

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JOÃO PEDRO MACIEL JAEGER

Emprego de simulação a eventos discretos na ampliação das operações de um sistema de Economia Circular interorganizacional para valorização de resíduos do segmento calçadista

Porto Alegre

2023

João Pedro Maciel Jaeger

Emprego de simulação a eventos discretos na ampliação das operações de um sistema de Economia Circular interorganizacional para valorização de resíduos do segmento calçadista

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Dra. Istefani Carísio de Paula

Porto Alegre

2023

João Pedro Maciel Jaeger

Emprego de simulação a eventos discretos na ampliação das operações de um sistema de Economia Circular interorganizacional para valorização de resíduos do segmento calçadista

Prof. Dra. Istefani Carísio de Paula

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Alejandro Germán Frank

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Joana Siqueira de Souza, Dra. (PPGEP/UFRGS)

Professora Ângela de Moura Ferreira Danilevich, Dra. (PPGCI/UFRGS)

Professora Patricia Guarnieri dos Santos, Dra. (PPGA/UNB)

*“Life is very short and anxious for those who
forget the past, neglect the present, and fear
the future.”*

— Sêneca (49 d.C.)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino de qualidade e oportunidades oferecidas mesmo em um período curto do mestrado.

À minha orientadora, professora Istefani Carísio de Paula, por ter me guiado neste projeto, me auxiliado e encorajado na escrita da dissertação. Sou grato por tudo o que aprendi nesses dois anos de orientações. Aos demais professores do PPGEP pelas aulas interativas e profundas, que contribuíram muito para minha formação e aprendizado geral de vida.

À empresa Hélice Consultoria pelos diversos projetos realizados nesses dois anos, que propiciaram experiências e lições valiosas. Espero continuar ligado as atividades projetuais de alguma forma e contribuir da melhor forma possível para que cresça cada vez mais. Agradeço também ao Rodrigo, da Flexsim®, pela contribuição e suporte na modelagem e simulação do sistema estudado nessa dissertação.

Aos colegas do mestrado do PPGEP que estiveram presentes nessa jornada. Em especial, ao D'Orleães e à Aline, pela parceria na maioria dos projetos, trabalhos e disciplinas. Obrigado por todo o apoio e pelas trocas que tivemos nessa trajetória.

Um agradecimento especial à minha família: meus pais, Helena e Júlio, e minha irmã, Julia. Obrigado pelo incentivo, por me ensinarem a ter disciplina e a acreditar em mim mesmo.

RESUMO

É desafiador ainda fazer a transição do sistema de produção e consumo linear para o circular. Agem concomitantemente nesse contexto a necessidade das empresas para atender mercado e a necessidade da academia de testar ferramentas que permitam desenvolver rapidamente e com sucesso esses sistemas circulares. Entende-se que a tomada de decisão é um desafio nesse contexto, pois trata-se de sistemas complexos, que exigem intensa interação entre as partes envolvidas, e se faz necessária a aplicação de métodos que diminuam a incerteza e auxiliem no processo de tomada de decisão. Esta dissertação tem como objetivo aplicar simulação a eventos discretos em um sistema interorganizacional no contexto da economia circular, com o propósito de analisar diferentes experimentos acerca de quantidades de resíduo coletadas, combinações de veículos utilizados nos transportes e fonte de origem do resíduo. Quanto ao procedimento técnico, empregou-se a Simulação a Eventos Discretos (SED), seguindo as etapas de: (i) Definição do Problema e Estabelecimento de objetivos; (ii) Formulação e Planejamento do Modelo; (iii) Coleta de dados; (iv) Desenvolvimento do Modelo; (v) Verificação; (vi) Validação; (vii) Experimentação; e (viii) Análise dos Resultados. Este procedimento resultou no desenvolvimento de diversos experimentos que possibilitaram analisar o sistema na perspectiva de Produção Total, Produtividade e Custos Logísticos/kg, sendo passível de realizar alterações nos *inputs* de custos das empresas para realização de análises futuras. O segmento alvo deste estudo é o segmento calçadista, mas especificamente a borracha de calçados pós-consumo e resíduos de borracha pré-consumo. O caso estudado foi do sistema circular do resíduo de borracha de calçados, o qual é composto por quatro fábricas, diversos pontos de coleta de resíduos, cooperativas, beneficiadores e transformadores localizados nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil. Os resultados demonstraram o impacto das diferentes combinações de veículos, origens de resíduos e incrementos de coleta pós-consumo em todas as regiões estudadas, proporcionando a identificação de *insights* e oportunidades acerca do sistema e dos *players* envolvidos. Dessa forma, obteve-se os seguintes benefícios a partir da aplicação da simulação no caso estudado: detectar a necessidade de uma nova política de relacionamento transparente com os membros; analisar a questão operacional do beneficiamento na Fábrica, a utilização de diferentes veículos na configuração logística e o isolamento das origens do resíduo; permitiu a análise do fluxo de resíduo em um ambiente computacional, sem depender dinheiro e investimentos massivos para a empresa cliente; possibilitou a obtenção de *insights* sobre a interação de variáveis e sua importância para o sistema; auxiliou na compreensão do sistema; respondeu perguntas “e se?”, como demonstrado através dos experimentos realizados nessa dissertação. Identifica-se como a contribuição prática do estudo os *insights* e oportunidades identificados a partir dos resultados obtidos a partir da configuração atual do modelo, com os *inputs* utilizados nesse estudo. A contribuição metodológica encontra-se na característica atualizável do modelo de simulação construído, tornando-o uma ferramenta que pode ser ainda aprimorada quanto melhor definidos forem os *inputs*. Por fim entende-se como contribuição teórica o estudo de um tema pouco explorado como é a LR em um sistema de EC no segmento calçadista, representando utilidade tanto para os acadêmicos da área e para os gestores do sistema para a tomada de decisão.

Palavras-chaves: Sistema Circular Interorganizacional. Resíduo de Borracha de Calçado. Simulação. Cenários.

ABSTRACT

It is still challenging to transition from the linear to the circular production and consumption system. In this context, the companies need to serve the market, and the academy needs to test tools that allow the rapid and successful development of these circular systems to act concurrently. It is understood that decision-making is a challenge in this context, as these are complex systems that require intense interaction between the parties involved. It is necessary to apply methods that reduce uncertainty and help in the decision-making process. decision. This dissertation aims to use discrete event simulation in an inter-organizational system in the context of the circular economy, to analyze different experiments about the amounts of waste collected, combinations of vehicles used in transport, and the source of origin of the waste. As for the technical procedure, Discrete Event Simulation (SED) was used, following the steps of (i) Problem Definition and Goal Setting; (ii) Model Formulation and Planning; (iii) Data collection; (iv) Model Development; (v) Verification; (vi) Validation; (vii) Experimentation; and (viii) Analysis of Results. This procedure resulted in the development of several experiments that made it possible to analyze the system from the perspective of Total Production, Productivity, and Logistic Costs/kg, being able to apply changes in the cost inputs of the companies to carry out future analyses. The target segment of this study is the footwear segment, more specifically post-consumer shoe rubber and pre-consumer rubber waste. The case studied was the circular system of shoe rubber waste, which is made up of four factories, several points collection centers, cooperatives, processors, and transformers located in the Northeast, Southeast and South regions of Brazil. The results demonstrated the impact of different vehicle combinations, waste sources and post-consumer collection increments in all regions studied, providing insights and opportunities about the system and the players involved. In this way, the following benefits were obtained from the application of the simulation in the case studied: detecting the need for a new transparent relationship policy with the members; analyzing the operational issue of processing at the Factory, the use of different vehicles in the logistical configuration and the isolation of the origins of the waste; allowed the analysis of the waste stream a computational environment, without spending money and massive investments for the client company; made it possible to obtain insights about the interaction of variables and their importance to the system; helped in understanding the system; answered questions “what if?”, as demonstrated through the experiments carried out in this dissertation. The practical contribution of the study is identified as the insights and opportunities identified from the results obtained from the current configuration of the model, with the inputs used in this study. The methodological contribution lies in the updatable characteristic of the built simulation model, making it a tool that can be further improved the better the inputs are defined. Finally, a theoretical contribution is understood as the study of a little explored theme such as RL in a CE system in the footwear segment, representing usefulness both for academics in the area and for system managers for decision-making.

Keywords: Interorganizational Circular System. Rubber Footwear Residue. Simulation. Scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Níveis de Economia Circular.....	23
Figura 2. Solução prototípica de logística reversa	25
Figura 3. Ciclos de evolução do estudo longitudinal do sistema de reciclagem de borracha de calçados	38
Figura 4. Fluxo genérico do sistema de logística reversa da borracha de calçado.....	39
Figura 5. Etapas da Simulação.....	40
Figura 6. Exemplo genérico de modelo conceitual utilizado primariamente no estudo realizado.....	41
Figura 7. Mapeamento dos <i>players</i>	53
Figura 8. Representação dos modelos das regiões no <i>software</i> Flexsim ®.....	60
Figura 9. Possibilidades de atuação da Fábrica.....	81
Figura 10. Diferentes estratégias para cada região estudada.....	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Quadro comparativo de metodologias de simulação	31
Quadro 2. Inputs e Outputs da simulação	43
Quadro 3. Experimentos realizados	46
Quadro 4. Representação dos cálculos realizados em planilhas excel a partir dos outputs	48
Quadro 5. Indicadores utilizados na análise.....	48
Quadro 6. Número de players por elo e região	51
Quadro 7. Dados de coleta em kg - outubro/2022	52
Quadro 8. Inputs do modelo da região Sudeste	55
Quadro 9. Inputs do modelo da região Nordeste	57
Quadro 10. Inputs do modelo da região Sul	58
Quadro 11. Inputs gerais de todos os modelos.....	59
Quadro 12. Premissas de custos utilizadas nos cálculos.....	61
Quadro 13. Resultados Sudeste QP1	61
Quadro 14. Resultados Sudeste QP2	67
Quadro 15. Resultados Nordeste QP1	69
Quadro 16. Resultados Nordeste QP2	73
Quadro 17. Resultados Sul QP1.....	74
Quadro 18. Resultados Sul QP2.....	77
Quadro 19. Percepções de expectativa a partir do aumento da coleta pós-consumo	77
Quadro 20. Consolidação dos resultados de todas as regiões e experimentos.....	79
Quadro 21. Considerações sobre os elos.....	88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.2 TEMA E JUSTIFICATIVA	17
1.3 OBJETIVOS	19
1.4 MÉTODO	20
1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	20
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 ECONOMIA CIRCULAR, LOGÍSTICA REVERSA E SISTEMAS INTERORGANIZACIONAIS	22
2.2 SIMULAÇÃO COMO SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO EM ECONOMIA CIRCULAR	26
2.3 SISTEMAS CIRCULARES NO SEGMENTO DE CALÇADOS	32
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	36
3.1 UNIDADE DE PESQUISA	36
3.2 MÉTODO DE TRABALHO	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E ESTABELECIMENTO DOS OBJETIVOS	49
4.2 COLETA DE DADOS	51
4.3 FORMULAÇÃO E PLANEJAMENTO DO MODELO	54
4.3.1 SUDESTE	54
4.3.2 NORDESTE	56
4.3.3 SUL	57
4.3.4 INPUTS GERAIS	59
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
4.4.1 SUDESTE	61
4.4.2 NORDESTE	69
4.4.3 SUL	74
5. IMPLICAÇÕES PRÁTICAS DO ESTUDO , <i>INSIGHTS</i> E OPORTUNIDADES	79
5.1 QUESTÕES LIGADAS AO AUMENTO DA COLETA, ESCALA DE PRODUÇÃO E GERAÇÃO DE LOTES	80
5.2 QUESTÕES LIGADAS À DISPONIBILIDADE DE MATERIAL	84
5.3 QUESTÕES LIGADAS À ESTRUTURA DA LOGÍSTICA REVERSA	85

5.4 QUESTÕES LIGADAS AO TIPO DE VEÍCULO	86
5.5 QUESTÕES LIGADAS AO CUSTO POR KG	86
5.6 QUESTÕES LIGADAS AO BENEFICIAMENTO DA BORRACHA PRÉ-CONSUMO NA FÁBRICA	87
5.7 QUESTÕES LIGADAS À DISPONIBILIDADE DE DADOS	87
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
REFERÊNCIAS	94
APÊNDICES.....	104

1. INTRODUÇÃO

Historicamente os sistemas produtivos foram configurados em um modelo linear de extração, produção, consumo e descarte. Nessa lógica, as indústrias extraem recursos do meio ambiente para fabricação de produtos que não foram projetados para serem reutilizados, reciclados, remanufaturados ou restaurados ao final da vida útil. O produto se torna um resíduo que é descartado sem gerenciamento ou aproveitamento, tornando o modelo insustentável, na medida em que os recursos são finitos. Esse modelo caracteriza-se como um sistema gerador de resíduos que causam impactos globais, tais como mudanças climáticas, perda de biodiversidade e poluição (EMF, 2021).

A economia circular (EC) apresenta-se como uma alternativa à economia linear, e conceitua-se, de acordo com a *Ellen MacArthur Foundation* (EMF, 2013, p.5), “como uma economia que é restauradora e regenerativa por princípio e visa manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo”, caracterizando-se também por utilizar fluxos cíclicos de materiais e fontes de energia renováveis (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018). A EC enfatiza a ideia de transformar produtos de uma maneira que proporcione relacionamentos viáveis entre sistemas ecológicos e crescimento econômico (NASIR *et al.*, 2017). Representa, portanto, um caminho preventivo e regenerativo, contrário ao extrativismo, consumismo e descarte elevados em que o mundo está inserido, ainda que se encontre em um estágio inicial de implementação (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

A EC se baseia em três princípios fundamentais: eliminar os resíduos e poluição desde o princípio, circular produtos e materiais e regenerar sistemas naturais (EMF, 2013). Para tanto, diferentes estratégias podem ser utilizadas, sejam elas preventivas ou reparadoras. O primeiro princípio refere-se à quando o produto é projetado para evitar agressões ao meio ambiente. O segundo princípio refere-se a projetar para estender ao máximo a vida útil do produto e dar um destino adequado para seus resíduos, caso sejam gerados. A reciclagem, por exemplo, embora não seja a melhor estratégia de circularização de materiais, é preferível ao envio de materiais passíveis de recuperação para aterros ou coprocessamento.

Estruturar um sistema circular reparador a partir do zero exige diversas mudanças nos processos de um sistema linear existente. A economia circular e seus modelos de negócio representam uma oportunidade única de criação de valor, mas também implicam desafios associados ao aumento do risco e da responsabilidade, fazendo com que os gestores das indústrias continuem buscando modelos de negócios lineares (PARIDA *et al.*, 2019).

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Painel Internacional de Recursos (IRP, 2018) definem estratégias de remanufatura, recondição, reparo e reutilização direta como processos de retenção de valor (VRPs). Embora os profissionais devam projetar produtos sob a perspectiva dos VRPs desde o início, os atuais portfólios de produtos comercializados pelos fabricantes no mercado não atendem totalmente a esses requisitos. A consequência é o impacto dos produtos no meio ambiente (SASTRE *et al.*, 2022) independente do segmento industrial. Assim, de um lado, os gestores estão pressionados pelos desafios de projetar produtos que não agridam o meio ambiente. A inovação em produtos exige dos gestores disposição cultural e maturidade gerencial para projetar de forma sistêmica e colaborativa com os diferentes *stakeholders* da cadeia (JABBOUR *et al.* 2019). De outro lado, a pressão da legislação, da opinião pública e da competitividade (SAIDANI *et al.*, 2017; PAN *et al.*, 2015) impõem um sentido de urgência em minimizar o impacto dos produtos atualmente comercializados no mercado. Dessa forma, ao nível da empresa, a transição para a EC ocorre também por meio de abordagens de gestão de resíduos (HERAS-SAIZARBITORIA *et al.*, 2023) como a concepção e implementação de sistemas circulares interorganizacionais para valorização dos resíduos pré-consumo e pós-consumo numa base de simbiose industrial.

O diagrama borboleta da EC (EMF, 2015, p. 24) traz a estratégia de reciclagem para o seu elo mais externo no ciclo técnico, como uma estratégia de última escolha, uma vez que a reciclagem tende a consumir mais energia do que outras abordagens. Apesar disso, adotamos a premissa de que a estratégia de reciclagem não deve ser considerada um desvio, mas uma forma de preparar os gestores para alcançar níveis mais elevados de colaboração entre os *stakeholders*. O design de sistemas circulares e a logística reversa serão operações naturais para sistemas de reciclagem, o que será ainda mais essencial no design de sistemas inovadores de produtos circulares. A complexidade de realizar o desenho da logística reversa reside em conectar organizações distintas como, empresas de coleta e triagem, empresas de reciclagem e outras instituições públicas e privadas. Todas essas organizações trazem sua percepção gerencial de valor e requisitos (IRP, 2018). Geralmente envolve compartilhamento de informações sensíveis e confidenciais e comunicação eficiente (JÄGER-ROSCHKO, PETERSEN, 2022; PAULA *et al.*, 2020).

Importante mencionar que muitas vezes a Economia Circular é confundida com logística reversa e reciclagem de materiais. Embora esta seja uma estratégia de circularização aplicável para produtos que não foram projetados para o fim de vida, a reciclagem não é a única e nem a mais relevante estratégia de circularização, mas também não é dispensável. Assumindo que a reciclagem também é uma estratégia importante para EC, a próxima questão é como

desenvolver, implementar, gerenciar e melhorar sistemas de ciclo fechado interorganizacionais de forma estruturada e reproduzível. O número de *frameworks* sobre EC propostos na literatura está aumentando.

Considerando o campo de pesquisa em design, Lieder e Rashid (2016), por exemplo, combinaram três aspectos, meio ambiente, recursos e benefícios econômicos. Os autores sugerem uma abordagem concorrente. No sentido *top-down* (de cima para baixo), os órgãos governamentais e os formuladores de políticas maximizam os benefícios ambientais por meio do controle restrito dos negócios industriais. No sentido *bottom-up* (de baixo para cima), os gestores das empresas de manufatura colocam seus esforços em benefícios econômicos e crescimento devido à pressão competitiva.

Moreno *et al.* (2016, p. 937) desenvolveram uma estrutura conceitual que liga cinco estratégias de design e cinco arquétipos de modelos de negócios circulares. Como resultado, eles fornecem 10 recomendações ao projetar EC em uma base de *Design for Excellence* (DfX). Pigosso e McAloone (2021) propõem a ferramenta de autoavaliação de prontidão para EC, MATChE (*Making the Transition to a Circular Economy*), seguindo ciclos iterativos de desenvolvimento teórico e codesenvolvimento empírico com usuários em potencial. Os *frameworks* variam seu foco entre decisões estratégicas, táticas e operacionais e não privilegiam o desenvolvimento em ciclo fechado, pois o *framework* foi desenvolvido para uma perspectiva mais ampla e estratégica da Economia Circular.

Em relação à literatura da área de cadeia de suprimentos, Amir *et al.* (2022) propuseram uma estrutura para a implementação da cadeia de suprimentos circular por design. Os autores distinguem 'fechar o ciclo por design' de 'fechar o ciclo por acaso'. Podemos classificar o estudo realizado nessa dissertação como fechando o ciclo por acaso, uma vez que os produtos não foram projetados para múltiplos ciclos de vida desde o início, como esperado no conceito de fechamento do ciclo por design. No contexto do ciclo fechado, podemos introduzir a logística reversa como um dos blocos de construção da EC e uma etapa fundamental para facilitar as atividades de valor agregado. O modelo de maturidade de logística reversa (*Reverse Logistics Maturity Model* - RLMM) da Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2016) lança luz sobre o desafio de desenvolver sistemas interorganizacionais de ciclo fechado. O modelo de maturidade considera cinco níveis para avaliar a maturidade em logística reversa (*front end*), recuperação (*engine*) e remarketing (*back end*). Tais níveis acompanham as etapas de gerenciamento de projetos e processos, amplamente utilizados para a melhoria contínua dos processos. Gestores podem aplicar o modelo para avaliar a maturidade da logística reversa das organizações para começar a ampliar suas capacidades circulares.

Em relação ao contexto de ciclos fechados na Economia Circular, “o nível interorganizacional é composto por um conjunto de empresas do mesmo segmento atuando em papéis diferentes no sistema” (WBCSD, 2018, p. 10), ampliando suas capacidades circulares. A estrutura RLMM aponta como um primeiro fator-chave de sucesso realizar economias de escala. Por exemplo, um novo projeto de sistema circular interorganizacional bem-sucedido deve incorporar empresas de reciclagem que consolidaram o público-alvo para seus produtos reciclados, garantindo uma demanda puxada para o sistema circular nascente. Essa estratégia é reforçada por Paula *et al.* (2021). Recomenda-se garantir a demanda de produtos reciclados sempre que valorizamos um material e o devolvemos ao mercado. Os produtos reciclados não devem ficar encalhados em gôndolas e armazéns, sob risco de se transformar em um outro resíduo.

Assim, algumas premissas orientam esta dissertação (i) a reciclagem pode ser uma estratégia válida para reduzir o impacto de produtos não concebidos com a perspectiva da Economia Circular desde o início (HERAS-SAIZARBITORIA *et al.*, 2023); (ii) desenhar ciclos fechados de logística reversa para fins de reciclagem é uma forma de desenvolver a cultura de colaboração na EC (JÄGER-ROSKO, PETERSEN, 2022; PAULA *et al.*, 2020); (iii) é adequado projetar o ciclo fechado garantindo economia de escala por meio de abordagens orientadas à demanda (EMF, 2016; PAULA *et al.*, 2020), (iv) é necessário projetar com o fracasso em mente, é melhor testar e prototipar o quanto antes (MORENO *et al.*, 2016); (v) o design com ‘mão na massa’ promove uma chamada para ação e acelera o ganho de conhecimento (MORENO *et al.*, 2016) à semelhança da experimentação (prototipagem cedo) proposta pela abordagem *Lean Startup* (RIES, 2012).

É desafiador ainda fazer a transição do sistema de produção e consumo linear para o circular. Agem concomitantemente nesse contexto a necessidade das empresas para atender mercado e a necessidade da academia de testar ferramentas que permitam desenvolver rapidamente e com sucesso esses sistemas circulares. Entende-se que a tomada de decisão é um desafio nesse contexto, pois trata-se de sistemas complexos, que exigem intensa interação entre as partes envolvidas, e se faz necessária a aplicação de métodos que diminuam a incerteza e auxiliem no processo de tomada de decisão.

Nesse sentido, a simulação se apresenta como uma ferramenta interessante, que pode ser utilizada para experimentação em um ambiente de baixo custo e risco. A simulação oferece facilidades para a tomada de decisão: é capaz de responder perguntas, prever comportamentos em contextos de incerteza e analisar cenários possíveis (MALEC, 2017). Simulação por eventos discretos (SED), Simulação baseada em agentes (SBA) e Dinâmica de Sistemas (DS) são as

principais ferramentas de simulação usadas no contexto da sustentabilidade, sendo frequentemente usadas também de forma híbrida (KHAN; ABONYI, 2022).

A simulação já foi colocada em prática no contexto da EC. Algumas das aplicações envolvem a simulação de reciclagem de resíduos em cadeias de suprimentos de ciclo fechado (GOLROUDBARY; ZAHRAEE, 2015), modelagem para análise de sustentabilidade (JAIN *et al.*, 2013), simulação de emissões de efeito estufa e consumo de energia (RABE *et al.*, 2012), *trade-offs* de pegada de carbono (JAIN *et al.*, 2012) e simulação de emissões de dióxido de carbono (JAEGLER; BURLAT, 2012). Van Erp *et al.* (2023) apresentam uma abordagem de engenharia de sistemas no contexto da inovação sustentável, na qual caracterizam a simulação a eventos discretos como uma ferramenta a ser aplicada no design da cadeia de suprimentos. Essa abordagem, na esfera da economia circular, pode contribuir com a facilitação de ecossistemas de simbiose industrial com fluxos de recursos e resíduos entre empresas.

Em vista do exposto, a questão de pesquisa que norteia esta dissertação é:

QP: *Quais são os benefícios que a simulação a eventos discretos pode trazer para a estruturação de um sistema circular interorganizacional para valorização de resíduos?*

1.2 TEMA E JUSTIFICATIVA

O tema de pesquisa desta dissertação é “emprego da simulação no projeto de um de um novo sistema circular interorganizacional” como meio de analisar cenários e identificar oportunidades para dar apoio à tomada de decisão.

A economia linear está atingindo seus limites e a Economia Circular apresenta benefícios operacionais e estratégicos, em nível micro e macroeconômico, potencial de inovação, criação de empregos e crescimento econômico (EMF, 2013). A importância da EC está na mudança dos padrões de produção e consumo, abrangendo do início ao fim do ciclo de vida do produto, com foco nos três pilares da sustentabilidade (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

A transição para a economia circular não influencia o modelo de negócios de uma única empresa, mas afeta a organização de todo seu ecossistema (PARIDA *et al.*, 2019). Portanto, para habilitar essa transição são necessárias ferramentas de suporte de decisão para identificar e explorar os potenciais cenários em nível de empresa e entre empresas (LIEDER; RASHID, 2016). Junta-se a isso a importância de conectar geradores de resíduos com usuários de resíduos (VELENTURF; JOPSON, 2019), e estabelecer uma relação de colaboração com confiança (BERLIN; FELDMANN; NUUR, 2022; BERARDI; DE BRITO, 2021; FRANCO, 2017). A reorganização das cadeias de suprimentos para a lógica circular requer o desenvolvimento de

sistemas de logística reversa economicamente viáveis, soluções técnicas e organizacionais para lidar com o fluxo de retorno imprevisível de produtos/resíduos e confiança nas redes de negócios (HOFMANN, 2019).

Na literatura, é possível encontrar aplicações de diversas técnicas de simulação no contexto da economia circular: a dinâmica de sistemas aplicada em ferramentas de apoio a tomada de decisão, para compreensão do comportamento de um sistema e análise dos efeitos de diferentes estratégias (FRANCO, 2019; GLOSER-CHAHOUUD *et al.*, 2019; GUZZO, RODRIGUES, MASCARENHAS, 2021); a simulação baseada em agentes para analisar o impacto de configurações de remanufatura, simular os impactos de fatores sociais no surgimento de uma simbiose industrial e desempenho desta (DOMINGUEZ, CANNELLA, FRAMINAN, 2021; GHALI, FRAYRET, AHABCHANE, 2017; FRACCASCIA *et al.*, 2020), a simulação a eventos discretos para avaliar o potencial de remanufatura através de diversos cenários, planejar o estoque e produção em uma cadeia de suprimentos de ciclo fechado, estudar a configuração da rede logística em uma cadeia de suprimentos de ciclo fechado (HUSTER *et al.*, 2022; DEV, SHANKAR, CHOUDHARY, 2017; BAL, BADURBEEN, 2019).

A simulação a eventos discretos possui aplicações que contribuem para a criação e controle de *Key Performance Indicators* de reciclagem e apoio a tomada de decisão nesse contexto (SASSANELLI, ROSA, TERZI, 2021; WAKIRU *et al.*, 2018). Junta-se a isso, a importância de trazer resultado para todos os envolvidos no sistema interorganizacional circular. A simulação a eventos discretos permite uma visão do “todo”, sem despendar de investimentos muito altos e permitindo a visualização através de animação computacional (SWEETSER, 1999; BANKS, 2005), sendo uma metodologia utilizada nesse contexto também para estudar a colaboração entre parceiros em cadeias de suprimentos de ciclo fechado (BERARDI; DE BRITO, 2021).

Como visto, há diversas aplicações de simulação no contexto da economia circular. Entretanto, há poucos estudos de simulação que tratem diretamente de um sistema circular interorganizacional, como o estudado nessa pesquisa. Muitas vezes, a literatura omite a identificação do nível de EC dos sistemas que estão sendo pesquisados, deixando a função de identificar o nível, de forma subjetiva, para o leitor, como ocorre, por exemplo, nas publicações de Kuo *et al.* (2021), Roci *et al.* (2022) e Alamarew e Brissaud (2020). Além disso, a EC na indústria calçadista é pouco explorada no contexto da simulação. Entretanto, a discussão de sustentabilidade tem se ampliado cada vez mais e, conjuntamente com a pressão para a produção de um produto orientado para de redução de impactos ambientais, tem influenciado diversas iniciativas na indústria calçadista: o desenvolvimento de matérias primas menos

poluentes, processos produtivos mais sustentáveis e soluções na gestão de resíduos pós-consumo (KOHAN, 2020).

Percebe-se uma lacuna nos estudos revisados no que tange a análise de custos logísticos. Na logística reversa, o principal custo associado à coleta de produtos devolvidos de um local é o custo de transporte, sendo geralmente maiores do que na logística direta (TIBBEN-LEMBKE; ROGERS, 2002). Entende-se que o conhecimento dos custos logísticos é fundamental para a viabilidade de um sistema de EC interorganizacional. Dessa forma, tornar a logística reversa mais transparente e desmitificar os custos logísticos da LR é um passo relevante no desenvolvimento de estratégias que tornem todo o processo mais eficiente, afinal estes custos compreendem uma proporção significativa dos custos totais e impactam as operações produtivas (ENGBLOM *et al.*, 2012; MUHA, 2019).

Portanto, para o sistema em estudo, o desempenho do sistema foi analisado com relação a indicadores de Produção, Produtividade e Custo Logístico/kg. Por fim, as planilhas de cálculos editáveis, que proporcionam a entrada de novos *inputs* de custos, e os modelos criados nessa dissertação podem ser atualizados de acordo com a necessidade, proporcionando novas análises baseadas em diversos cenários. Entende-se que a aplicação de simulação a eventos discretos nesse estudo gerou resultados que serão importantes para as decisões sobre o sistema circular. Identifica-se como a contribuição prática do estudo os insights e oportunidades identificados a partir dos resultados obtidos a partir da configuração atual do modelo, com os inputs utilizados nesse estudo. A contribuição metodológica encontra-se na característica atualizável do modelo de simulação construído, tornando-o uma ferramenta que pode ser ainda aprimorada quanto melhor definidos forem os inputs. Por fim, entende-se como contribuição teórica o estudo de um tema pouco explorado como é a LR em um sistema de EC no segmento calçadista, representando utilidade tanto para os acadêmicos da área e para os gestores do sistema para a tomada de decisão.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é aplicar a simulação a eventos discretos em um sistema interorganizacional no contexto da economia circular de valorização de resíduos.

Entende-se como objetivos específicos:

- a) Identificar as vantagens e desvantagens do uso da simulação a eventos discretos no contexto de projeto de sistemas circulares interorganizacionais;

- b) Analisar os indicadores de Custo Logístico, Produção e Produtividade para o sistema circular interorganizacional de valorização de resíduo, para proposição de melhorias;
- c) Apoiar a tomada de decisão em um sistema circular interorganizacional utilizando como instrumento a simulação a eventos discretos.

1.4 MÉTODO

Com base em seus objetivos, este estudo classifica-se como uma pesquisa exploratória, pois busca analisar diversos aspectos de uma determinada situação. Segundo Gil (2010), o planejamento de pesquisas exploratórias é bastante flexível e possibilita a consideração dos mais variados aspectos relativos ao fato estudado através de levantamento bibliográfico, entrevistas e análises. Quanto à natureza dos resultados, esse trabalho classifica-se como uma pesquisa aplicada, uma vez que está dirigida à solução de um problema específico e busca gerar conhecimento para aplicação prática (MORESI, 2003). Utilizou-se uma abordagem quantitativa e como procedimento técnico, empregou-se a Simulação a Eventos Discretos (SED), seguindo as etapas descritas por Bateman *et al.* (2013) e Banks (2005): (i) Definição do Problema e Estabelecimento de objetivos; (ii) Formulação e Planejamento do Modelo; (iii) Coleta de dados; (iv) Desenvolvimento do Modelo; (v) Verificação; (vi) Validação; (vii) Experimentação; e (viii) Análise dos Resultados. O segmento alvo deste estudo é o segmento calçadista, mas especificamente a borracha de calçados pós-consumo e resíduos de borracha pré-consumo. Mais detalhes da unidade de pesquisa são apresentados no capítulo 3, Procedimentos Metodológicos.

1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta seção apresenta as delimitações da pesquisa, ou seja, os limites de aplicação e conclusão deste estudo. O trabalho está delimitado no desenvolvimento de um modelo de simulação, utilizando a SED, para apoiar a tomada de decisão de um sistema circular interorganizacional. O modelo é baseado em um sistema real, em operação e ampliação, com foco na reciclagem de borracha de calçados. Este trabalho não entrará em detalhe e discussão perante a viabilidade econômico-financeira do sistema interorganizacional, custos de produção e investimentos, limitando-se a analisar os indicadores de Produção Total, Produtividade e Custo Logístico, a partir de experimentos para determinar quais combinações de veículos e origens de resíduo demonstram o menor custo logístico mantendo os demais indicadores em níveis relativamente altos.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. No capítulo um é apresentada uma contextualização, abrangendo a introdução, definição da questão de pesquisa, os objetivos gerais e específicos, a justificativa e a delimitação. No capítulo dois é apresentado o referencial teórico desta pesquisa, voltado para a apresentação das características da EC, LR e sistemas interorganizacionais, bem como a aplicação de simulação, seus diferentes métodos e aplicações no contexto da EC. Por fim, aborda conceitos relacionados ao segmento calçadista, com foco em seus impactos ambientais e em práticas sustentáveis que buscam mitigá-los. No capítulo três, os procedimentos metodológicos deste trabalho são explorados. Apresenta-se a unidade de análise, assim como um breve histórico do projeto que originou essa pesquisa. Na sequência, descreve-se o passo a passo seguido na modelagem e análise da simulação. No capítulo quatro, os resultados são apresentados. A seção descreve os resultados conforme a sequência do método apresentado, desde a etapa de identificação dos objetivos da simulação realizada até a análise dos resultados. As implicações práticas da pesquisa são apresentadas no capítulo cinco. As considerações finais são apresentadas no capítulo seis. Além de uma análise geral do estudo, apresenta-se as contribuições e limitações identificadas, levantando sugestões para a realização de pesquisas futuras no sistema estudado. Por fim, são listadas as referências utilizadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ECONOMIA CIRCULAR, LOGÍSTICA REVERSA E SISTEMAS INTERORGANIZACIONAIS

2.2 SIMULAÇÃO COMO SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO EM ECONOMIA CIRCULAR

2.3 SISTEMAS CIRCULARES NO SEGMENTO DE CALÇADOS

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 UNIDADE DE PESQUISA

3.2 MÉTODO DE TRABALHO

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E ESTABELECIMENTO DOS OBJETIVOS

4.2 COLETA DE DADOS

4.3 FORMULAÇÃO E PLANEJAMENTO DO MODELO

4.3.1 SUDESTE

4.3.2 NORDESTE

4.3.3 SUL

4.3.4 *INPUTS GERAIS*

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.4.1 SUDESTE

4.4.2 NORDESTE

4.4.3 SUL

5. IMPLICAÇÕES PRÁTICAS DO ESTUDO, *INSIGHTS* E OPORTUNIDADES

5.1 QUESTÕES LIGADAS AO AUMENTO DA COLETA, ESCALA DE PRODUÇÃO E GERAÇÃO DE LOTES

5.2 QUESTÕES LIGADAS À DISPONIBILIDADE DE MATERIAL

5.3 QUESTÕES LIGADAS À ESTRUTURA DA LOGÍSTICA REVERSA

5.4 QUESTÕES LIGADAS AO TIPO DE VEÍCULO

5.5 QUESTÕES LIGADAS AO CUSTO POR KG

5.6 QUESTÕES LIGADAS AO BENEFICIAMENTO DA BORRACHA PRÉ-CONSUMO NA FÁBRICA

5.7 QUESTÕES LIGADAS À DISPONIBILIDADE DE DADOS

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo tratou da aplicação da Simulação a Eventos Discretos na estruturação de um sistema interorganizacional circular. Entende-se que os objetivos foram atingidos e a questão de pesquisa “*Quais são os benefícios que a simulação a eventos discretos pode trazer para a estruturação de um sistema circular interorganizacional para valorização de resíduos?*” foi respondida. A realização da modelagem e simulação possibilitou uma maior compreensão do sistema, oportunizando a identificação de oportunidades e percepção de *insights* que podem ser úteis para a tomada de decisão no curto e médio prazo.

Dentre os benefícios, a aplicação da simulação permitiu (i) detectar a necessidade de uma nova política de relacionamento transparente com os membros. As entrevistas realizadas, mostraram que os *players* desconheciam e estavam curiosos sobre a existência e características dos outros *players* envolvidos, perguntando sobre o processo de prospecção da empresa cliente, demonstrando que ainda não existe um fluxo de informações transparente entre os *players*. A simulação, indiretamente, revelou-se um aspecto que precisa ser melhorado. A governança do sistema pode operar para definir diretrizes, comunicar e mensurar resultados, de forma ampla e acessível, para a construção de relações de confiança.

Destaca-se que a simulação é comumente usada em projetos internos das organizacionais. No contexto interorganizacional, o foco não foi colocado primariamente nas operações produtivas, mas nas operações logísticas. Existe uma interdependência entre os fluxos logísticos e operações internas de cada elo, que não puderam ser analisadas em detalhamento. De qualquer forma, foi incluída no estudo (i) a análise da operação de beneficiamento do resíduo pré-consumo nas Fábricas, (ii) a utilização de diferentes veículos na configuração logística e (iii) a análise do efeito produzido pelo isolamento das origens do resíduo (somente PCs e somente cooperativas).

A simulação permitiu a análise do fluxo de resíduo um ambiente computacional, sem dispendere recursos financeiros e investimentos massivos da empresa cliente; possibilitou a obtenção de *insights* sobre a interação de variáveis e sua importância para o sistema, através das análises dos *outputs*, principalmente de Produção e Distâncias percorridas, e suas interações com os indicadores de Produtividade, Produção Total e Custos Logísticos/kg; auxiliou na compreensão do sistema, afinal todo o processo de modelagem e simulação torna-se uma ferramenta de aprendizagem, que torna a compreensão e domínio do funcionamento do sistema um resultado natural de sua aplicação; e respondeu perguntas “e se?”, como demonstrado através dos experimentos realizados, simulando situações de incremento de coletas pós-

consumo e de isolamento das fontes de resíduos, para analisar seus impactos de forma individual. Esses benefícios vão ao encontro do que Banks (2005) considera as vantagens do uso da simulação, mostrando que se aplicam também no contexto dos sistemas interorganizacionais para EC.

Apesar da limitação de dados nas fases iniciais da implementação, a simulação a eventos discretos foi eficiente para estudar a logística reversa. Reforça-se que os modelos podem ser atualizados à medida que a cadeia cresce e amadurece, atualizando seus *inputs* para novas rodadas e comparação com esses resultados iniciais. Por exemplo, adição ou subtração de pontos de coleta e cooperativas (atualizando as taxas de coleta pós-consumo), prospecção de novos beneficiadores e transformadores, aumento da capacidade dos *players* atuais, consideração de novos veículos, etc. Além disso, as planilhas possibilitam a alteração de dados de entrada de custos para avaliar o impacto sobre os resultados totais.

Considera-se que as questões de pesquisa da simulação também foram respondidas, na medida em que foram analisados os impactos dos veículos sobre os indicadores (QP1), apresentando diferentes resultados de acordo com as combinações utilizadas; assim como foram analisados os impactos das diferentes origens de resíduo (QP2) sobre Produção Total (t), Produtividade (%) e Custos Logístico/kg (R\$). Por fim, a análise do beneficiamento sendo realizado na Fábrica do Sudeste atende à QP3, ao detectar uma redução dos custos logísticos realizando essa mudança na operação.

Além das questões de pesquisa, foram assumidas algumas premissas no início dessa dissertação, que são reforçadas pelos resultados encontrados. Tendo em vista a premissa “desenhar ciclos fechados de logística reversa para fins de reciclagem é uma forma de desenvolver a cultura de colaboração na EC” anteriormente mencionada na literatura, entende-se que foi reforçada no caso. A parceria entre NIProS e a Startup criou uma sinergia entre metodologia e prática. NIProS/Hélice é um grupo de pesquisa com acesso a literatura, conhecimentos de gestão e ferramentas de tomada de decisão disponíveis na engenharia industrial. A Startup acumulou experiência na operação bem-sucedida de projetos de gerenciamento de resíduos para grandes empresas em diferentes regiões do Brasil. Nas palavras do gestor do Startup:

“[...]NIProS/Hélice dá solidez ao trabalho que fazemos. Toda a estrutura teórica de consultoria, análise e pesquisa que o NIProS desenvolve é extremamente complementar a tudo que a Startup faz. Então, quando trabalhamos juntos, podemos construir soluções confiáveis. [...] A pesquisa fornece a base de que precisamos, especialmente em um ambiente que é ainda

muito incerto (inovador)." Além disso, experiências anteriores entre essas instituições provaram uma cultura compartilhada e um entendimento comum na realização de tarefas e resultados compartilhados (Informação verbal¹).

A relação empresa-universidade revela-se complementar. Enquanto a universidade por meio dos grupos de pesquisa avança no conhecimento aplicado, a empresa (startup) tem flexibilidade, qualificação e competência para operar em escala, testando e pivotando os modelos desenhados colaborativamente. Estudos longitudinais passam a ser possíveis quando parcerias do tipo NIProS/Hélice-Startup-Empresa Cliente se estabelecem.

Quanto à premissa de que “é adequado projetar o ciclo fechado garantindo economia de escala por meio de abordagens orientadas à demanda”, reforça-se a necessidade de ter uma produção puxada por um produto final que já seja vendido no mercado. Caso contrário, corre-se o risco de os estoques de produtos finais não vendidos se converterem em novo resíduo, estocado ou impactando o meio ambiente. No caso estudado, os *players* da região Sul encontram-se ainda em estágio de definição de qual vai ser o produto final a ser fabricado com a borracha reciclada. Alguns testes foram realizados pelas empresas do SE e Sul. Porém, outros já possuem um mercado bem definido para comercializar o produto final que incorpora o resíduo de borracha reciclado, especialmente na região NE.

Quanto as premissas de que “é necessário projetar com o fracasso em mente, é melhor testar e prototipar o quanto antes” e “o design com ‘mão na massa’ promove uma chamada para ação e acelera o ganho de conhecimento”, entende-se que a simulação agiu também como uma ferramenta nesse sentido. Além de possibilitar a análise de indicadores de nove experimentos e a geração dos diagnósticos de oportunidades e *insights* discutidos anteriormente, a simulação também trouxe luz ao que falta e ainda se faz necessário ser definido pelas empresas envolvidas para que esse sistema se torne funcional. Algumas definições pendentes incluem o alinhamento de capacidades dos *players* nas regiões, definição de produtos e quantidades de borracha necessária, definições de valores aceitáveis (de venda e de compra).

Identifica-se como a contribuição prática do estudo os *insights* e oportunidades identificados a partir dos resultados obtidos a partir da configuração atual do modelo, com os inputs utilizados nesse estudo. A contribuição metodológica encontra-se na característica atualizável do modelo de simulação construído, tornando-o uma ferramenta que pode ser ainda aprimorada quanto melhor definidos forem os inputs. Por fim entende-se como contribuição teórica o estudo de um tema pouco explorado como é a LR, e seu custo logístico, em um sistema

¹ Fala do gestor da Startup em avaliação de satisfação após o projeto (2023).

de EC no segmento calçadista, representando utilidade tanto para os acadêmicos da área, quanto para os gestores do sistema na tomada de decisão.

Entretanto, como discutido, a literatura indica que a simulação não é uma ferramenta perfeita e sofre com os efeitos negativos das suposições e simplificações necessárias para a modelagem, além de não apresentar uma solução ótima para os problemas modelados (LAW, 2014; BATEMAN *et al.*, 2013).

Essas limitações foram percebidas durante a modelagem e simulação dos sistemas estudados. Devido à complexidade e magnitude dos modelos, diversas simplificações foram realizadas tais como: PCs e cooperativas foram agrupados em todas as regiões para reduzir o número de iterações; restringiu-se os tipos de veículo, poderiam ter sido consideradas mais opções e/ou combinações de veículos em um mesmo cenário; houve a equiparação do veículo entre PCs e cooperativas, fazendo com que as cooperativas fossem consideradas pontos de coleta comuns (com a mesma configuração logística), mas é possível que na realidade esse transporte seja realizado com tipos de veículo diferentes.

O status inicial de implementação do processo exigiu a realização de suposições para dados faltantes. Algumas cooperativas e pontos de coleta não tinham acumulado material no período analisado e, para estas, considerou-se a menor quantidade coletada por um elo correspondente. Houve a definição da capacidade 500 kg de armazenamento para as cooperativas e consolidadores. No ambiente real, esta capacidade é volátil e dependente da oferta e demanda de outros materiais bem como seus preços (priorizam o material de maior valor). Consolidadores Fictícios foram criados nos estados de PR, SC e ES para fins de simulação, pois não haviam sido prospectados até a realização do estudo. As suas localizações foram definidas usando a ferramenta centro de gravidade.

Estas condições listadas certamente influenciam os resultados em alguma medida. Além disso, não foram apresentadas soluções ótimas, apenas análises referentes aos experimentos realizados, com comparações entre estes e seleção dos melhores resultados, que não necessariamente representam situações otimizadas. Entende-se que a dificuldade para obtenção de dados e indefinições relatadas pelas empresas sugerem que a simulação nas fases iniciais de implementação dos sistemas interorganizacionais guardam muitas limitações. Suas aplicações devem ser repetidas periodicamente para serem aprimoradas e incrementadas com dados cada vez mais realistas.

Dessa forma, para pesquisas futuras, sugere-se a definição de um escopo delimitado, com definições mais claras, possibilitando parâmetros mais precisos. Nesse sentido, é necessária uma aproximação dos *players* dos diferentes elos, em cada região, para que possam

alinhar suas capacidades mínimas, máximas e trazer clareza para a definição de dados. A realização de um *workshop* com todas as empresas, para que seja discutida a participação de cada uma apresenta-se como uma oportunidade de crescimento para o sistema, agregando na criação de uma relação de confiança, necessária, entre os *players* (GULARTE, 2022; JÄGER-ROSKO, PETERSEN, 2022; PAULA *et al.*, 2020). O *workshop* propicia o alinhamento de expectativas e comprometimento, além de servir para sanar preocupações e dúvidas comuns a todos os *players* e reforçar a necessidade da cooperação para a manutenção do sistema. A criação de uma visão comum traz a valorização de cada função e gera compromisso.

Diversas oportunidades de estudo foram citadas na seção de implicações práticas, como: simular outras capacidades de armazenamento nos consolidadores e mais opções de veículos realizando os transportes. Sugere-se também a simulação de frotas mistas, proporcionando análises mais diversas acerca dos transportes. Além disso, seria interessante que modelagens futuras considerem os tempos de processamento nas cooperativas, possibilitando um estudo sobre a automação dos processos de triagem e higienização, que consomem tempos consideráveis na situação real.

Outra possibilidade é a de encontrar um ponto de equilíbrio, que represente a quantidade de resíduo mensal gerado para o sistema que apresente os melhores resultados para os indicadores. Estima-se que os dados já disponíveis a partir dessa primeira aplicação da simulação permitam a realização de uma análise matemática dos dados.

Com o passar dos meses (de outubro/2022 para maio/2023), os dados das coletas pós-consumo provavelmente estejam mais robustos e proporcionem a criação de distribuições estatísticas para servirem como *input* nos modelos. Estima-se que assim a geração de resíduos seria representada de forma mais fidedigna à realidade, em relação à geração constante configurada nesse estudo.

REFERÊNCIAS

ABICALÇADOS – Associação Brasileira das Indústrias de Calçados. **Relatório Setorial**. 2022.

ADANE, Tigist Fetene *et al.* Application of system dynamics for analysis of performance of manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 53, p. 212-233, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.004>.

ADHIKARI, B.; DE, Debapriya; MAITI, S. Reclamation and recycling of waste rubber. **Progress in polymer science**, v. 25, n. 7, p. 909-948, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00020-4).

ALAMEREW, Yohannes A.; BRISSAUD, Daniel. Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120025, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120025>

ALBERS, Kyle; CANEPA, Peter; MILLER, Jennifer. Analyzing the environmental impacts of simple shoes: A life cycle assessment of the supply chain and evaluation of end-of-life management options. The Donald Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara, 2008. Disponível em: <https://bren.ucsb.edu/projects/analyzing-environmental-impacts-simple-shoes-life-cycle-assessment-supply-chain-and>.

ALKAHTANI, Mohammed *et al.* An insight into reverse logistics with a focus on collection systems. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 548, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13020548>.

AMIR, Saman *et al.* Towards circular economy: A guiding framework for circular supply chain implementation. **Business Strategy and the Environment**, 2022. doi.org/10.1002/bse.3264.

ÁVALOS, Gerardo Alonso Torres; GONZÁLEZ, Edith Ariadna Lozano. Recuperación y tratamiento de residuos en la industria del calzado de Lagos de Moreno, Jalisco, México. *Ra Ximhai*, v. 14, n. 3, p. 51-64, 2018. doi.org/10.35197/rx.14.03.2018.04.gt.

BAL, Alperen; BADURDEEN, Fazleena. A business model to implement closed-loop material flow in IoT-enabled environments. **Procedia Manufacturing**, v. 38, p. 1284-1291, 2019. doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.162.

BANKS, Jerry. **Discrete event system simulation**. Pearson Education India, 2005.

BATEMAN, R. *et al.* **Simulação de sistemas: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BEN-ELI, M. **Systems Thinking & Systems Modelling**. The Sustainability Laboratory. 2018. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1CFvLyuhSJS9Cpfz0XDZNV-e89If8H4f2/view>.

BERARDI, Patricia Calicchio; DE BRITO, Renata Peregrino. Supply chain collaboration for a circular economy-From transition to continuous improvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 328, p. 129511, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129511>

- BERLIN, Daniel; FELDMANN, Andreas; NUUR, Cali. Supply network collaborations in a circular economy: A case study of Swedish steel recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 179, p. 106112, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106112>
- BERNON, Michael; TIAHJONO, Benny; RIPANTI, Eva Faja. Aligning retail reverse logistics practice with circular economy values: an exploratory framework. **Production Planning & Control**, v. 29, n. 6, p. 483-497, 2018. doi.org/10.1080/09537287.2018.1449266.
- BOCKEN, Nancy MP *et al.* Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of industrial and production engineering**, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016. doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124.
- BORCHARDT, Miriam *et al.* Redesign of a component based on ecodesign practices: environmental impact and cost reduction achievements. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 1, p. 49-57, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.006>.
- BRAILSFORD, Sally C.; HILTON, Nicola A. A comparison of discrete event simulation and system dynamics for modelling health care systems. 2001. Disponível em: https://eprints.soton.ac.uk/35689/1/glasgow_paper.pdf.
- BRITO, M. P.; DEKKER, R. A framework for reverse logistics. Rotterdam: Erasmus Research Institute of Management, 2003.
- BURGER, Martijn *et al.* The heterogeneous skill-base of circular economy employment. **Research Policy**, v. 48, n. 1, p. 248-261, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.015>.
- CARVALHO FILHO, José; NUNHES, Thais Vieira; OLIVEIRA, Otavio Jose. Guidelines for cleaner production implementation and management in the plastic footwear industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, p. 822-838, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.343>.
- CARVALHO, Tereza CMB *et al.* Sustainable Origin Seal—Increasing the Brazilian Footwear Sector International Competitiveness. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 3, n. 1, 2014. doi.org/10.20533/ijsted.2046.3707.2014.0019.
- CHAKRABORTY, Kasturi *et al.* Recognizing the rapid expansion of rubber plantation—a threat to native forest in parts of northeast India. **Current Science**, p. 207-213, 2018. <https://doi.org/10.18520/cs%2Fv114%2Fi01%2F207-213>.
- CHERTOW, Marian R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. Annual review of energy and the environment, v. 25, n. 1, p. 313-337, 2000. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>.
- CHITTELLA, Harika *et al.* Rubber waste management: A review on methods, mechanism, and prospects. **Polymer Degradation and Stability**, v. 194, p. 109761, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109761>.
- CHROBOT, P. *et al.* Measuring fashion: Environmental impact of the global apparel and footwear industries study. Full report and methodological considerations, 2018. Disponível em: https://quantis.com/wp-content/uploads/2018/03/measuringfashion_globalimpactstudy_full-report_quantis_cwf_2018a.pdf.

COSTA, Achyles Barcelos da. The footwear industry in Vale do Sinos (Brazil): competitive adjustment in a labour-intensive sector. **Cepal Review**, 2010.

<https://doi.org/10.18356/abe2f7e8-en>.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. Supply Chain Management Terms and Glossary. 2013. Disponível em:

https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921.

DE PONTE, Caterina; LISCIO, Marco Ciro; SOSPIRO, Paolo. State of the art on the Nexus between sustainability, fashion industry and sustainable business model. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 32, p. 100968, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.100968>.

DENG, Sidi *et al.* Planning a circular economy system for electric vehicles using network simulation. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 63, p. 95-106, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.03.003>.

DEV, Navin K.; SHANKAR, Ravi; CHOUDHARY, Alok. Strategic design for inventory and production planning in closed-loop hybrid systems. **International Journal of Production Economics**, v. 183, p. 345-353, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.017>.

DOMINGUEZ, Roberto; CANNELLA, Salvatore; FRAMINAN, Jose M. Remanufacturing configuration in complex supply chains. **Omega**, v. 101, p. 102268, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102268>.

DUTTA, Pankaj *et al.* Fostering reverse logistics in India by prominent barrier identification and strategy implementation to promote circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126241, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126241>

EMF – ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards The Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition**. Ellen MacArthur Foundation, 2013.

EMF – ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe**. **Ellen MacArthur Foundation and the McKinsey Center for Business and Environment**, p. 1-22, 2015. Disponível em:

https://emf.thirdlight.com/file/24/_ABkCs_h7gRYB_Am9L_JfbYWF/Growth%20within%3A%20a%20circular%20economy%20vision%20for%20a%20competitive%20Europe.pdf.

EMF - Ellen MacArthur Foundation. **Waste Not, Want Not. Capturing the Value of the Circular Economy through Reverse Logistics**. 2016. Disponível em:

https://www.dpdhl.com/en/trends-inlogistics/studies/circular_economy.html.

EMF – ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Universal circular economy policy goals**. Ellen MacArthur Foundation, 2021. Disponível em:

<https://ellenmacarthurfoundation.org/universal-policy-goals/overview#upg-paper>.

ENGBLOM, Janne *et al.* Multiple-method analysis of logistics costs. **International journal of production economics**, v. 137, n. 1, p. 29-35, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.007>.

- ESPOSITO, Mark; TSE, Terence; SOUFANI, Khaled. Reverse logistics for postal services within a circular economy. **Thunderbird International Business Review**, v. 60, n. 5, p. 741-745, 2018. <https://doi.org/10.1002/tie.21904>.
- FRACCASCIA, Luca *et al.* Energy-based industrial symbiosis: A literature review for circular energy transition. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 4, p. 4791-4825, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00840-9>.
- FRACCASCIA, Luca *et al.* The role of redundancy in industrial symbiotic business development: A theoretical framework explored by agent-based simulation. **International Journal of Production Economics**, v. 221, p. 107471, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.08.006>.
- FRACCASCIA, Luca; YAZAN, Devrim Murat. The role of online information-sharing platforms on the performance of industrial symbiosis networks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 136, p. 473-485, 2018.
- FRANCO, M. A. A system dynamics approach to product design and business model strategies for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118327>.
- FRANCO, Maria A. Circular economy at the micro level: A dynamic view of incumbents' struggles and challenges in the textile industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 833-845, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.056>
- GEISSDOERFER, Martin *et al.* The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017. doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
- GELENBE, Erol; GUENNOUNI, Hatim. FLEXSIM: A flexible manufacturing system simulator. **European Journal of Operational Research**, v. 53, n. 2, p. 149-165, 1991. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90131-E](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90131-E)
- GENG, Yong *et al.* Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 23, n. 1, p. 216-224, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>.
- GHALI, Mohamed Raouf; FRAYRET, Jean-Marc; AHABCHANE, Chahid. Agent-based model of self-organized industrial symbiosis. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 452-465, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.128>.
- GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11-32, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GLÖSER-CHAHOU, S. *et al.* Simulating the service lifetimes and storage phases of consumer electronics in Europe with a cascade stock and flow model. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 1313–1321, 2019. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.244.

GOLROUDBARY, S. R.; ZAHRAEE, S. M. System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 53, p. 88–102, 2015.

doi.org/10.1016/j.simpat.2015.02.001

GOTTFRIDSSON, M.; ZHANG, Y.. Environmental impacts of shoe consumption: Combining product flow analysis with an LCA model for Sweden. Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2015. Disponível em:

<https://odr.chalmers.se/items/7d105f3f-54e6-4e3c-9d57-6993f7c51287>.

GOVINDAN, Kannan; BOUZON, Marina. From a literature review to a multi-perspective framework for reverse logistics barriers and drivers. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 318-337, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.040>

GREGSON, Nicky *et al.* Interrogating the circular economy: the moral economy of resource recovery in the EU. **Economy and Society**, v. 44, n. 2, p. 218-243, 2015.

doi.org/10.1080/03085147.2015.1013353.

GUARNIERI, Patricia; CERQUEIRA-STREIT, Jorge A.; BATISTA, Luciano C. Reverse logistics and the sectoral agreement of packaging industry in Brazil towards a transition to circular economy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 153, p. 104541, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104541>.

GULARTE, A. C. Procedimento de análise de risco e econômico-financeira para implementação de sistemas circulares interorganizacionais: um estudo de resíduos de borracha de calçados. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2022.

GUZZO, D.; RODRIGUES, V. P.; MASCARENHAS, J. A systems representation of the Circular Economy: Transition scenarios in the electrical and electronic equipment (EEE) industry. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 163, 2021.

doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120414.

HAN, Sara LC *et al.* Standard vs. upcycled fashion design and production. **Fashion Practice**, v. 9, n. 1, p. 69-94, 2017. doi.org/10.1080/17569370.2016.1227146

HERAS-SAIZARBITORIA, Iñaki; BOIRAL, Olivier; TESTA, Francesco. Circular economy at the company level: An empirical study based on sustainability reports. **Sustainable Development**, 2023. doi.org/10.1002/sd.2507

HOFMANN, Florian. Circular business models: business approach as driver or obstructer of sustainability transitions?. **Journal of Cleaner Production**, v. 224, p. 361-374, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.115>

HOWARD, Mickey *et al.* Going beyond waste reduction: Exploring tools and methods for circular economy adoption in small-medium enterprises. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 182, p. 106345, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106345>.

HUSTER, Sandra *et al.* A simulation model for assessing the potential of remanufacturing electric vehicle batteries as spare parts. **Journal of Cleaner Production**, v. 363, p. 132225, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132225>.

- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico**, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>
- IRP - International Resource Panel. Re-defining Value – The Manufacturing Revolution. Remanufacturing, Refurbishment, Repair and Direct Reuse in the Circular Economy. A Report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. 2018. Disponível em: <https://www.resourcepanel.org/reports/re-definingvalue-manufacturing-revolution>. Acesso em: 15 Fev 2023.
- IMARC - International Market Analysis Research and Consulting Group. Footwear Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023-2028.2023. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com/footwear-market>.
- JABBOUR, Ana Beatriz Lopes *et al.* Circular economy business models and operations management. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 1525-1539, 2019. doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.349.
- JÄGER-ROSKO, Moritz; PETERSEN, Moritz. Advancing the circular economy through information sharing: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, p. 133210, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133210>
- JAIN, Sanjay *et al.* A hierarchical approach for evaluating energy trade-offs in supply chains. **International Journal of Production Economics**, v. 146, n. 2, p. 411-422, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.03.015>.
- JAIN, Sanjay; LINDSKOG, Erik; JOHANSSON, Björn. Supply chain carbon footprint tradeoffs using simulation. In: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2012. p. 1-12. doi.org/10.1109/SiRF.2012.6160169
- KHAN, Athar Ajaz; ABONYI, János. Information sharing in supply chains-Interoperability in an era of circular economy. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, p. 100074, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100074>
- KOHAN, Lais. Sustentabilidade em calçados: panorama brasileiro, materiais e contribuição de material para solado. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100133/tde-19012021-171127/pt-br.php>.
- KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, v. 143, p. 37–46, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- KUMAR, P. *et al.* Recycled rubber: The rubber granulate-virgin rubber interface. **Rubber Chemistry and Technology**, v. 80, n. 1, p. 24-39, 2007. <https://doi.org/10.5254/1.3548167>.
- KUO, Tsai-Chi *et al.* Toward a circular economy: A system dynamic model of recycling framework for aseptic paper packaging waste in Indonesia. **Journal of Cleaner Production**, v. 301, p. 126901, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126901>

- KUZMIN, D.; BAGINOVA, V.; AGEIKIN, A. Discrete event simulation model of the railway station. **Transportation Research Procedia**, v. 63, p. 929-937, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.091>.
- KWAK, Kiho; KIM, Dongyoup; HEO, Chan. Sustainable innovation in a low-and medium-tech sector: Evidence from an SME in the footwear industry. **Journal of Cleaner Production**, p. 136399, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136399>.
- LACERDA, L. Logística reversa: uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais. Rio de Janeiro: COPPEAD/UFRJ, v. 6, 2002.
- LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. New York: Mcgraw-hill, 2014.
- LEITE, P. R. Logística reversa: nova área da logística empresarial. Revista Tecnológica, São Paulo, 2002.
- LIEDER, Michael; RASHID, Amir. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 36-51, 2016. doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042.
- LIU, Wenjun *et al.* Environmental and socioeconomic impacts of increasing rubber plantations in Menglun township, southwest China. **Mountain Research and Development**, v. 26, n. 3, p. 245-253, 2006.. [doi.org/10.1659/0276-4741\(2006\)26\[245:EASIOI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2006)26[245:EASIOI]2.0.CO;2).
- MACAL, C. M. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 10(2), 144–156, 2016. doi.org/10.1057/jos.2016.7.
- MAIDSTONE, Robert. Discrete event simulation, system dynamics and agent based simulation: Discussion and comparison. **System**, v. 1, n. 6, p. 1-6, 2012. Disponível em: <https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/robert.maidstone/pdf/MresSimulation.pdf>.
- MALEC, Elzbieta. The benefits of using computer simulation models to support decision-making. In: *Advances in Manufacturing*. Springer International Publishing, 2018. p. 205-214. [doi:10.1007/978-3-319-68619-6_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_20)
- MALLICK, Pravin Kumar *et al.* Closing the loop: Establishing reverse logistics for a circular economy, a systematic review. **Journal of Environmental Management**, v. 328, p. 117017, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117017>
- MORESI, Eduardo *et al.* **Metodologia da pesquisa**. Brasília: Universidade Católica de Brasília, v. 108, n. 24, p. 5, 2003.
- MORENO, Mariale *et al.* A conceptual framework for circular design. **Sustainability**, v. 8, n. 9, p. 937, 2016. doi.org/10.3390/su8090937.
- MUHA, Robert. An overview of the problematic issues in logistics cost management. **Pomorstvo**, v. 33, n. 1, p. 102-109, 2019. <https://doi.org/10.31217/p.33.1.11>.
- MYHRE, Marvin; MACKILLOP, Duncan A. Rubber recycling. **Rubber Chemistry and Technology**, v. 75, n. 3, p. 429-474, 2002. doi.org/10.5254/1.3547678

- NASIR, M. H. A. *et al.* Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. **International Journal of Production Economics**, v. 183, p. 443–457, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.008>
- ORMAZABAL, Marta *et al.* Circular economy in Spanish SMEs: challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 157-167, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.031>
- PAL, Rudrajeet; SAMIE, Yasaman; CHIZARYFARD, Armaghan. Demystifying process-level scalability challenges in fashion remanufacturing: An interdependence perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125498, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125498>
- PAULA, Istefani Carisio de *et al.* Are collaboration and trust sources for innovation in the reverse logistics? *Insights from a systematic literature review*. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 25, n. 2, p. 176-222, 2020. doi.org/10.1108/SCM-03-2018-012.
- PAULA, Istefani Carisio de *et al.* Decision Matrix for development of new demand-driven Inter-organizational Circular Economy systems”. In: University College Dublin Ireland (ICRS) International Conference on Resource Sustainability.Irlanda. 2021. Disponível em: <http://icrs2021dublin.ucd.ie/Media/files/Book-of-Abstracts.pdf> (9 Aug. 2022).
- PAN, Shu-Yuan *et al.* Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 409-421, 2015. doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.124.
- PARIDA, Vinit *et al.* Orchestrating industrial ecosystem in circular economy: A two-stage transformation model for large manufacturing companies. **Journal of Business Research**, v. 101, p. 715-725, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.006>.
- PEREIRA, A. L. *et al.* Logística reversa e sustentabilidade. São Paulo: Cengage Learning, 2013.
- PIGOSSO, Daniela CA; MCALOONE, Tim C. Making the transition to a circular economy within manufacturing companies: The development and implementation of a self-assessment readiness tool. *Sustainable Production and Consumption*, v. 28, p. 346-358, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.05.011>.
- PRAHINSKI, Carol; KOCABASOGLU, Canan. Empirical research opportunities in reverse supply chains. **Omega**, v. 34, n. 6, p. 519-532, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.003>
- PRIETO-SANDOVAL, Vanessa; JACA, Carmen; ORMAZABAL, Marta. Towards a consensus on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 605-615, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>.
- RABE, Markus *et al.* An approach for increasing flexibility in green supply chains driven by simulation. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2012. p. 1-12. <https://doi.org/10.1109/WSC.2012.6465184>
- RAHIMIFARD, S.; STAIKOS, T.; COATES, G. Recycling of footwear products. A position paper prepared by the Centre for Sustainable Manufacturing and Reuse/Recycling

Technologies (SMART). Loughborough University, Leicestershire, 2007. Disponível em: https://www.centreforsmart.co.uk/system/downloads/attachments/000/000/002/original/Footwear_recycling_position_paper.pdf.

REDDY, K. Nageswara et al. Effect of carbon tax on reverse logistics network design. **Computers & Industrial Engineering**, v. 139, p. 106184, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106184>.

ROCI, Malvina *et al.* Towards circular manufacturing systems implementation: A complex adaptive systems perspective using modelling and simulation as a quantitative analysis tool. **Sustainable Production and Consumption**, v. 31, p. 97-112, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.033>.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. Going backwards: reverse logistics trends and practices. Reno: Reverse Logistics Executive Council, 1998.

RIES, Eric. **A startup enxuta**. Leya, 2012.

RUGGIERI, Alessandro *et al.* A meta-model of inter-organisational cooperation for the transition to a circular economy. **Sustainability**, v. 8, n. 11, p. 1153, 2016. <https://doi.org/10.3390/su8111153>

SAIDANI, Michael *et al.* How to assess product performance in the circular economy? Proposed requirements for the design of a circularity measurement framework. **Recycling**, v. 2, n. 1, p. 6, 2017. doi.org/10.3390/recycling2010006.

SASSANELLI, Claudio; ROSA, Paolo; TERZI, Sergio. Supporting disassembly processes through simulation tools: A systematic literature review with a focus on printed circuit boards. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 60, p. 429-448, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.009>

SASTRE, Ricardo Marques; DE PAULA, Istefani Carísio; ECHEVESTRE, Marcia Elisa Soares. A systematic literature review on packaging sustainability: contents, opportunities, and guidelines. **Sustainability**, v. 14, n. 11, p. 6727, 2022. doi.org/10.3390/su14116727.

SIEBERS, P.O.; MACAL, C. M.; GARNETT, J.; BUXTON, D.; PIDD, M. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! **Journal of Simulation**, 4(3), 204–210, 2010. doi.org/10.1057/jos.2010.14.

SINGH, Jagdeep *et al.* Challenges and opportunities for scaling up upcycling businesses—The case of textile and wood upcycling businesses in the UK. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 150, p. 104439, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104439>

STAHEL, Walter R. The circular economy. **Nature**, v. 531, n. 7595, p. 435-438, 2016. doi.org/10.1038/531435a.

STAIKOS, Theodoros *et al.* End-of-life management of shoes and the role of biodegradable materials. In: Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. p. 497-502. 2006. Disponível em: <https://www.mech.kuleuven.be/lce2006/177.pdf>.

STAIKOS, Theodoros; RAHIMIFARD, Shahin. Post-consumer waste management issues in the footwear industry. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B:

Journal of Engineering Manufacture, v. 221, n. 2, p. 363-368, 2007.
doi.org/10.1243/09544054jem732sc.

STERMAN, J.D., 2000. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. **Management**. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601336>.

SUMARI, Suliza *et al.* Comparing three simulation model using taxonomy: System dynamic simulation, discrete event simulation and agent based simulation. **International Journal of Management Excellence**, v. 1, n. 3, p. 54-59, 2013.

SWEETSER, Albert. A comparison of system dynamics (SD) and discrete event simulation (DES). In: 17th International Conference of the System Dynamics Society. 1999. Disponível em: <https://proceedings.systemdynamics.org/1999/PAPERS/PARA78.PDF>.

TAKO, Antuela A.; ROBINSON, Stewart. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. **Decision support systems**, v. 52, n. 4, p. 802-815, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.11.015>.

TIBBEN - LEMBKE, Ronald S.; ROGERS, Dale S. Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 7, n. 5, p. 271-282, 2002. <https://doi.org/10.1108/13598540210447719>.

VAN ERP, Tim *et al.* Designing sustainable innovations in manufacturing: A systems engineering approach. **Sustainable Production and Consumption**, v. 37, p. 96-111, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.02.007>

VAN RENSBURG, Melissa L.; NKOMO, S.'phumelele L.; MKHIZE, Ntandoyenkosi M. Life cycle and End-of-Life management options in the footwear industry: A review. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 6, p. 599-613, 2020. <https://doi.org/10.1177/0734242X20908938>.

VELENTURF, Anne PM; JOPSON, Juliet S. Making the business case for resource recovery. **Science of the Total Environment**, v. 648, p. 1031-1041, 2019.

WAKIRU, James *et al.* Maintenance optimization: application of remanufacturing and repair strategies. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 899-904, 2018. doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.11.008

WANG, Lei *et al.* Can industrial symbiosis policies be effective? Evidence from the nationwide industrial symbiosis system in China. **Journal of Environmental Management**, v. 331, p. 117346, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117346>.

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development. **Circular Metrics – Landscape Analysis**. 2018. Disponível em: <https://www.wbcd.org/Programs/Circular-Economy/Factor-10/Metrics-Measurement/Resources/Landscape-analysis>.

WINZ, Ines; BRIERLEY, Gary; TROWSDALE, Sam. The use of system dynamics simulation in water resources management. **Water Resources Management**, v. 23, n. 7, p. 1301-1323, 2009. doi.org/10.1007/s11269-008-9328-7.

YUAN, Zengwei; BI, Jun; MORIGUICHI, Yuichi. The circular economy: A new development strategy in China. **Journal of Industrial Ecology**, v. 10, n. 1-2, p. 4-8, 2006. doi.org/10.1162/108819806775545321.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PLANILHA SUDESTE

<https://linktr.ee/dissertacaojoajaeger>

APÊNDICE B – PLANILHA NORDESTE

<https://linktr.ee/dissertacaojoajaeger>

APÊNDICE C – PLANILHA SUL

<https://linktr.ee/dissertacaojoajaeger>

APÊNDICE D – ROTEIRO ENTREVISTAS

<https://linktr.ee/dissertacaojoajaeger>

APÊNDICE E – RESULTADOS ENTREVISTAS

<https://linktr.ee/dissertacaojoajaeger>

APÊNDICE F – CENTRO DE GRAVIDADE

<https://linktr.ee/dissertacaojoajaeger>

APÊNDICE G – MODELO CONCEITUAL DO SUDESTE

<https://linktr.ee/dissertacaojoajaeger>

APÊNDICE H – MODELO CONCEITUAL DO NORDESTE

<https://linktr.ee/dissertacaojoajaeger>

APÊNDICE I – MODELO CONCEITUAL DO SUL

<https://linktr.ee/dissertacaojoajaeger>