto relativo de cada iniciativa, considerando sua localização geográfica e natureza operacional.

O Escopo 1 refere-se às emissões diretas provenientes de fontes controladas ou de propriedade da organização, como equipamentos industriais e sistemas de combustão. Já o Escopo 2 abrange as emissões indiretas associadas à aquisição de eletricidade gerada por terceiros, sendo um indicador relevante da eficiência energética das operações.

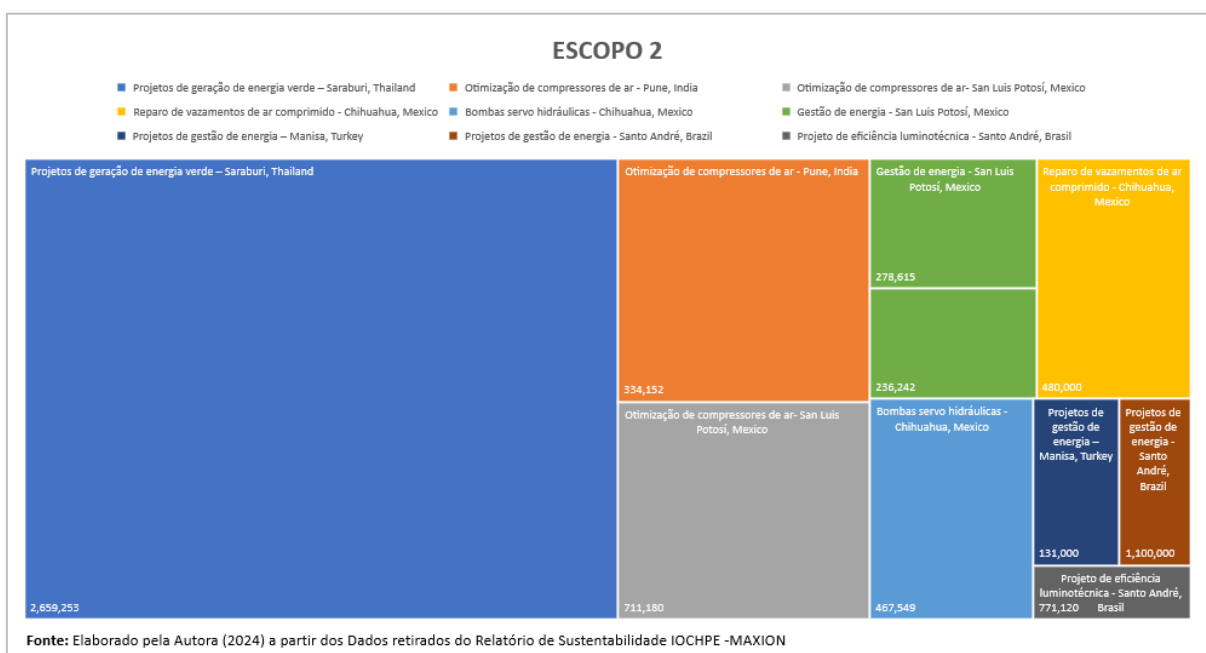
Cada bloco representa um projeto específico, sendo sua dimensão proporcional ao potencial de redução de emissões associado à respectiva ação. A diversidade de localidades e tipos de projeto evidencia o esforço global da organização em integrar práticas sustentáveis em seus processos produtivos, alinhando-se às diretrizes internacionais de governança ambiental, social e corporativa

Figura 30 -Exemplos de Projetos de Redução de Carbono no Escopo 1 Desenvolvidos pela Empresa X em Plantas Globais



Fonte: Autora 2025, baseado em dados secundários

Figura 31 -Exemplos de Projetos de Redução de Carbono no Escopo 2 Desenvolvidos pela Empresa X em Plantas Globais



Fonte: Autora 2025, baseado em dados secundários

A visita de imersão realizada na Empresa X permitiu uma análise inicial dos processos produtivos com foco especificamente nos processos de solda, laminação e pintura. Esses setores foram identificados como pontos-chave para o desenvolvimento do *Roadmap* de descarbonização, uma vez que apresentam elevado consumo energético e são fontes potenciais de emissão de carbono, Quadro 8.

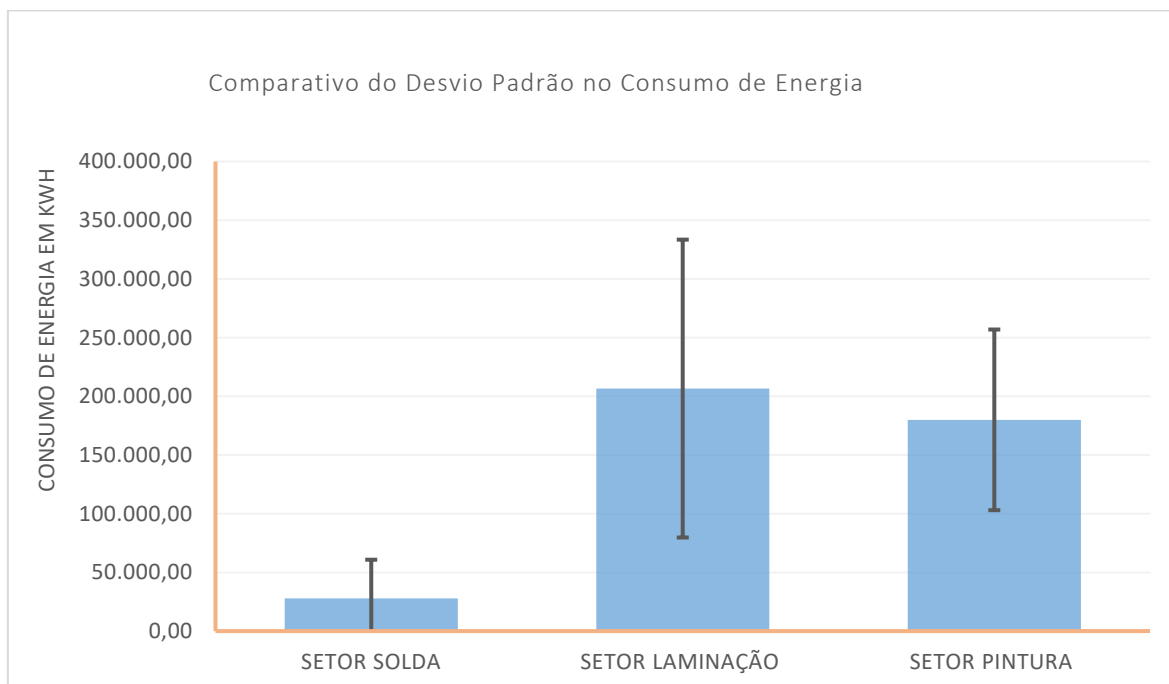
Quadro 8 - Setores de laminação, soldagem e pintura de rodas, etapas críticas, plano de ações para melhoria do processo de descarbonização

Setor/Processo	Etapas Críticas	Justificativa da Criticidade	Ações/Sugestões para Descarbonização
Laminação	Solda	A soldagem consome altas quantidades de energia elétrica.	Utilizar fontes de energia limpa no processo de soldagem.
	Laminar solda à topo	Processo que gera resíduos significativos e consome muita energia.	Reduzir resíduos e otimizar o processo para menor consumo energético.
	Expandir aro	Elevado potencial de desperdício de calor no processo.	Implementar tecnologias de recuperação de calor.
	Teste de estanqueidade	Método atual consome muito tempo e energia.	Usar métodos mais eficientes para reduzir o tempo e consumo de energia.
Solda	Soldar internamente o disco no aro	Alta emissão de CO ₂ devido ao uso de soldagem convencional.	Substituir soldagem convencional por tecnologias de menor emissão, como laser.
	Balancear a roda estaticamente	Uso de materiais pesados aumenta a pegada de carbono no processo.	Reduzir o uso de materiais pesados, buscando alternativas mais leves e sustentáveis.
Pintura	Pré-tratamento	Produtos químicos usados podem ser poluentes e difíceis de reciclar.	Utilizar produtos mais ecológicos e recicláveis.
	Estufa Top-Coat	Alto consumo de energia para controle térmico do processo.	Otimizar o controle térmico para reduzir o consumo de energia.

Fonte: Autora (2025)

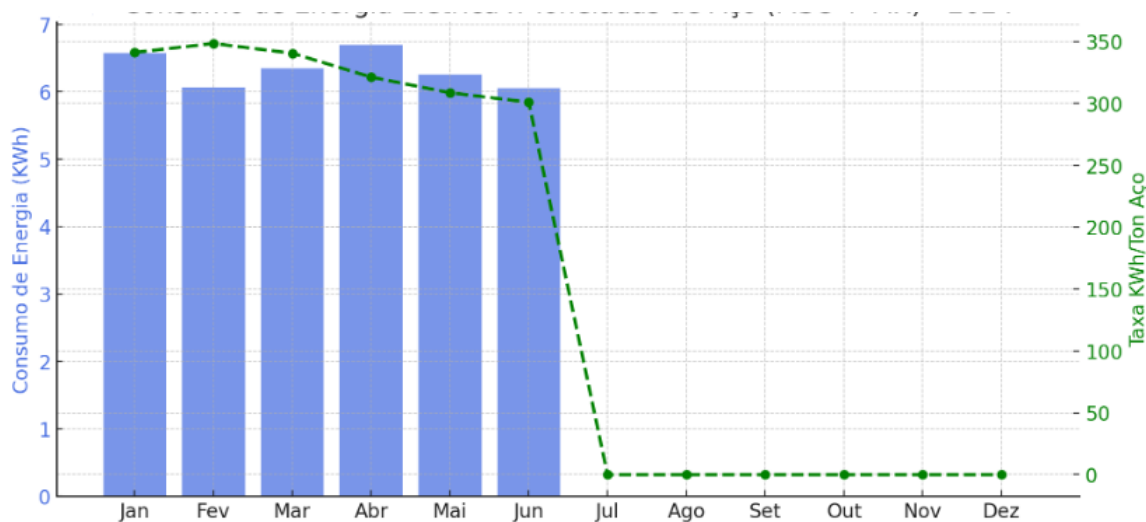
Os processos de laminação e usinagem do disco desempenham parte do processo na produção de componentes automotivos, agregando valor ao produto final. No entanto, esses processos são notórios por seu alto consumo de energia, o que os torna alvos prioritários para a busca de soluções mais eficientes. A elevada demanda energética desses setores não só impacta os custos de produção, como também contribui para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), gerando desafios tanto econômicos quanto ambientais, Figura 32.

Figura 32 - Estimativa de consumo de energia por setor e desvio padrão



Fonte: Autora (2025) com base em dados secundários

Figura 33 -Consumo de energia elétrica x toneladas de aço – 1º semestre de 2024 – Empresa X



Fonte: Autora (2025) com base em dados secundários

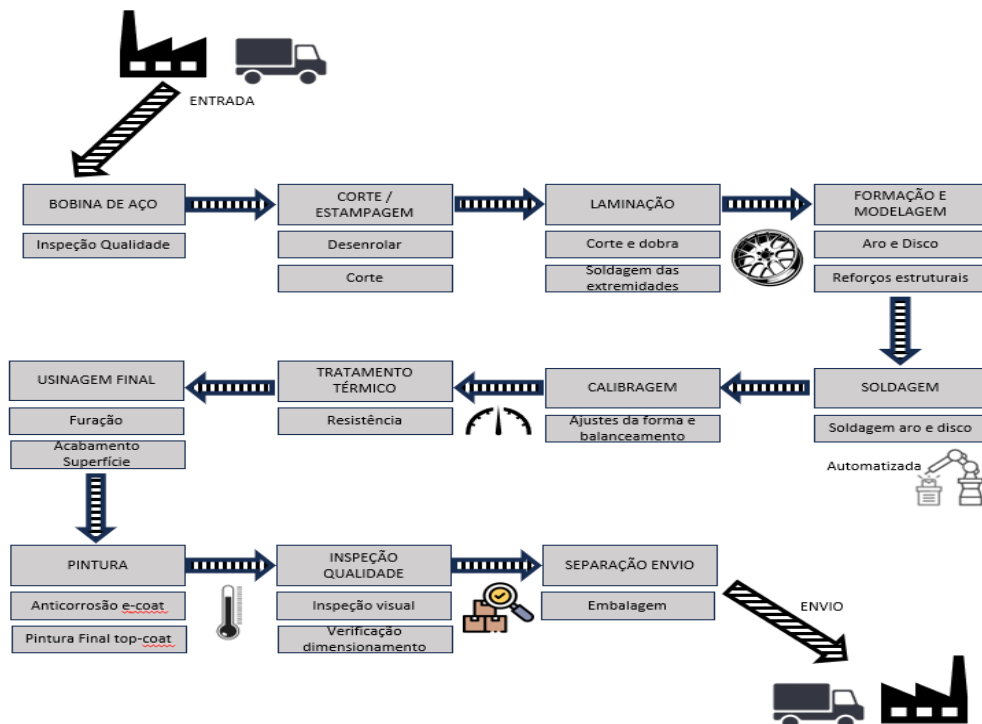
O gráfico apresentado ilustra o consumo de energia elétrica em kWh por tonelada de aço produzido da empresa x no primeiro semestre de 2024. Observa-se uma variação mensal no consumo, com valores mais elevados nos primeiros meses do ano, atingindo um pico em abril, seguido por uma tendência de redução nos meses subsequentes. A taxa de consumo específica (kWh/ton aço) também acompanha essa variação, começando em 363,57 kWh/ton em janeiro e apresentando uma redução progressiva até agosto, onde atinge 301,04 kWh/ton.

3.1.2 Mapeamento do processo de fabricação de rodas

A análise do processo de fabricação vai além da simples descrição de etapas produtivas, englobando também a identificação de valores agregados e perdas ao longo do fluxo de trabalho. Essa abordagem é fundamental para a aplicação de metodologias como o Value Stream Mapping (VSM) e sua variação sustentável, o Green VSM, que permitem mapear tanto os fluxos de materiais quanto as emissões associadas a cada etapa.

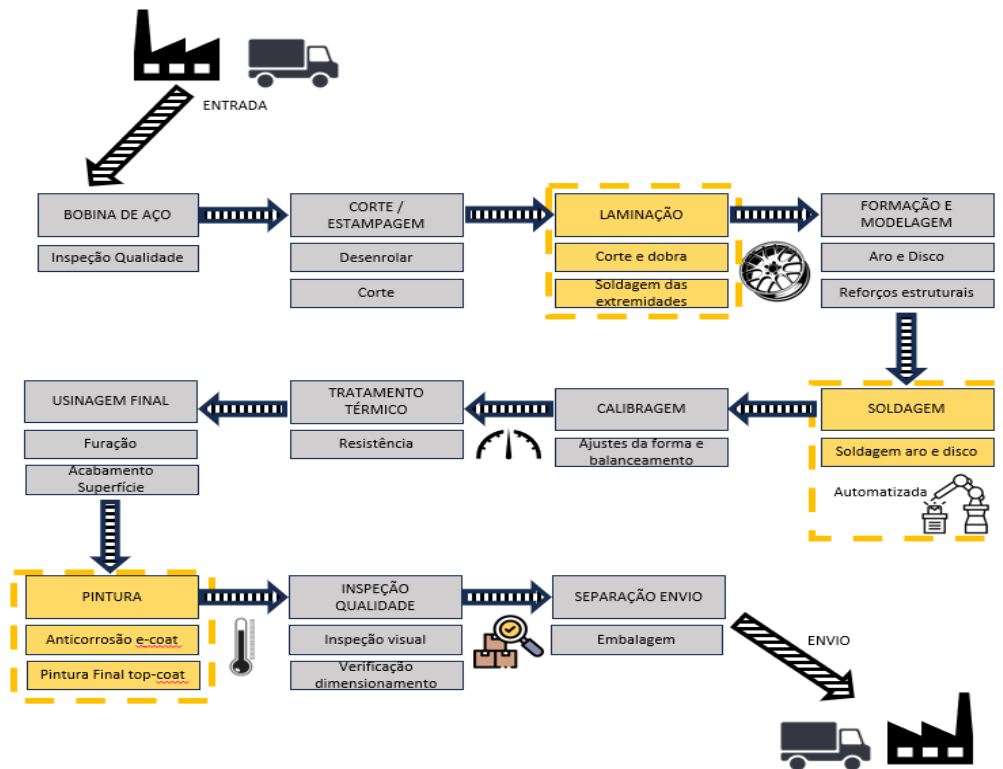
Neste capítulo, são detalhadas as etapas de fabricação de rodas, desde a chegada da matéria-prima até o produto final, com foco em setores críticos como solda, laminação e pintura, previamente identificados como os maiores responsáveis pelas emissões de GEE. O mapeamento realizado é parte integrante da construção do roadmap estratégico para a redução de carbono, fornecendo uma base para a proposição de ações que alinhem os objetivos de inovação tecnológica e sustentabilidade, em conformidade com as premissas da metodologia Design Science Research (DSR).

Figura 34 – Detalhamento do Processo de Produção de Rodas



Fonte: Autor (2024)

Figura 35 - Processo de Produção de Rodas – Identificação dos 03 setores para atuação

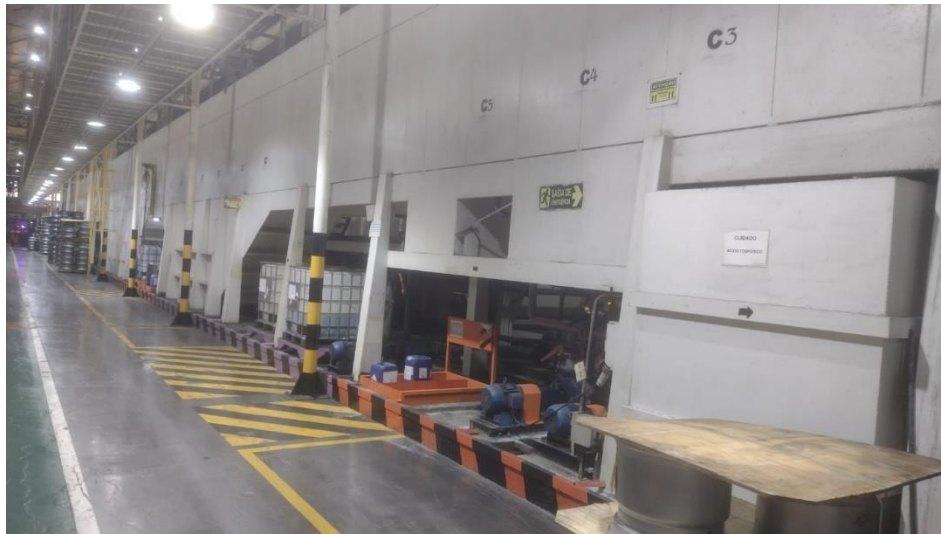


Fonte: Autor (2024)

O objetivo deste mapeamento é fornecer uma visão clara e estruturada do processo produtivo, facilitando a análise de dados qualitativos e quantitativos sobre as emissões e subsidiando decisões que possam transformar os processos produtivos em modelos mais sustentáveis. Desta forma o mapeamento de processos às estratégias de descarbonização visou contribuir para o avanço de práticas industriais alinhadas aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

As imagens a seguir ilustram as áreas-chave do processo produtivo que foram analisadas durante a visita imersiva à empresa X. Cada uma delas representa uma etapa crítica no processo de manufatura, com foco nas fontes de emissões de CO₂ e nas oportunidades para adoção de práticas mais sustentáveis.

Figura 36 - Tratamento Superficial e Pintura



Fonte: Maxion Wheels (2025)

A Figura 36 apresenta o processo de tratamento superficial e pintura, etapas que envolvem o uso de substâncias químicas e altas temperaturas. Essas operações são responsáveis por grande parte das emissões de gases de efeito estufa, especialmente pela queima de compostos voláteis presentes nos solventes utilizados na pintura. A análise dessa área contribuiu para entender os pontos críticos de emissão, e a identificação de possíveis melhorias.

Figura 37 - Área de Montagem e Solda



Fonte: Maxion Wheels (2025)

A área de montagem e solda, mostrada na figura 37, é uma das etapas mais intensivas em energia no processo de fabricação de componentes automotivos. A soldagem, especialmente a resistência elétrica, gera altas temperaturas e utiliza grandes quantidades de energia elétrica, contribuindo para as emissões de CO₂.

Figura 38 - Laminação dos Aros



Fonte: Maxion Wheels (2025)

Na figura 38, a etapa de laminação dos aros é ilustrada. Este processo envolve a deformação dos materiais metálicos por compressão. A laminação é caracterizada pelo consumo elevado de energia, principalmente elétrica, o que resulta em uma emissão significativa de CO₂.

3.1.3 Green VSM – Mapeamento de Fluxo de Valor nos processos de Pintura, Soldagem e Laminação

Esta seção apresenta a análise dos setores identificando os principais pontos de impacto ambiental e oportunidades de aprimoramento. A partir da aplicação do Green VSM, foram levantadas as etapas críticas em termos de consumo energético e emissões de gases, permitindo uma visão abrangente do desempenho sustentável desses processos. O mapeamento de fluxo de valor (VSM) aplicado com diretrizes ambientais, conhecido como Green VSM, é uma ferramenta estratégica para identificar desperdícios, avaliar o consumo energético e propor melhorias nos processos produtivos (BUDIHARDJO; HADIPURO, 2021)

A análise dos processos produtivos na fabricação de componentes automotivos focou nos setores de **solda**, **laminação** e **pintura**, identificados como os pontos mais críticos de emissões de carbono. No setor de solda, observou-se significativa emissão de gases e fumaça, associada ao processo de derretimento da solda e ao elevado consumo de energia. A laminação e usinagem do disco agregam valor significativo ao produto final, mas são grandes consumidores de energia, Figura 35.

Quadro 9 - Valores estimativos das principais atividades do setor de laminação

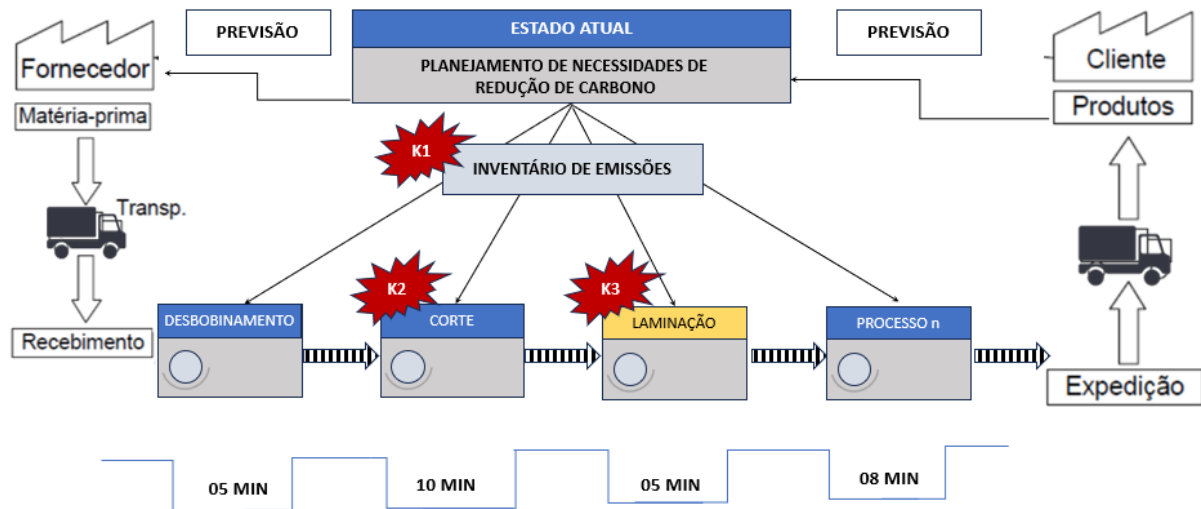
LAMINAÇÃO	Etapa	Atividade	Tempo (min)	Tipo de Valor
	1. Recebimento	Receber bobinas de aço/alumínio	5	Não agregado
	2. Desbobinamento	Preparar e alimentar a máquina	10	Não agregado
	3. Corte	Cortar material em formatos	5	Agregado
	4. Laminação	Moldar em formato circular	8	Agregado
	Total	Laminação completa	28	50% Agregado

Fonte: Autora (2025)

Resumo do Setor: (Os valores são aproximados e podem variar de acordo com diferentes condições)

- Tempo total: 28 minutos por lote.
- Atividades que agregam valor: 13 minutos (46%).
- Atividades que não agregam valor: 15 minutos (54%).
- Observações: A preparação e o desbobinamento representam oportunidades para redução de tempo não produtivo

Figura 39 – Green VSM - Mapeamento de Fluxo de Valor / Laminação



Fonte: Autora (2025)

Quadro 10 - Valores estimativos das principais atividades do setor de solda

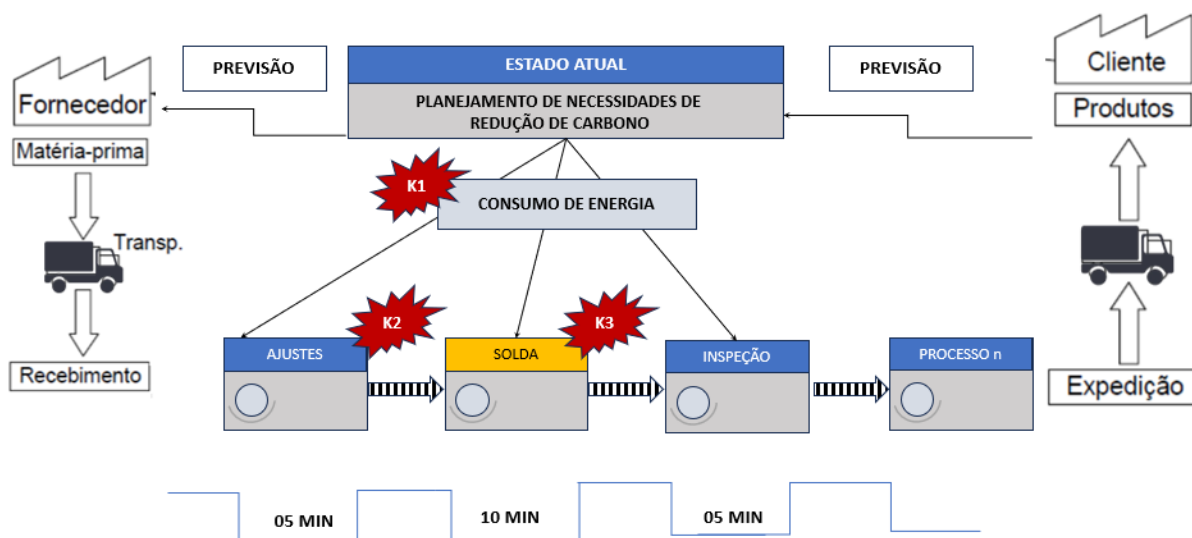
	Etapa	Atividade	Tempo (min)	Tipo de Valor
SOLDA	1. Recebimento	Receber peças laminadas	5	Não agregado
	2. Ajuste	Alinhar e posicionar peças para solda	5	Não agregado
	3. Solda	Solda robótica (aro + centro da roda)	10	Agregado
	4. Inspeção	Verificação por ultrassom ou raio-X	5	Agregado
	Total	Solda completa	25	60% Agregado

Fonte: Autora (2025)

Resumo do Setor: (Os valores são aproximados e podem variar de acordo com diferentes condições)

- Tempo total: 25 minutos por peça.
- Atividades que agregam valor: 15 minutos (60%).
- Atividades que não agregam valor: 10 minutos (40%).
- Observações: A automação no alinhamento pode reduzir o tempo não produtivo

Figura 40 - Green VSM - Mapeamento de Fluxo esquemático / Solda



Fonte: Autora (2025)

Quadro 11 Valores estimativos das principais atividades do setor de pintura

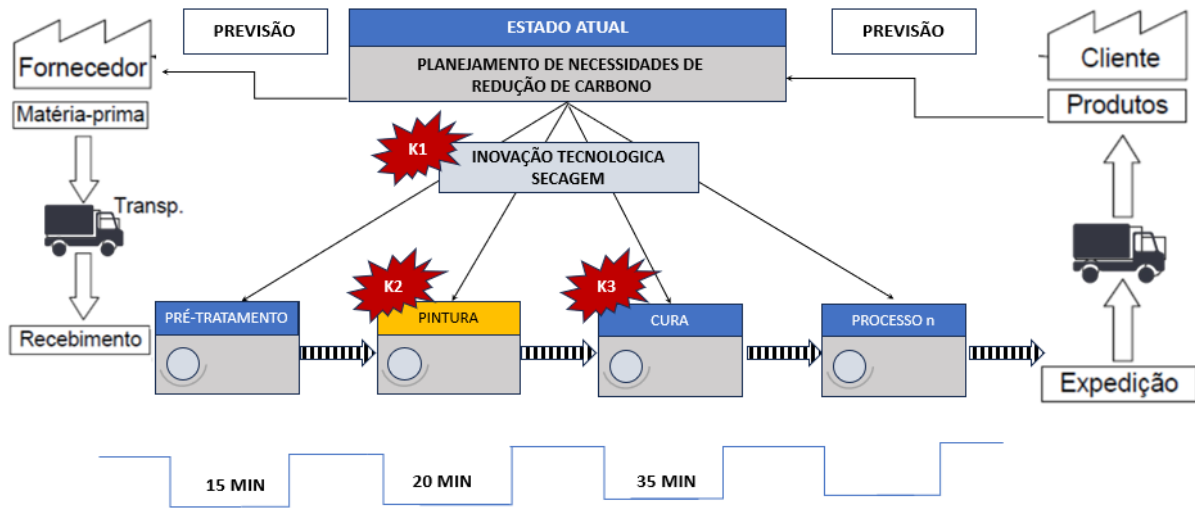
	Etapas	Atividade	Tempo (min)	Tipo de Valor
PINTURA	1. Recebimento	Receber rodas soldadas	5	Não agregado
	2. Pré-tratamento	Limpeza química e aplicação de primer	15	Agregado
	3. Pintura	Aplicação de tinta	20	Agregado
	4. Cura	Fixação da tinta em estufa	35	Agregado
	Total	Pintura completa	75	93% Agregado

Fonte: Autor (2024)

Resumo do Setor (Os valores são aproximados e podem variar de acordo com diferentes condições)

- Tempo total: ~75 minutos por lote.
- Gargalos potenciais: Capacidade da estufa e tempos de cura.
- Melhorias possíveis: Reduzir tempos de transporte entre os processos e investir em tecnologias de cura mais rápida.

Figura 41 - Green VSM - Mapeamento de Fluxo esquemático / Pintura



Fonte: Autora (2025)

No setor de solda, foi observada uma significativa emissão de gases e fumaça, associada ao processo de derretimento da solda e ao elevado consumo de energia. Esse setor se apresenta como um dos mais críticos em termos de emissões, o que aponta para a necessidade de investigar tecnologias alternativas de soldagem, capazes de reduzir essas emissões sem comprometer a eficiência produtiva.

A análise do setor de pintura (*e-coat*) também destacou a importância de explorar alternativas para o uso do gás natural nas estufas de secagem, dado o alto consumo de energia e emissões relacionadas. A empresa já adotou uma ação de redução da temperatura de queima, passando de 150°C para 130°C, o que evidencia um compromisso com a redução de carbono e a busca contínua por soluções mais eficientes.

Contudo, há espaço para avanços adicionais, como a substituição do gás natural por uma fonte de energia menos poluente, ou a melhoria da eficiência energética nas operações de secagem.

A validação do *Roadmap* Estratégico de Descarbonização é uma etapa a qual tem por fundamento buscar por soluções e propostas para a redução das emissões de CO₂ sejam adequadas e viáveis no contexto real da operação da empresa. Para isso, foi apresentada aos responsáveis técnicos da empresa X, focada nos setores de solda, laminação e pintura, que foram identificados como os maiores emissores de gases de efeito estufa. O objetivo é

apresentar e discutir o *roadmap*, alinhando as ações sugeridas com a realidade das operações da empresa, ajustando as estratégias conforme o feedback dos participantes e garantindo a eficácia das medidas de descarbonização.

3.2 Análise Crítica da Pesquisa: Desafios, Contribuições e Perspectivas Futuras

O desenvolvimento desta pesquisa constituiu um processo significativo, envolvendo a integração de diferentes campos do conhecimento e a superação de desafios metodológicos e práticos. Partindo de uma base na arquitetura, com ênfase em planejamento e sustentabilidade no ambiente construído, o estudo direcionou-se à análise da descarbonização e dos modelos de inovação aplicados à indústria de manufatura automotiva. Essa abordagem exigiu uma imersão em metodologias voltadas à gestão da inovação e à redução de emissões de carbono, além de uma adaptação conceitual ao campo da engenharia de produção e da sustentabilidade industrial. A investigação possibilitou uma ampliação do entendimento sobre os impactos ambientais das cadeias produtivas e sobre as estratégias adotadas pelas empresas para mitigar suas emissões, contribuindo para a consolidação de uma perspectiva mais integrada entre sustentabilidade, inovação e processos produtivos.

Um dos maiores desafios enfrentados durante a pesquisa foi o acesso a empresas para a coleta de dados. Antes de estabelecer a parceria com a empresa Maxion Wheels do convênio firmado com o Centro Paulza Souza, foram realizadas diversas tentativas de contato com outras organizações, a fim de ampliar o escopo do estudo. Algumas dessas empresas responderam inicialmente, demonstrando interesse na pesquisa, mas, com o passar do tempo, não deram continuidade ao contato, dificultando a obtenção de informações relevantes para o estudo. As dificuldades encontradas durante a análise das emissões de carbono no setor estudado evidenciam a importância de expandir as investigações para além dos escopos tradicionalmente avaliados. A limitação no acesso a dados detalhados, especialmente em relação ao Escopo 3 das emissões, restringiu a amplitude da análise ao longo da cadeia produtiva. No entanto, essa lacuna abre oportunidades significativas para pesquisas futuras, uma vez que a incorporação do Escopo 3 permitirá uma compreensão mais completa do impacto ambiental associado às atividades indiretas da produção. Essa abordagem ampliada poderá não apenas fortalecer as estratégias de descarbonização, mas também contribuir para o desenvolvimento de soluções mais integradas no contexto industrial. A necessidade de conciliar a abordagem metodológica do Design Science Research (DSR) com a realidade prática da indústria exigiu adaptações constantes, principalmente durante as visitas imersivas e nas reuniões com os envolvidos no

processo produtivo.

Outro aspecto desafiador foi a aplicação do Green VSM em um contexto real, dado que as empresas nem sempre possuem métricas precisas para monitorar sua pegada de carbono em cada etapa produtiva. A adaptação do método para a realidade operacional da empresa estudada demandou um esforço adicional para garantir que os resultados fossem representativos e viáveis para a tomada de decisão.

Apesar dos desafios, a pesquisa trouxe contribuições significativas tanto para o meio acadêmico quanto para a indústria. Primeiramente, o estudo reforça a importância dos *roadmaps* como ferramentas estratégicas para a gestão da inovação e da sustentabilidade. O modelo desenvolvido fornece uma estrutura que pode ser replicada ou adaptada por outras empresas interessadas em direcionar seus processos produtivos para a redução de emissões. Além disso, o uso do Green VSM como ferramenta de análise para a descarbonização no setor automotivo mostrou-se um diferencial metodológico. Diante das limitações encontradas e das oportunidades identificadas, futuras pesquisas, sendo como um dos caminhos promissores é a ampliação da análise para incluir o Escopo 3 das emissões, permitindo uma visão mais abrangente dos impactos ambientais da cadeia produtiva.

Desenvolver esta pesquisa foi uma experiência enriquecedora, que ampliou minha visão sobre inovação e sustentabilidade na indústria, reforçando meu entusiasmo pelo tema e meu compromisso em contribuir para avanços nessa área.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contribuição da pesquisa é o desenvolvimento de um framework para descarbonização em processos produtivos, com foco na indústria automotiva, especificamente no processo de fabricação de rodas. A pesquisa analisa como a aplicação de tecnologias e metodologias sustentáveis pode promover a redução das emissões de CO₂, utilizando o *roadmap* como ferramenta estratégica de inovação. Além disso, este estudo oferece uma análise das etapas críticas do processo produtivo, identificando oportunidades de melhoria e sugerindo intervenções que possam ser adotadas pelas empresas para alcançar suas metas de sustentabilidade. O uso da metodologia *Design Science Research (DSR)* garante que os resultados possam ser aplicados de forma prática e adaptados a diferentes contextos industriais.

A empresa analisada na imersão exploratória foi uma fabricante de componentes automotivos, em que os processos de laminação de aros e montagem de rodas foram avaliados. As principais características observadas durante a imersão incluem o elevado consumo energético nas etapas de soldagem e laminação, o uso de materiais intensivos em carbono e a dependência de fontes de energia convencionais.

A imersão permitiu identificar pontos críticos em que a implementação de novas tecnologias e o uso de energias renováveis podem trazer benefícios significativos em termos de descarbonização.

A análise das etapas críticas nos processos de laminação, montagem e pintura mostra que há oportunidades significativas para a descarbonização por meio de intervenções tecnológicas e de gestão. As etapas que envolvem soldagem, laminação e tratamento térmico apresentam um elevado consumo energético e impacto ambiental, sendo, portanto, alvos prioritários para a adoção de soluções mais sustentáveis.

A utilização de fontes de energia limpa, como eletricidade de matriz renovável, e a substituição de processos convencionais por tecnologias de baixa emissão, como soldagem a laser e recuperação de calor, podem promover uma redução expressiva das emissões de CO₂. Além disso, a implementação de práticas de economia circular, com o reaproveitamento de resíduos e a utilização de materiais mais leves e sustentáveis, complementa a estratégia de mitigação ambiental.

Essas medidas, alinhadas às metas globais de descarbonização, não apenas contribuem para a redução das emissões de carbono na manufatura, mas também oferecem um diferencial competitivo para as empresas, uma vez que a sustentabilidade se torna cada vez mais um fator decisivo no mercado. A inovação em processos produtivos, amparada por um *Roadmap*

estratégico que guie as ações de descarbonização, é fundamental para que a indústria automotiva avance na direção de uma economia de baixo carbono, assegurando a conformidade com as regulamentações ambientais e a crescente demanda por produtos sustentáveis.

Apesar dos avanços alcançados com esta pesquisa, algumas limitações devem ser destacadas. A análise baseou-se em parte em dados estimativos devido à indisponibilidade de informações detalhadas, o que dificultou a precisão nos cálculos das emissões de CO₂ nas etapas do processo produtivo. É importante ressaltar que, nesta pesquisa, não foi realizado um estudo sobre o escopo 3, sendo esta uma limitação importante e que se propõe como uma oportunidade para investigações futuras. Estudos posteriores poderão abordar essa lacuna, oferecendo uma visão mais abrangente sobre as emissões totais e suas possibilidades de mitigação na cadeia produtiva.

REFERÊNCIAS

- ADDAI, K.; SERENER, B.; KIRIKKALELI, D. Complementarities in the effect of economic globalization and decarbonization technologies on carbon neutrality. Evidence from Germany using Fourier-based approaches. **World Development Sustainability**, v. 3, 1 dez. 2023.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 16 jan. 2025.
- ALATAŞ, S.; KARAKAYA, E.; HIÇYILMAZ, B. What Does Input Substitution Tell Us in Helping Decarbonization and Dematerialization? Industry Level Analysis for South Korea. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 411–424, 1 jul. 2021.
- BANAŚ, W., GOŁDA, G., GWIAZDA, A., JARZYŃSKA, M., KAMPA, A., KALINOWSKI, K., OLENDER-SKÓRA, M., & STAWOWIAK, M. **The use of simulation techniques and management tools to optimize the logistics process**. *Logforum*, 20(3), 401–414. <https://doi.org/10.17270/J.LOG.001080>, 2024.
- BANERJEE, P.; ARČABIĆ, V.; LEE, H. Fourier ADL cointegration test to approximate smooth breaks with new evidence from Crude Oil Market. **Economic Modelling**, v. 67, p. 114–124, 1 dez. 2017.
- BARBOSA, T. D. S.; NEGRÃO, L. L. L. **Adoção do lean seis sigma em serviços: classificação, análise e discussão da literatura**. ENEGEP 2021 - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 30 out. 2021.
- BASTY, N.; GHACHEM, D. A. **Is Relationship between Carbon Emissions and Innovation Nonlinear?** Evidence from OECD countries. *Borsa Istanbul Review*, v. 23, n. 4, p. 906–918, 1 jul. 2023.
- BUDIHardJO, R.; HADIPURO, W. **Green Value Stream Mapping: A Tool For Increasing Green Productivity (The Case of PT. NIC)**. *Journal of Management and Business Environment (JMBE)*, ago. 2022.
- BUDIHardJO, R.; HADIPURO, W. **Green Value Stream Mapping: A Tool For Increasing Green Productivity (The Case of PT. NIC)**. *Journal Of management and Business Environment* ISSN 2685-5992, v.4, july 2022.
- CARVALHO, M. M. de. **Efetividade econômica, social e ambiental da precificação de carbono na economia brasileira para o alcance de metas de redução de emissões de gases de efeito estufa**. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.
- DE-LA-FLOR, A.; VIGIL, M.; RUIZ-RUIZ, M. F. **Improvement of the sustainable performance in a textile company using the lean-green methodology**. *International Journal of Production Management and Engineering*, v. 12, n. 1, p. 105-116, 2024. DOI: 10.4995/ijpme.2024.20260.

DOGAN, E.; TURKEKUL, B. **CO2 Emissions, real output, energy consumption, trade, urbanization and financial development: testing the EKC hypothesis for the USA.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, n. 2, p. 1203–1213, 1 jan. 2016.

ELEMURE, I., DHAKAL, H. N., LESEURE, M., & RADULOVIC, J. **Integration of Lean Green and Sustainability in Manufacturing: A Review on Current State and Future Perspectives.** *Sustainability (Switzerland)*, 15(13). <https://doi.org/10.3390/su151310261> (2023).

FAULKNER, W.; BADURDEEN, F. Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 85, p. 8–18, 15 dez. 2014a.

FAULKNER, W.; BADURDEEN, F. Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 85, p. 8–18, 15 dez. 2014b.

FARIAS, L. G. Q. et al. **Mercado global de carbono e governança global do clima: desafios e oportunidades.** Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 28, p. 11-27 Editora UFPRJournal Name, 2013

FERREIRA, C. S. et al. **Roadmap for operational sustainability: an approach based on Integrated Management Systems and Business Process Management.** Gestão da Produção, Operações e Sistemas, v.16, nº 41 p. 181- 212, 2021.

FONTOURA, L. et al. Real-time energy flow mapping: A VSM-based proposal for energy efficiency. *Journal of Cleaner Production*, v. 419, 20 set. 2023.

GOHOUNGODJI, P., N'DRI, A. B., LATULIPPE, J. M., & MATOS, A. L. B. (2020). **What is stopping the automotive industry from going green?** A systematic review of barriers to green innovation in the automotive industry. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 277). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123524>

HEVNER, A. R. et al. **Design Science in Information Systems Research.** *MIS Quarterly*, v. 28, n. 1, p. 75–105, 2004.

HU, J., & LU, S. (n.d.). **Visualization of Environmental Waste by Manufacturing-Equip VSM with Green Perspective** Master thesis work 30 credits, D-level Master Programme in Product and Process Development-Production and Logistics.

I.M. Otto, et al., **Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050**, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117, <https://doi.org/10.1073/pnas.1900577117> (2020).

JOVIČEVIĆ-KLUG, M.; PONGE, D.; GRAMLICH, A. **Circular Steel for Fast Decarbonization: Thermodynamics, Kinetics, and Microstructure Behind Upcycling Scrap into High-Performance Sheet Steel** Annual Review of Materials Research. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/380639770>>.

KATHEM, A. S.; AL-KINDI, L. A. H.; AL-BALDAWI, Z. **Adopting Value Stream Mapping as a Lean Tool to Improve Production Performance.** *Engineering and Technology Journal*, v. 41, n. 6, p. 793–806, 2023. DOI.: <https://doi.org/10.30684/etj.2023.136269.1307> (2023).

KHAN, M. A. et al. **Potential of Lean Tool of Value Stream Mapping (VSM) in Manufacturing Industries**, Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Harare, Zimbabwe, 7-10 dez. 2020.

KUZNETS, S. **International differences in capital formation and financing.** In: Capital Formation and Economic Growth. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1955. p. 19-111.

LACERDA, D. P. et al. **Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção.** *Gest. Prod.*, São Carlos, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LU, H. P.; CHEN, C. S.; YU, H. **Technology roadmap for building a smart city: An exploring study on methodology.** *Future Generation Computer Systems* 97, 2019.

LUCIANO, É. L. **Utilização do Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV) como ferramenta de produção enxuta: racionalização do processo produtivo numa empresa de lubrificantes desengraxantes.** [s.l.] Centro de Educação Tecnológica Paula Souza, 31 mar. 2023.

MARIN-GARCIA, J. A.; VIDAL-CARRERAS, P. I.; GARCIA-SABATER, J. J. **The role of value stream mapping in healthcare services: A scoping review.** *International Journal of Environmental Research and Public Health* MDPI AG, , 1 fev. 2021.

MARTENS, Fábio; MONTEIRO, Sérgio Luiz de Almeida. Inovação e modelo de negócios como ferramentas competitivas em grandes empresas. *Revista ESPACIOS*, [S.l.], v. 39, n. 8, p. 12, 2018.

MAURYA, P. K. et al. **Roadmap to sustainable carbon-neutral energy and environment: can we cross the barrier of biomass productivity?** *Environmental Science and Pollution Research* – Springer Nature, 2021.

MORELL-SANTANDREU, O.; SANTANDREU-MASCARELL, C.; GARCIA-SABATER, J. J. A model for the implementation of lean improvements in healthcare environments as applied in a primary care center. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, n. 6, p. 1–33, 2 mar. 2021.

MOHSIN, M. et al. **Developing low carbon economies: An aggregated composite index based on carbon emissions.** *Journal of Energy Storage* 41, 2021.

NANDAKUMAR, N.; SALEESHYA, P. G.; HARIKUMAR, P. **Bottleneck Identification And Process Improvement By Lean Six Sigma DMAIC Methodology.** ScienceDirect, 2018.

OLIVEIRA, L. G.; ROZENFELD, H. Integração do Technology Roadmapping com o gerenciamento de portfólio de projetos: alinhando recursos, objetivos e ambiente externo. *Revista Produção Online*, [S.l.], v. 10, n. 3, p. 1074-1099, 2010.

OHNO, T. **Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production**, 1978.

OSHIRO, K. et al. **Enabling energy system transition toward decarbonization in Japan through energy service demand reduction**. Elsevier, Energy 227, 2021.

PAKDEENARONG, P.; HENGSADEEKUL, T. Supply chain risk management of organic rice in Thailand. **Uncertain Supply Chain Management**, v. 8, n. 1, p. 165–174, 2020.

PIMENTEL, M.; FILIPPO, D.; SANTOS, T. M. **Design Science Research**: pesquisa científica atrelada ao design de artefatos. RE@D - Revista de Educação a Distância e Elearning, v. 3, n. 1, mar./abr. 2020.

PRAYUGO, J.; ZHONG, L. X. Green productivity: Waste reduction with green value stream mapping. A case study of leather production. **International Journal of Production Management and Engineering**, v. 9, n. 1, p. 11–16, 2021.

REGIS, M. R. S. **Ferramenta de gestão de riscos aplicada na fase de pré-construção de empreendimentos de construção civil**. Dissertação Mestrado em Ciências – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023

REZA, M. S. et al. **Energy storage integration towards achieving grid decarbonization: A bibliometric analysis and future directions**. Energy Reports, Elsevier Ltd, 2021.

ROCHA, J. L.; MELLO, L. S. F. A importância da gestão do conhecimento na inovação aberta: um estudo de caso em uma empresa de tecnologia. Revista de Administração e Inovação, [S.l.], v. 13, n. 3, p. 189-202, 2016.

RODRIGUES, V., & PIRES, S. **Roadmap para implantação e gestão de inovações em empresas de construção civil de pequeno e médio porte**. Centro de Educação Tecnológica Paula Souza, abril. 2021.

ROTHER, M. S. J. **Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate 1**. ed. Cambridge, MA: Lean Enterprise Institute, 1999.

ROUBUSTE, R. R. et al. Climate change and the carbon market. **Iheringia - Serie Botanica**, v. 77, 2022.

SABAH, A.; AL-KINDI, L.; AL-BALDAWI, Z. Adopting Value Stream Mapping as a Lean Tool to Improve Production Performance. **Engineering and Technology Journal**, v. 41, n. 6, p. 1–14, 26 fev. 2023.

SALVADOR, R. et al. Towards a green and fast production system: Integrating life cycle assessment and value stream mapping for decision making. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, 1 mar. 2021.

GHG PROTOCOL. **Scope 2 guidance training**. . [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.ghgprotocol.org>. Acesso em: 26 fev. 2024.

SEMIENIUK, G. et al. **Plausible energy demand patterns in a growing global economy with climate policy**. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 4, p. 313–318, 1 abr. 2021b.

SILVA, E. S. **Proposição e aplicação de um mapeamento do fluxo de valor com foco na sustentabilidade**. Programa de pós-graduação em engenharia de produção universidade paulista São Paulo: 2024

SILVEIRA, C. S. DA; OLIVEIRA, L. DE. **Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento** Novos Cadernos NAEA set-dez 2021

SINGH, P. K.; CHUDASAMA, H. **Conceptualizing and achieving industrial system transition for a dematerialized and decarbonized world**. *Global Environmental Change* 70, 2021.

SOUSA, M. M. DE et al. **Neutralidade do carbono, procedimentos ambientais de redução de gases e o aquecimento global: um estudo de caso das empresas ambev e bunge**. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 10, n. 7, p. 1746–1757, 16 jul. 2024.

TAVARES, A. S.; BORCHIVER, S. **Vista da Elaboração de Roadmap Tecnológico**. 2021.

THOUSSAINT, L.; MINOUFEKR, M.; PLAPPER, P. **MULTI-LEVEL INFORMATION VALUE STREAM MAPPING**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/344609536>>.

UKON, M.; SANCHEZ, J.; RAMOS, A. **A problemática da descarbonização no setor automotivo e a redução de emissões de GEE: desafios e oportunidades**. 2023

VINAYAVEKHIN, S. et al. Emerging trends in roadmapping research: A bibliometric literature review. **Technology Analysis and Strategic Management**, v. 35, n. 5, p. 558–572, 2023.

WEI, X., QIU, R., LIANG, Y., LIAO, Q., KLEMEŠ, J. J., XUE, J., & ZHANG, H. (2022). **Roadmap to carbon emissions neutral industrial parks: Energy, economic and environmental analysis**. *Energy*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121732>

WISHART, D. S. et al. **Review NMR and Metabolomics -A Roadmap for the Future**. *Metabolites* 2022.

YULIANTO, K.; ISMANTO, S. D.; INFO, A. **Strategy for Improving Rice Agroindustry Production Processes Based on Green Value Stream Mapping**. p. 2721–1207, 2024.

ZHAO, X. et al. How technological innovation influences carbon emission efficiency for sustainable development? Evidence from China. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 14, 1 dez. 2023a.

ZHAO, X. et al. How technological innovation influences carbon emission efficiency for sustainable development? Evidence from China. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 14, 1 dez. 2023b.

Zhu, X. Y., Zhang, H., & Jiang, Z. G. **Application of green-modified value stream mapping to integrate and implement lean and green practices: A case study.** *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(7), 716–731. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1667028> (2020).